



Apport de la télédétection pour la simulation spatialisée des composantes du bilan carbone des cultures et des effets d'atténuation biogéochimiques et biogéophysiques des cultures intermédiaires

Gaetan Pique

► To cite this version:

Gaetan Pique. Apport de la télédétection pour la simulation spatialisée des composantes du bilan carbone des cultures et des effets d'atténuation biogéochimiques et biogéophysiques des cultures intermédiaires. Hydrologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2021. Français. NNT : 2021TOU30038 . tel-03325160

HAL Id: tel-03325160

<https://theses.hal.science/tel-03325160>

Submitted on 24 Aug 2021

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.



THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

Présentée et soutenue par
Gaétan PIQUE

Le 25 mai 2021

**Apport de la télédétection pour la simulation spatialisée des
composantes du bilan carbone des cultures et des effets
d'atténuation biogéochimiques et biogéophysiques des cultures
intermédiaires**

Ecole doctorale : **SDU2E - Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de
l'Espace**

Spécialité : **Surfaces et interfaces continentales, Hydrologie**

Unité de recherche :
CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère

Thèse dirigée par
Eric CESCHIA et Rémy FIEUZAL

Jury

M. Nicolas VIOVY, Rapporteur
M. Benjamin LOUBET, Rapporteur
Mme Katja KLUMPP, Examinatrice
M. Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY, Examineur
M. Eric CESCHIA, Directeur de thèse
M. Rémy FIEUZAL, Co-directeur de thèse

Résumé

Les changements climatiques et la croissance démographique de la population mondiale amènent aujourd'hui le monde agricole à s'adapter pour faire face à ces deux enjeux majeurs. Si les surfaces agricoles, qui représentent près d'un tiers des terres émergées, contribuent largement aux émissions mondiales de gaz à effet de serre, elles offrent également la possibilité de mettre en place des leviers d'atténuation des changements climatiques. Dans ce contexte, ces travaux de thèse ont vocation à enrichir nos connaissances sur le fonctionnement des surfaces agricoles, à fournir des outils d'évaluation de la contribution des surfaces cultivées aux évolutions du climat, et à quantifier les effets biogéochimiques (stockage de C) et biogéophysiques (effet albédo) d'atténuation des changements climatiques liés à la mise en œuvre de cultures intermédiaires. Pour répondre à ces objectifs, deux approches de modélisation ont été développées au cours de ces travaux.

Le premier volet de cette thèse s'est intéressé à développer une approche de modélisation spatialisée, permettant de fournir des estimations des productions (biomasses et rendements), des flux de CO₂ et d'eau, ces variables servant à la quantification des bilans de carbone et d'eau pour les parcelles de grandes cultures. À cette fin, le modèle agro-météorologique SAFYE-CO₂ assimilant des produits satellites d'indice de végétation à hautes résolutions spatiale et temporelle a été développé et appliqué à différentes cultures (blé, maïs et tournesol) et végétations d'intercultures (repousses spontanées, adventices, cultures intermédiaires). Cette approche a pu être validée sur un réseau de parcelles du sud-ouest de la France, en tirant parti d'un grand nombre d'images satellites et de données de validation sur la zone de l'Observatoire Spatial Régional. Elle a notamment permis d'estimer avec précision les productions de blé, de tournesol et de maïs, ainsi que les flux de CO₂ et d'eau sur les cultures de blé et de tournesol. La végétation, pouvant se développer sur les parcelles pendant les périodes d'interculture, a également été prise en compte afin d'améliorer l'estimation des flux de CO₂ et d'eau. Cela a notamment permis de quantifier l'impact des cultures intermédiaires sur les composantes du bilan C des parcelles de grandes cultures sur la zone d'étude.

Le second volet visait à développer un modèle permettant d'estimer le forçage radiatif induit par la modification de l'albédo de surface suivant l'introduction de cultures intermédiaires dans les rotations à l'échelle de l'Europe. Grâce à des produits albédo moyenne résolution (1/20°), développés par le CNRM (et en collaboration avec ce laboratoire), cette approche de modélisation a permis de quantifier l'effet albédo relatifs aux cultures intermédiaires. Plusieurs scénarii d'introduction ont été simulés pour rendre compte de l'impact de certains facteurs, tels que la neige ou la pluie. Ils ont permis d'alerter sur le potentiel impact négatif de l'assombrissement du sol, induit à long terme (via l'enrichissement des sols en matière organique) par les cultures intermédiaires sur le forçage radiatif des surfaces cultivées.

Enfin, comme tout changement de pratique agricole induit des effets biogéochimiques et biogéophysiques sur le climat, une analyse de ces effets couplés a été menée à une échelle régionale grâce à l'utilisation combinée de ces deux approches de modélisation. Nous en concluons qu'une fois les cultures intermédiaires mises en place, le sol devrait être couvert en permanence pour que l'effet assombrissement du sol ne fasse pas perdre les autres bénéfices climatiques engendrés par cette pratique.

Abstract

Climate change and demographic growth of the world population force farmers and the agricultural sector to adapt in order to face these two major challenges. Cultivated on almost 20% of the total land area, croplands largely contribute to global greenhouse gas emissions. These areas also offer the possibility of implementing climate change mitigation strategies. In this context, this thesis work aims to improve our knowledge on the functioning of croplands and to provide tools to assess the contribution of cultivated lands to climate change, and to quantify biogeochemical (C storage) and biogeophysical (albedo effect) contributions to climate change mitigation through cover crop implementation. To meet these objectives, two modelling approaches were developed during my PhD.

The first part of this thesis aimed at developing a spatialized modeling approach able to provide estimates of production (biomass, yield), CO₂ and water fluxes, as well as carbon and water budgets for croplands. To this end, the SAFYE-CO₂ agrometeorological model, which assimilates remote sensing products of vegetation index (green area index) with high spatial and temporal resolutions, was developed and applied to several crops (wheat, maize, sunflower) and intercropping vegetation (spontaneous regrowth, weeds, cover crops). This approach was validated on a network of plots located in southwest France, benefiting from a large number of satellite images and validation data collected over the Regional Spatial Observatory. Notably, it allowed to precisely estimate wheat, sunflower and maize productions, as well as CO₂ and water fluxes on wheat and sunflower. The vegetation that developed on the plot during the fallow period was also taken into account in order to improve CO₂ and water fluxes estimates. This leads to a better quantification of the cover crop impact on the carbon budget components of croplands in the study area.

The second part of this thesis aimed at developing a model assessing the radiative forcing induced by surface albedo changes following the introduction of cover crops in the crop rotations at European scale. We took advantage of coarse-resolution remotely sensed albedo products (1/20°) developed by the CNRM (and in collaboration with this laboratory) to quantify this albedo effect. Several scenarios of introduction were simulated to quantify the effect of certain factors such as rain or snow cover. They allowed to alert on the potential strong negative impact of soil darkening (due to soil organic carbon increase) induced by cover crops on cropland radiative forcing at long term.

Finally, as any change in agricultural management practices induced biogeochemical and biogeophysical effects on climate, a coupled analysis of these effects was carried out at a regional scale thanks to the combined use of these two modeling approaches. We concluded that once the cover crops are implemented, the soil should be permanently covered with vegetation so that soil darkening does not counterbalance the other climate benefits of this agricultural practice.

Remerciements

Voilà enfin venu le temps tant attendu des remerciements, synonyme de dernière étape d'une aventure humaine et professionnelle intense et surtout enrichissante.

Je tiens avant tout à exprimer ma gratitude envers toi Éric, pour m'avoir offert la possibilité de réaliser ce projet. Dès mon stage de fin d'étude, tu m'as très vite fait confiance et parce que tu as cru en moi tu as fait en sorte que je puisse continuer ces travaux de recherche que j'avais appréciés. La réussite de cette thèse n'était vraiment pas gagnée d'avance, il y a eu des hauts, des bas, des moments de doute mais finalement la bonne relation que nous avons et que tu as entretenu m'a en grande partie permis de tenir le cap, de ne rien lâcher et de finalement fournir un travail apprécié par mes pairs, donc pour cela, merci ! Je tiens également à sincèrement te remercier Rémy. Tu es arrivé dans le train un moment où le rail était en mauvais état, malgré cela tu as su remettre le tout en marche et faire en sorte qu'on passe du RER au TGV. Tu as apporté une assistance dont j'avais besoin et qui m'a énormément servi et je t'en suis très reconnaissant.

Merci également à mes collègues avec qui j'ai eu le plaisir et la chance de travailler. Ahmad merci à toi pour ton appui salvateur en début de thèse et pour l'aide que tu m'as plus d'une fois proposée de bon cœur. Merci à vous, Taeken et Ludo pour votre bonne humeur permettant de souder cette petite équipe avec bien plus que du travail !

Je voudrais aussi montrer ma reconnaissance aux institutions et aux personnes qui ont, par leur financement ou leur temps, rendu ce travail possible. Merci donc à l'ADEME et au CNES d'avoir subventionné ces travaux de thèse et plus particulièrement à Nicolas Tonnet et Cécile Vignolles (et plus tard Philippe Maisongrande) qui ont suivi ces travaux. Merci également à Nicolas Viovy et Benjamin Loubet d'avoir relu avec minutie et pertinence ce (long) manuscrit. Et enfin merci aux membres du jury pour avoir accepté de participer à mon oral et d'échanger sur mes travaux.

Merci évidemment à tous les copains/copines du labo qui ont rendu ces années plus que plaisantes et m'ont permis de m'épanouir sur le plan personnel. Une pensée va donc à la petite équipe de stagiaires CNES avec qui a commencé cette aventure au CESBIO ou plutôt autour de gueuletons dignes d'un banquet d'Asterix. Dawa aka le sheitan du 1+zez', Colette, Mathis, Saroumane, Ducobu et toute la clique. Merci aux amis sportifs, Vincent, Arnaud, Marie pour ces moments de détente salutaires. Un clin d'œil à Emilie et Sylvain pour me concurrencer sur mon temps de parole et ainsi rendre difficile le retour au travail après la pause repas. Merci également à tous les autres avec qui ça a été un plaisir de manger, échanger, rigoler : ClaireS, Bastien, Stéphane, Emma, Hoa, Wen, Laurent, etc. (ce « ect. » englobe toutes les personnes qui cherchent leur prénom). Enfin un grand merci à Tiphaine et Marine pour m'avoir épaulé ces derniers mois de thèse.

Pour ne pas déroger à la règle, le meilleur pour la fin. Merci à toi ma petite fripouille. Merci de m'avoir supporté pendant ces années où les moments de frustrations, d'énervement, de déprime etc. étaient anormalement fréquents. Merci d'avoir supporté tout ça malgré l'intérêt (je le sais) imaginaire pour mes histoires de boulot. La réussite de ce projet t'en incombe en grande partie (aussi à ma maman qui m'a mis au monde et à mon papa qui a mis sa petite graine mais ça c'est hors sujet !), bref merci à toi petit bou !

À mamie.

Sommaire

RESUME	1
ABSTRACT	2
REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE	4
ABREVIATIONS	11
INTRODUCTION GENERALE.....	14
1. Contexte.....	14
1.1. Changements climatiques.....	14
1.2. L'agriculture d'aujourd'hui	16
1.3. Les cultures intermédiaires.....	17
✓ Ce qu'il faut retenir	19
2. Etat de l'art – Impact climatique des surfaces agricoles.....	20
2.1. Effets biogéochimiques.....	21
2.1.1. Les flux de CO ₂	21
2.1.1.1. La photosynthèse	22
2.1.1.2. La respiration autotrophe	22
2.1.1.3. La respiration hétérotrophe	22
2.1.1.4. Le flux net de CO ₂	23
2.1.2. Le bilan de carbone.....	23
2.1.3. Les autres gaz à effet de serre	24
2.1.4. Modéliser les agrosystèmes	24
2.1.4.1. Historique	24
2.1.4.2. Vocations	26
2.1.4.3. Attentes actuelles.....	27
2.2. Effets biogéophysiques	28
2.2.1. Le bilan énergétique terrestre.....	28
2.2.2. Forçage radiatif induit par des changements d'albédo	29
2.2.3. Conversion en équivalent CO ₂	30
2.2.4. Modéliser l'impact d'un changement d'albédo.....	31
2.2.4.1. Effets climatiques des changements globaux d'albédo	32
2.2.4.2. Effets climatiques des changements d'albédo des surfaces agricoles	33
2.3. Effets couplés.....	34
✓ Ce qu'il faut retenir	35
3. Zone d'intérêt	36
3.1. Zone d'étude 1 : Observatoire Spatial Régional	36
3.1.1. Sites instrumentés	36
3.1.2. Campagnes spatialisées	38
3.2. Zone d'étude 2 : Europe	38
4. Données	39

4.1.	Données des sites instrumentés	39
4.1.1.	Données micro-météorologiques	40
4.1.2.	Mesures de végétation	40
4.2.	Données météorologiques spatialisées	40
4.2.1.	SAFRAN	40
4.2.2.	ERA-INTERIM et ERA-5	41
4.3.	Campagnes de mesures	41
4.4.	Données satellites	42
4.4.1.	Partie « biogéochimique »	42
4.4.2.	Partie « biogéophysique »	43
5.	Objectifs de recherche et questionnements scientifiques	44
5.1.	Estimation des composantes des bilans de C et d'eau sur grandes cultures	44
5.2.	Estimation du forçage radiatif induit par l'introduction des cultures intermédiaires	45
5.3.	Analyse couplée des effets biogéochimiques et biogéophysiques	45
✓	Ce qu'il faut retenir	46

CHAPITRE I : SIMULATION SPATIALISEE DES BILANS DE C SUR GRANDES CULTURES..... 48

1.	Pourquoi un nouveau modèle ?.....	48
2.	SAFY-CO₂ : un modèle adapté à l'estimation des flux de CO₂ et composantes des bilans C	50
3.	Résumé de l'article en français	51
4.	Estimation of daily CO₂ 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 – Published in GEODERMA	53
4.1.	Abstract	53
4.2.	Introduction	54
4.3.	Materials	55
4.3.1.	Study area	55
4.3.1.1.	Soil characteristics	56
4.3.2.	In situ data	57
4.3.2.1.	GAI, biomass and yield data	58
4.3.2.2.	Flux and meteorological measurements	58
4.3.3.	Satellite data and products	59
4.3.3.1.	Multi-satellite optical images	59
4.3.3.2.	From image reflectance to GAI estimates	60
4.4.	Methodology	61
4.4.1.	The SAFY-CO ₂ model	61
4.4.2.	Model parameterization and calibration	65
4.4.3.	From daily net ecosystem CO ₂ fluxes, NEE to the annual net ecosystem carbon budget, NECB	66
4.4.4.	Model implementation and validation strategy	67
4.5.	Results	68
4.5.1.	Evaluation of the overall model performances	68
4.5.1.1.	GAI, DAM and yield estimates	68
4.5.1.2.	Components of the net CO ₂ fluxes: daily GPP, R _{eco} and NEE	70
4.5.1.2.1.	GPP estimates	70
4.5.1.2.2.	Reco estimates	71

4.5.1.2.3.	NEE estimates	72
4.5.1.2.4.	Temporal evolution.....	72
4.5.2.	From the cumulated NEE to yearly carbon budget	76
4.5.2.1.	Analysis of the cumulated NEE dynamics.....	76
4.5.2.1.1.	Carbon budget over 8 agricultural seasons of winter wheat.....	76
4.6.	Discussion	78
4.6.1.	Performances and benefits of our approach	78
4.6.2.	Potential limitations of this approach and drawbacks for large scale application	78
4.7.	Conclusion.....	81
4.8.	Supplementary material	83
4.8.1.	Effect of diffuse radiation on the ELUE.....	83
4.8.2.	Temporal evolutions of the in-situ and simulated net CO ₂ flux components	83
4.8.3.	Comparison of the performance of several cropland ecosystem models	90
♠	Ma contribution	91
✓	Ce qu'il faut retenir	91
5.	Conclusion de l'article en français	92
6.	Extension à d'autres cultures : cas du maïs	93
6.1.	Calibration du paramètre ELUEb	93
6.2.	Définition du ratio ' <i>root-to-shoot</i> '	94
6.3.	Indentification d'un problème concernant les données de flux sur maïs.....	95
6.4.	Validation de la culture de maïs	96
✓	Ce qu'il faut retenir	99
7.	Extension à d'autres cultures : cas du tournesol.....	100
7.1.	Calibration du paramètre ELUEb	100
7.2.	Définition du ratio ' <i>root-to-shoot</i> '	101
7.3.	Validation de la culture de tournesol	102
7.3.1.	Estimations du GAI et de la biomasse	102
7.3.2.	Validation des flux de CO ₂	103
7.3.3.	Paramétrisation du tournesol.....	104
✓	Ce qu'il faut retenir	106
8.	Conclusion.....	106
CHAPITRE II : INTEGRATION D'UN MODULE DE BILAN HYDRIQUE A SAFY-CO₂....		109
1.	Pourquoi simuler les composantes du bilan d'eau.....	109
2.	La simulation des flux d'eau	111
2.1.	Généralités concernant la méthode FAO-56	111
2.2.	Description du module de bilan hydrique	112
2.3.	Nouvelle formulation de l'évaporation.....	114
3.	Résumé de l'article en Français	115
4.	Combining high-resolution remote sensing products with a crop model to estimate carbon and water budget components: Application to sunflower (published in Remote Sensing).....	117
4.1.	Abstract.....	117
4.2.	Introduction	118

4.3.	Materials	120
4.3.1.	Study area	120
4.3.2.	Flux site and experimental instrumentation	121
4.3.2.1.	Meteorological data	121
4.3.2.2.	Biomass and yield data	122
4.3.2.3.	Flux data	123
4.3.2.4.	Soil data	123
4.3.3.	Satellite data and products	124
4.3.3.1.	Multisatellite optical images	124
4.3.3.2.	From image reflectance to GAI estimates	125
4.4.	Methods	126
4.4.1.	The SAFYE-CO ₂ model	126
4.4.2.	Model parameters	128
4.4.3.	Model parametrization and calibration	128
4.4.4.	Model validation and sensitivity analysis	129
4.5.	Results	130
4.5.1.	Local assessment of the model's performances	130
4.5.2.	Large scale application	132
4.5.2.1.	Impact of soil data and of coupling with the water module on model performance	132
4.5.2.2.	Biomass and yield estimates	134
4.5.3.	C budget assessment at the landscape scale	136
4.6.	Discussion	136
4.6.1.	SAFYE-CO ₂ overall performances	137
4.6.2.	Prerequisite to compute water fluxes over wide area	138
4.6.3.	Limitations and potential improvements	138
4.7.	Conclusion	139
♠	Ma contribution	139
✓	Ce qu'il faut retenir	139
5.	Conclusion de l'article en français	140
6.	Analyse supplémentaire : cas du blé	141
6.1.	Validation des simulations de flux d'eau	141
6.2.	Comparaison entre SAFY-CO ₂ et SAFYE-CO ₂	143
✓	Ce qu'il faut retenir	145
7.	Conclusion	145

CHAPITRE III : ESTIMATION DE L'EFFET ALBEDO DES CULTURES INTERMEDIAIRES **.....149**

1.	Le pouvoir réfléchissant des cultures intermédiaires	149
2.	RFCC, un modèle de simulation des effets albédo induits par l'introduction de cultures intermédiaires dans les rotations de cultures	150
2.1.	Chaîne de traitement	150
2.2.	Estimation de l'albédo des rotations de cultures	151
2.3.	Assolement	152
2.3.1.	Adaptation de la classification ECOCLIMAP	153
2.4.	Estimation des surfaces de cultures en rotation	154
2.5.	Dynamiques et périodes de végétation	154

2.5.1.	Estimation des dates de semis et de récolte.....	155
2.5.2.	Reconstruction des dynamiques de végétation de d'albédo	155
✓	Ce qu'il faut retenir	156
3.	Résumé de l'article en français.....	157
4.	What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crop (Published in Environmental Research Letters)	158
4.1.	Abstract.....	158
4.2.	Introduction	159
4.3.	Methods and materials.....	159
4.3.1.	Approach to cover crop inclusion	160
4.3.1.1.	Location of potential areas for the inclusion of cover crops	160
4.3.1.2.	Period in which a cover crop can be grown	161
4.3.2.	Radiative forcing.....	161
4.3.2.1.	Relationship between surface albedo and TOA radiative forcing	161
4.3.2.2.	The α_{bs} , α_{veg} and veg data	162
4.3.2.3.	The α_{vegCI} , veg _{CI} data	162
4.3.2.4.	The SW _{in} and T _a data.....	163
4.3.2.5.	Conversion of radiative forcing into equivalent CO ₂	163
	Method 1 (based on a constant CO ₂ airborne fraction, AF)	163
	Method 2 (Global Warming Potential)	164
4.3.2.6.	Scenarios for introducing the cover crops	164
4.4.	Results.....	164
4.4.1.	Albedo changes.....	164
4.4.2.	The fallow period	165
4.4.3.	Albedo increase and radiative forcing	166
4.5.	Discussion and conclusion	169
♣	Ma contribution	170
✓	Ce qu'il faut retenir	171
5.	Conclusions de l'article en français.....	171
6.	Conclusion.....	174
CHAPITRE IV : IMPACTS DE L'OCCUPATION DU SOL PENDANT L'INTERCULTURE SUR LES FLUX DE CO₂, D'EAU ET SUR L'ALBEDO		176
1.	Introduction	176
2.	Impact des événements végétatifs d'interculture estivale sur les flux de CO₂	177
2.1.	Zone d'étude et méthodologie	177
2.2.	Analyse des résultats	178
2.2.1.	Flux de CO ₂ sur la rotation blé/tournesol	178
2.2.2.	Spatialisation de l'approche	180
2.3.	Perspectives.....	181
✓	Ce qu'il faut retenir	181
3.	Analyse des effets couplés	183
3.1.	Zone d'étude.....	183
3.2.	Caractéristiques d'application des modèles	184

3.2.1.	Détermination des scénarii d'introduction des CI et des dynamiques de végétation	184
3.2.2.	Variables d'intérêts simulées par les modèles	186
3.2.3.	Protocoles de simulation	187
3.3.	Analyse des résultats	188
3.3.1.	Impacts biogéochimiques des CI	188
3.3.1.1.	Composantes des bilans de C des cultures principales	188
3.3.1.2.	Impact des CI sur les flux de CO ₂	189
3.3.1.3.	Impact des CI sur les bilans de C	191
3.3.2.	Impacts biogéophysiques des CI	192
3.3.2.1.	Impact des CI sur l'évapotranspiration	192
3.3.2.2.	Impact radiatif de la durée d'introduction des CI	194
3.3.3.	Effets couplés.....	195
✓	Ce qu'il faut retenir	197
4.	Discussion et conclusion	197

CHAPITRE V : ANALYSE DES EFFETS ALBEDO A COURT ET LONG TERMES DES CULTURES INTERMEDIAIRES200

1.	Vers une meilleure compréhension de l'impact climatique des cultures intermédiaires	200
2.	Résumé de l'article en français.....	201
3.	Analysis of direct and undirect effects of cover crop on the albedo induced radiative forcing	202
3.1.	Abstract.....	202
3.2.	Introduction	203
3.3.	Materials and methods.....	204
3.3.1.	Data	204
3.3.1.1.	Climatic data.....	204
3.3.1.2.	ECOCLIMAP classification	205
3.3.1.3.	Vegetation indices and albedo products.....	205
3.3.2.	Calculation of the CC albedo effect	206
3.3.2.1.	Regions and periods of cover crop introduction	206
3.3.2.2.	Radiative forcing calculation	207
3.3.2.3.	Conversion into equivalent CO ₂	208
3.3.3.	Simulation scenarios.....	208
3.4.	Results.....	209
3.4.1.	Analysis of the results for each scenario	209
3.4.1.1.	Impact of the extension of the duration of CC introduction	209
3.4.1.2.	Impact of snow cover	211
3.4.1.3.	Impact of the soil albedo decrease	211
3.4.2.	Sensitivity analysis to the changes in soil albedo	211
2.5.	Discussion	213
2.6	Conclusion	215
♠	Ma contribution	215
✓	Ce qu'il faut retenir	215
4.	Conclusion de l'article en français	216
5.	Conclusion.....	216

CHAPITRE VI : DISCUSSION	219
1. Préambule.....	219
2. Analyse spatialisée des composantes des bilans de C et d'eau	220
2.1. Intérêts et avantages de l'approche	223
2.2. Inconvénients de l'approche proposée et voies d'améliorations possibles	223
2.2.1. Estimation des bilans de C	223
2.2.2. Introduction de nouvelles espèces	226
2.2.3. Apport de la télédétection.....	226
2.2.4. Transposabilité	227
3. Analyse de l'effet albédo des cultures intermédiaires	227
3.1. Intérêts et avantages d'une telle approche	229
3.2. Inconvénients et améliorations possibles.....	230
3.2.1. Spécificités et évolution des produits satellites	230
3.2.2. Prise en compte de la couverture neigeuse	232
3.2.3. Perspectives de simulation	232
4. Vers des analyses couplées des effets biogéochimiques et biogéophysiques	233
5. Perspectives	233
CONCLUSION GENERALE	235
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	240
LISTE DES ILLUSTRATIONS	258
Liste des figures.....	258
Liste des tableaux.....	264
ANNEXES	267
A. Analyse à l'échelle de la France	267
A.1. Modification du scénario d'introduction des CI	267
A.2. Adaptation des produits par région	267
A.3. Validation des instants de semis et de récolte.....	268
A.4. Analyse par région.....	270
✓ Ce qu'il faut retenir	272
VALORISATIONS SCIENTIFIQUES	274
Participations à des colloques	274
Publications scientifiques	274

Abréviations

α = Albédo

θ_{FC} = *Field Capacity Humidity* / Humidité à la Capacité au Champ

θ_{WP} = *Wilting Point Humidity* / Humidité au Point de Flétrissement

AF = *Airborne Fraction* / Fraction Atmosphérique

BV-NNET = *Biophysical Variables Neural Network* / Réseau de Neurones de Variables Biophysiques

DAM = *Dry Aboveground Mass* / Biomasse Aérienne Sèche

C = Carbone

CI = Cultures ou Couverts Intermédiaires

CDR = *Carbon Dioxide Removal* / Soustraction du Dioxyde de Carbone

CIPAN = Cultures Intermédiaires Pièges À Nitrates

CIMS = Cultures Intermédiaire Multi-Services

CIVE = Culture Intermédiaire à Valorisation Énergétique

ESU = *Elementary Sampling Unit* / Unité d'Échantillonnage Élémentaire

ETR = Évapotranspiration

ET₀ = Évapotranspiration de référence

FAO = *Food and Agriculture Organization* / Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GAI = *Green Area Index* / Indice de Surface Verte

GES = Gaz à Effet de Serre

GIEC = Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GPP = *Gross Primary Production* / Photosynthèse

GWP = *Global Warming Potential* / Pouvoir de Réchauffement Global

H = Flux de chaleur sensible

HSTR = *High Spatial and Temporal Resolution* / Haute Résolution Spatiale et Temporelle

ICOS = *Integrated Carbon Observation System* / Système d'Observation des Flux de CO₂

LE = Flux de chaleur latente

LCC = *Land Cover Change* / Changement d'Occupation des Sols

LMC = *Lang Management Change* / Changement de Pratiques de Gestion

MO = Matière Organique

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index* / Indice de Végétation par Différence Normalisée

NECB = *Net Ecosystem Carbon Budget* / Bilan de Carbone Net de l'Écosystème

NEE = *Net Ecosystem Exchange* / Flux net de CO₂

NEP = *Net Ecosystem Productivity* / Productivité Nette de l'Écosystème

NPP = *Net Primary Production* / Production Primaire Nette

OSR = Observatoire Spatial Régional

PAC = Politique Agricole Commune

PPM = Partie Par Million

R_a = *Autotrophic Respiration* / Respiration Autotrophe

Reco = *Ecosystem Respiration* / Respiration de l'Écosystème

RF = Forçage Radiatif

RFCC = *Radiative Forcing of Cover Crops* / Forçage Radiatif des Cultures Intermédiaires

R_{gr} = *Growth Respiration* / Respiration de Croissance

R_h = *Heterotrophic Respiration* / Respiration hétérotrophe

Rm = *Maintenance Respiration* / Respiration d'Entretien

RMQS = *French Soil Quality Measurement Network* / Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France

RU = Réserve Utile

SAFYE-CO₂ = *Simple Algorithm For Yield, Evapotranspiration and CO₂ fluxes Estimates* /
Algorithme Simple Pour l'Estimation des Rendements, de l'Évapotranspiration et des flux de CO₂

SRM = *Solar Radiation Management* / Gestion du Rayonnement Solaire

SW_{in} = *Incoming Shortwave* / Rayonnement court longueur d'onde incident

Ta = *Atmospheric Transmittance* / Transmittance Atmosphérique

TH = *Time Horizon* / Horizon Temporel

TOA = *Top-Of-Atmosphere* / Sommet de l'Atmosphère

YLD = *Yield* / Rendement

Introduction générale

Introduction générale

1. Contexte

1.1. Changements climatiques

Le prix Nobel de chimie suédois Svante Arrhenius a été le premier à faire le lien entre la concentration en CO_2 dans l'atmosphère et sa température (Arrhenius, 1897). Ces premières hypothèses ont été confirmées au cours du XX^e siècle, et prenant conscience du problème, l'organisation météorologie mondiale et le programme des nations unis pour l'environnement a créé, en 1988, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (**GIEC**, ou **IPCC** en anglais). Depuis son premier rapport paru en 1990 jusqu'au cinquième paru en 2014 (le prochain étant prévu pour 2022), le GIEC ne cesse d'affirmer avec toujours plus de certitude le lien entre activités anthropiques et réchauffement climatique. En effet, depuis le début de l'ère industrielle (~1750) les émissions cumulées de CO_2 d'origine anthropique s'élèvent à 2040 +/- 310 Gt CO_2 . Une partie de ces émissions a été captée par les puits naturels de CO_2 (océan et biosphère continentale) mais 40% de ces émissions, soit 880 +/- 35 Gt CO_2 , sont restées dans l'atmosphère. Les dernières mesures (moyenne mensuelle en janvier 2021) acquises à la station de Mauna Loa à Hawaï faisaient état d'une concentration atmosphérique en CO_2 de **414.5 ppm** (partie par million) contre 280 ppm (+/- 10) avant l'ère industrielle (IPCC 2014).

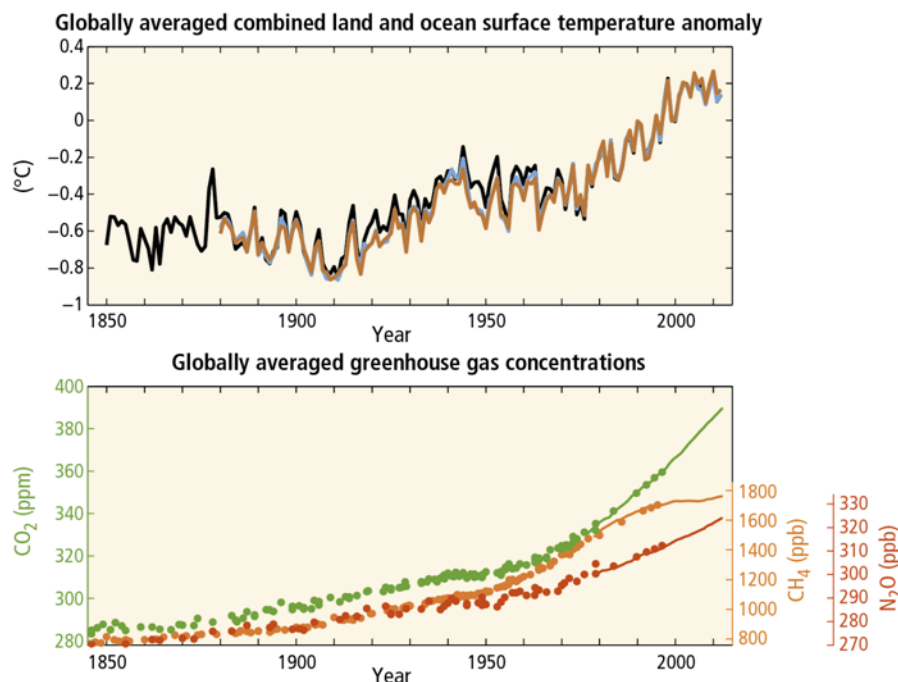


Figure 1 : Haut : anomalies de température globale depuis 1850 (les couleurs représentant des jeux de données différents). Bas : concentration globale de certains gaz à effet de serre (i.e. CO_2 , CH_4 et N_2O). Extrait du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014).

L'augmentation globale de la température est directement liée à l'augmentation des concentrations en CO_2 atmosphérique. En effet, le CO_2 , comme d'autres gaz présents dans l'atmosphère (CH_4 , N_2O , H_2O , etc.) est un gaz à effet de serre (**GES**), c'est-à-dire qu'il absorbe une partie du

rayonnement infrarouge terrestre et contribue à réchauffer l'atmosphère. Ce phénomène naturel, qui permet à la température moyenne de la Terre d'atteindre 15°C (au lieu de -18°C sans effet de serre) est perturbé depuis le début de l'ère industrielle par les émissions de GES d'origine anthropique, et il s'est largement intensifié ces dernières décennies. L'impact de cette augmentation sur la température globale n'est plus à prouver (Fig. 1). La température est une variable qui traduit le réchauffement du système terre mais ce n'est pas la seule.

Le forçage radiatif (**RF** pour '*radiative forcing*') est une métrique permettant de quantifier le changement climatique. D'après le GIEC, le RF est défini comme « *la variation du bilan énergétique terrestre liée à une perturbation imposée. Il est généralement exprimé en $W.m^{-2}$ moyenné sur une certaine période de temps et il quantifie le déséquilibre énergétique qui se produit quand la perturbation a lieu* ». Aujourd'hui, l'augmentation des gaz à effet de serre, couplée aux autres forçages d'origines anthropiques (Fig. 2), se traduit par un RF de **2.3** [1.1 – 3.3] **$W.m^{-2}$** . Ce RF se traduit lui-même par un réchauffement global de l'atmosphère de **0.85** [0.65 – 1.06] °C sur la période 1880-2012 (IPCC 2014). Or une hausse globale de la température, en plus de modifier le climat localement via l'augmentation des vagues de chaleur (Matthews et al., 2017) ou des événements extrêmes (Diffenbaugh et al., 2017), va engendrer d'importantes conséquences biologiques (Hugues, 2000) et écologiques (McCarty, 2001).

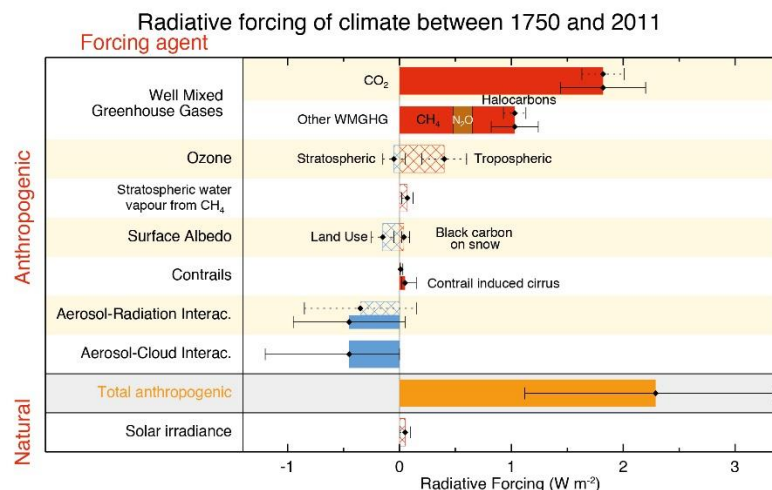


Figure 2 : Composantes du forçage radiatif observé entre 1750 et 2011, d'origines anthropiques et naturelles. Extrait du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014).

Malgré ces signaux alarmants et les accords de Paris signés lors de la **COP21** (<https://www.apc-paris.com/cop-21>), les efforts attendus par les états pour réduire leurs émissions de GES sont loin d'être atteints, et la limitation du réchauffement à 2°C d'ici la fin du siècle devient de plus en plus improbable (Peters et al., 2013). Afin de connaître la trajectoire climatique à venir, le GIEC a simulé, dans son dernier rapport, 4 scénarii appelés **RCPs** (Representative Concentration Pathways). Ces scénarii incluent un scénario 'optimiste' d'atténuation rigoureux (RCP2.6), 2 scénarii intermédiaires (RCP4.5 et RCP6.0), ainsi qu'un scénario à fortes émissions de GES (RCP8.5). Il faudrait suivre le scénario RCP2.6 pour respecter les accords de Paris et maintenir le réchauffement global sous la barre des 2°C. Or entre 2005 et 2020, le scénario dont nous sommes le plus proche (écart de moins de 1%) est le scénario **RCP8.5** (Schwalm et al., 2020). Il est donc urgent d'œuvrer plus activement à la lutte contre les changements climatiques.

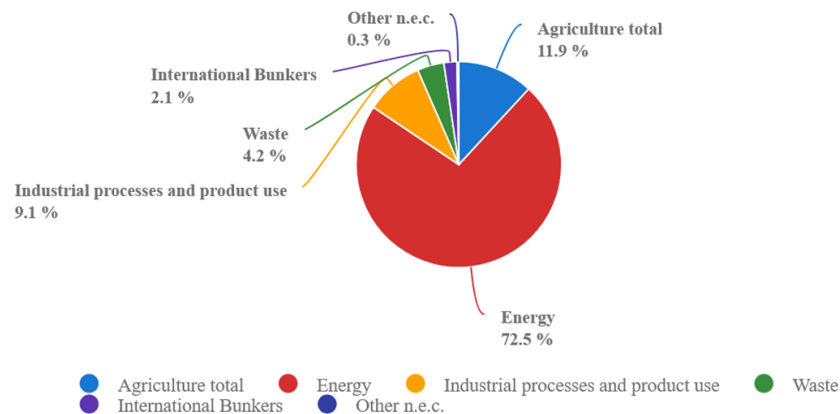


Figure 3 : Distribution des émissions totales de gaz à effet de serre par secteur. Source : FAOSTAT (2017, <http://www.fao.org/faostat/>).

L'agriculture fait partie des secteurs les plus polluants en termes d'émissions de GES. En 2017 elle représentait **11.9 %** des émissions globales de GES (source : FAO, Fig. 3). Ce chiffre ne prend toutefois pas en compte les émissions de CO₂ liées à l'appauvrissement des sols en matière organique qui a été constaté depuis plusieurs décennies (Lal, 2002). L'agriculture est donc un acteur majeur des changements climatiques, mais elle en subit aussi les conséquences (via la hausse des températures, la modification des régimes de précipitations, etc. qui impactent la production). Le monde agricole doit donc évoluer pour à la fois s'adapter aux changements à venir, mais aussi limiter son impact sur les changements climatiques. Dans ce contexte, il devient indispensable de développer des outils permettant de guider la transition du monde agricole vers des pratiques limitant l'impact de l'agriculture sur le climat et accroissant sa résilience à des événements climatiques extrêmes.

1.2. L'agriculture d'aujourd'hui

Depuis la naissance de l'agriculture, soit environ **10 000 ans** avant notre ère (Kislev et al., 2004; Pringle, 1998), nos modes de productions, méthodes de sélection des semences et capacités de production ainsi que les paysages agricoles ont profondément changé. Aujourd'hui ce n'est pas moins de **7.6 milliards** de personnes qu'il faut nourrir à travers le monde (FAO-2018). La production de céréales atteignait **2963 M de tonnes** en 2018, cultivées sur une surface de près de **728 M d'hectares**. Pour assurer de telles productions, l'agriculture se pratique aujourd'hui sur de grandes parcelles, avec souvent des rotations ou des successions de cultures. Lorsqu'une même espèce est cultivée sur une parcelle, le terme **monoculture** est employé tandis qu'on parle de **polyculture** lorsque plusieurs espèces y sont cultivées. En polyculture, les rotations sont mises en place à l'échelle de l'année culturale (une culture différente par année) ou plusieurs fois dans l'année (rotation biennale, triennale, etc.). Enfin, si un même type de rotation est répété (*e.g.* maïs, blé, maïs, blé, etc.) on parle de rotation culturale, alors qu'il s'agit de succession culturale s'il n'existe pas de répétition du schéma d'enchaînement des cultures.

Par le passé la pratique de la **jachère** était largement répandue. La jachère est une terre non cultivée temporairement pour permettre la reconstitution de la fertilité du sol¹. Au 20^{ème} siècle, les besoins alimentaires croissants ont menés à la quasi disparition de la jachère et ont favorisé le recours aux intrants (engrais, pesticides), avec une accélération de leur utilisation entre 1960 et 1990 au cours

¹ Définition Larousse

de la révolution verte². Après cette période, les aspects négatifs de l'agriculture « conventionnelle ou intensive » (i.e. exploitations très mécanisées avec emploi d'intrants et de variétés à haut rendement) se sont fait ressentir. L'utilisation massive des intrants a ainsi engendré une pollution des sols, de l'air et de l'eau, une destruction de la biodiversité et des risques sanitaires sur la santé. Ces problématiques, ainsi que l'augmentation croissante des besoins alimentaires, forcent le monde agricole à évoluer.

Le challenge auquel fait face le secteur agricole aujourd'hui est double : réussir à nourrir une population toujours plus grande tout en limitant son impact environnemental. En effet, même si des divergences existent entre démographes, certains estimant que la population mondiale cessera d'augmenter avant la fin du siècle (Lutz et al., 2001), tandis que d'autres considèrent qu'elle continuera de croître après 2100 (Gerland et al., 2014), tous s'accordent pour affirmer que nous serons plus nombreux demain qu'aujourd'hui. Par exemple, les dernières projections des Nations Unies sur le sujet³ indiquent que la population mondiale a 80% de chance de se trouver entre 9.889 et 11.998 Md d'ici à 2100. Dans le même temps, la conversion des sols (notamment des forêts) en surfaces agricoles a drastiquement diminué leur stock de matière organique. Lal, (2004) estime que la conversion d'écosystèmes naturels à agricoles engendre une diminution du carbone organique des sols de **60 à 75 %** (respectivement pour des régions tempérées et tropicales). La plupart de ce carbone se retrouvant dans l'atmosphère, la conversion de terres à des fins de production agricoles contribue à l'augmentation des concentrations de CO₂ atmosphérique.

L'agriculture telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui n'est donc pas soutenable. Outre la diminution des impacts environnementaux liés à l'agriculture conventionnelle qui sont aujourd'hui bien connus (Gray and Trigiano, 2011; Skinner et al., 1997; van der Werf and Petit, 2002), il est nécessaire de mettre en place de nouvelles pratiques, plus durables et avec un impact climatique limité. L'ensemble des pratiques répondants à ces critères sont des pratiques dites **agroécologiques**. Elles visent à maintenir les équilibres des écosystèmes, et incluent donc des diminutions d'intrants, la mise en place du non-labour, le semis direct, l'agroforesterie ou encore les cultures intermédiaires.

Ces dernières années, les recherches se sont intensifiées autour des leviers agroécologiques permettant d'enrichir les sols en matière organique (et par conséquent diminuer l'effet de serre associé au CO₂). Parmi elles, l'**initiative 4 pour 1000** (<https://www.4p1000.org/fr>, Chabbi et al., 2017; Minasny et al., 2017), lancée lors de la COP21 vise à augmenter les stocks de C des sols de 4‰ par an (soit 0,4% par an) afin de compenser l'augmentation des émissions mondiales de GES et d'assurer une sécurité alimentaire. Cette initiative a fait naître un large débat au sein de la communauté scientifique concernant sa faisabilité (Baveye et al., 2018a; Poulton et al., 2018a). Il en résulte que le plus gros potentiel d'augmentation de la matière organique des sols concerne les sols agricoles (Amelung et al., 2020; Chabbi et al., 2017a; Lal, 2016a), et qu'en France, la pratique la plus efficace est l'extension des cultures intermédiaires (Pellerin et al., 2019).

1.3. Les cultures intermédiaires

Une culture (ou couvert) intermédiaire (CI) est « *une culture implantée entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture suivante pendant une période plus ou moins longue appelée interculture. Les cultures intermédiaires sont destinées à être restituées au sol. Elles n'ont pas vocation*

² Période marquée par une généralisation de la motorisation remplaçant la traction animale par l'énergie des combustibles fossiles, une utilisation massive des pesticides et des engrais et un développement important des semences hybrides à hauts rendements

³ <https://population.un.org/wpp/Download/Probabilistic/Population/>

à être exportées de la parcelle. Elles sont implantées dans le but d'éviter de laisser le sol sans couverture végétale pendant l'interculture afin de rendre de multiples services⁴ ». Les CI sont introduites sur les périodes d'intercultures qui peuvent varier de quelques jours à presque un an. Les CI se distinguent donc des cultures principales, car elles ne sont pas exportées de la parcelle mais sont enfouies ou laissées au sol.

Historiquement les CI ont commencé à être utilisées dans les années 70-80 (Justes and Richard, 2017) comme engrais vert, puisqu'elles apportent de la matière organique fraîche riche en azote au sol (particulièrement quand elles sont composées de légumineuses). Les CI sont aussi utilisées pour leur capacité à améliorer la structuration du sol (aération grâce aux racines et protection des hydrométéores), à lutter contre l'érosion par les hydrométéores, à limiter les pertes du sol en nitrates (on parle alors de CIPAN, pour Culture Intermédiaire Piège A Nitrates), etc. Dans les années 90, l'Europe a d'ailleurs mis en place la « Directive Nitrate⁵ » qui vise à réduire la lixiviation (entraînement de nutriments dissous dans l'eau du sol) des nutriments azotés et la pollution des nappes et des cours d'eau. Parmi les mesures mises en place pour réduire cette lixiviation, on trouve donc les **CIPAN**. Celles-ci, grâce à leur système racinaire, vont absorber les nitrates contenus dans les sols des parcelles agricoles, et les conserver dans leur biomasse. Après leur destruction (avant le semis de la culture suivante), l'azote sera progressivement minéralisé et absorbé par la culture qui suit. Plus récemment, les services (et disservices) écosystémiques des CI ont été évalués (Justes et al., 2012) et leur utilisation s'est élargie pour répondre à plusieurs enjeux agro-environnementaux. On parle dans ce cas de Cultures Intermédiaires Multi-Services (**CIMS**). En plus de protéger le sol, de l'enrichir en matière organique et d'apporter de l'azote, elles peuvent également être utilisées pour lutter contre certains ravageurs, améliorer les propriétés chimiques et physiques du sol ou encore pour augmenter la biodiversité (liste exhaustive des fonctions potentielles des CI disponible dans Justes et al., (2012)). Toutefois, l'utilisation de CI peut entraîner des disservices comme la consommation de l'eau contenue dans le sol qui pourrait manquer à la culture suivante (si la CI est détruite trop tardivement par exemple), l'utilisation de surfaces agricoles dédiées à la production alimentaire pour la production des semences de CI (Runck et al., 2020), le surplus de travail et de coût pour les agriculteurs, les risques phytosanitaires lorsque les CI sont détruites avec des désherbants, etc. Notons enfin que les CI peuvent être exploitées (récoltées) pour de la valorisation énergétique (**CIVE** servant par exemple à la production d'énergie par méthanisation) ou pour nourrir du bétail (on parle alors de méteil). Les CIVES se distinguent donc des autres CI puisque ce type de cultures est exporté de la parcelle. Les CIVES ne sont donc pas considérées comme des CI puisque ces dernières sont restituées au sol au moment de leur destruction.

En complément de leurs nombreux intérêts agronomiques, les CI peuvent aussi avoir un effet bénéfique d'un point de vue de l'atténuation des changements climatiques. En effet, ils peuvent contribuer à cette atténuation via le stockage de C dans les sols et la réduction des émissions de GES, mais aussi via des effets albédo et la répartition de l'énergie en surface (effets détaillés dans les sections 2.1 et 2.2). Une étude à laquelle j'ai contribué via une méta-analyse de l'effet stockage de carbone des CIMS (Pellerin et al., 2019) s'est intéressée au potentiel de stockage de carbone dans les sols agricoles français. Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'initiative 4 pour 1000 et a montré que « *l'essentiel du potentiel de stockage additionnel se situe en sols de grandes cultures, où le stockage additionnel pourrait dépasser la cible des 4 pour 1000* ». Ceci s'explique notamment par la diminution drastique des stocks de C des sols agricoles depuis la révolution verte. Ainsi l'introduction de CI, par rapport à

⁴ <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedia/culture-intermediaire/>

⁵ <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj>

une situation de référence considérant les intercultures en sol nu, permettrait de stocker en moyenne $313 \pm 313 \text{ kg C.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$.

Cette étude a aussi évalué le stockage additionnel qu'offrirait une extension de la pratique des CIMS (au-delà de l'obligation d'implanter des CIPANs) grâce à une expertise réalisée à l'échelle du territoire français. Elle a montré que, d'après les statistiques AGRESTE 2011, 20% des parcelles en grandes cultures sont dépourvues de végétation pendant l'hiver (la plupart étant cultivées et certaines étant concernées par des CIPANs, des repousses de la culture précédente ou des cultures dérochées). Ce scénario « insertion et allongement des CI » permettrait en moyenne un stockage additionnel de $+126 \pm 93 \text{ kgC.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ soit 2.3% par an. Cette étude a aussi révélé que l'extension des CI était la pratique au plus fort pouvoir stockant avec **35%** du potentiel total.

Outre leur potentiel de **stockage de carbone**, les CI possèdent également un fort **pouvoir réfléchissant**. En effet, les végétaux réfléchissants généralement plus d'énergie lumineuse que le sol (Carrer et al., 2014), la présence d'une CI à la place d'un sol nu permet de renvoyer plus d'énergie vers l'espace et donc de réduire la température de surface.

Ce sont ces 2 effets des CI, qui contribuent à ce que l'on appellera effets **biogéochimiques** et effets **biogéophysiques**, que j'ai étudié au cours de ces travaux de thèse.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ Depuis son apparition, l'agriculture a connu d'importantes métamorphoses afin de s'adapter à nos modes de vie et surtout à la croissance démographique.
- ♣ Le monde agricole doit aujourd'hui s'adapter pour réussir à nourrir encore plus d'êtres humains tout en limitant son impact sur l'environnement et en étant plus résilient face aux évolutions du climat avec des solutions économiquement viables.
- ♣ Une culture intermédiaire est une pratique agricole initialement imposée aux agriculteurs pour limiter le problème de pollution des nappes et cours d'eau par les nitrates. Cette pratique se développe car elle offre un grand nombre de services écosystémiques.
- ♣ Mes travaux de thèse se sont intéressés à estimer l'impact climatique (bilan de C et eau et effet albédo) des surfaces agricoles en grandes cultures ainsi que celui d'un changement de pratique, *i.e.* la mise en place de cultures intermédiaires.

2. Etat de l'art – Impact climatique des surfaces agricoles

Un **agroécosystème**, comme tout écosystème, interagit avec l'atmosphère. En effet, les flux de gaz à l'interface sol/atmosphère, la modification de l'état de surface, ou encore la répartition des flux de chaleur en surface vont induire un RF net qu'il est possible de quantifier. Rappelons qu'un RF correspond à la modification du bilan énergétique liée à une perturbation. La résultante de toutes les perturbations est l'effet climatique, qui peut se décomposer en 2 types de processus : les processus biogéophysiques et biogéochimiques (Fig. 4). Les processus biogéochimiques vont concerner l'échange de composés chimiques entre 2 milieux (*e.g.* sol et atmosphère), tandis que les processus biogéophysiques englobent tous les échanges d'énergie entre 2 milieux sous forme de flux de chaleur ou de rayonnement. Afin de quantifier l'effet climatique net d'un écosystème, il est essentiel de considérer conjointement les effets biogéochimiques et biogéophysiques.

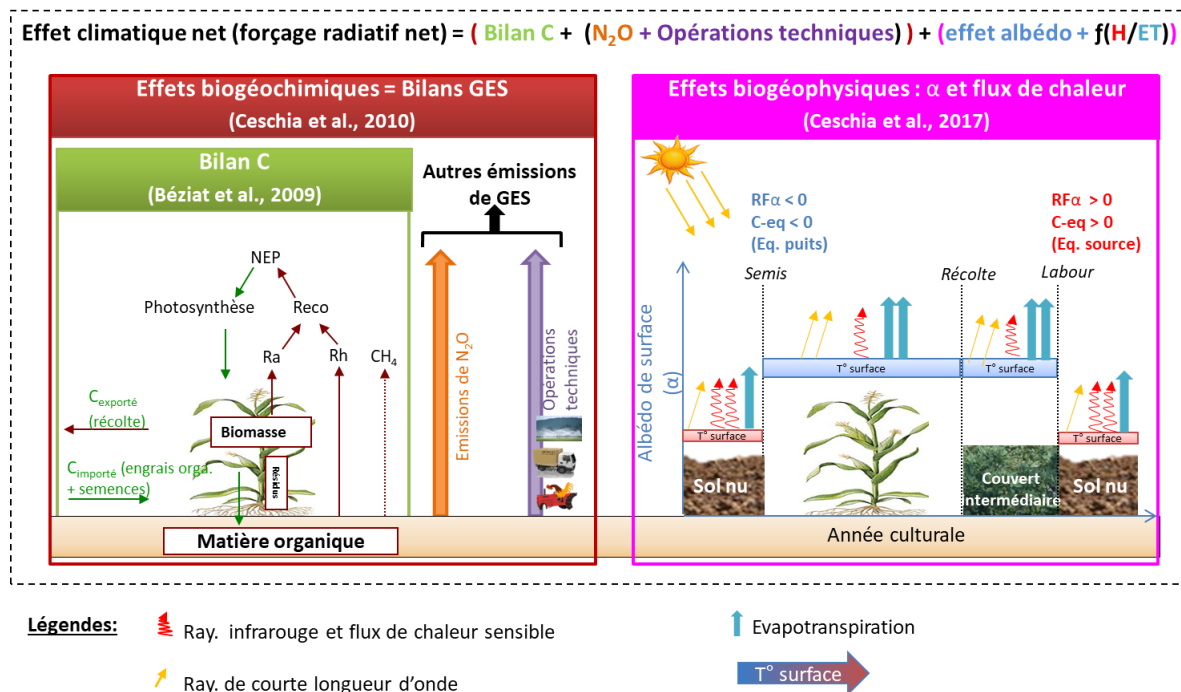


Figure 4 : Interactions des agrosystèmes avec l'atmosphère. Les effets biogéochimiques se décomposent généralement entre le bilan de C et les autres émissions de GES (cadre de gauche). Les effets biogéophysiques concernent les effets radiatifs courtes et longues longueurs d'onde et non radiatif, *i.e.* flux de chaleur (cadre de droite).

Pour cette raison, ces travaux de thèse se sont intéressés à quantifier certaines des composantes de ces 2 effets. Une première partie des travaux (chapitre I et II) s'intéresse essentiellement aux flux de CO₂ et bilans de C (effets biogéochimiques), la seconde (chapitre III et V) étant focalisée sur les effets albédo (effets biogéophysiques). Enfin, une dernière partie (chapitre IV) s'intéresse aux effets couplés bilan C et effets albédo.

Les prochaines sections vont détailler les processus biogéochimiques et biogéophysiques concernant les agrosystèmes.

2.1. Effets biogéochimiques

Lorsque l'on s'intéresse aux effets biogéochimiques d'un système et que l'on cherche à estimer le **bilan** de certain composé (*e.g.* carbone), il est d'usage de raisonner en termes de « boîte ». On considère le système (ici la parcelle ou l'exploitation agricole) comme une boîte. Selon une approche 'écosystème centré', tout ce qui sort de la boîte (du système) est compté comme négatif, à l'inverse tout ce qui rentre est compté comme positif (convention de signes). Selon une approche 'atmosphère centrée' (comme c'est le cas dans ce manuscrit) les signes sont inversés. La somme de ces flux sur une période de temps donnée permet d'obtenir la variation de la quantité étudiée à « l'intérieur de la boîte » (*i.e.* variation du stock de carbone au sein d'une parcelle).

Réaliser des bilans afin de connaître le comportement d'un système requiert soit une mesure des flux soit leur modélisation. La mesure des flux, de CO_2 et d'eau, par les méthodes des **fluctuations turbulentes** sur les agrosystèmes est bien connue (Aubinet et al., 2012a; Baldocchi, 2003a; Hollinger and Richardson, 2005; Paw U et al., 2000) mais son application est limitée à l'échelle de la parcelle. Afin d'obtenir des estimations de ces flux à de plus grandes échelles spatiales mais toujours à la même résolution (*i.e.* la parcelle), il est nécessaire de modéliser ces flux. Pour ce faire, il faut connaître les processus en jeu et pouvoir les représenter mathématiquement pour simuler leur évolution dans le temps et l'espace.

2.1.1. Les flux de CO_2

À l'interface surface/atmosphère d'une parcelle agricole, le carbone s'échange sous différentes formes : **dioxyde de carbone** (CO_2) et **méthane** (CH_4). Même si le pouvoir réchauffant du méthane est bien supérieur à celui du CO_2 (28 fois supérieur sur un horizon de 100 ans), les quantités de CO_2 émises font de ce gaz à effet de serre le plus important en termes de forçage radiatif en grandes cultures (exception faite des rizières), d'autant que les émissions de méthanes sur ces systèmes sont très faibles et généralement négatives (absorption par les sols cultivés) (Robertson et al., 2000). Ces travaux s'intéressent donc uniquement aux flux de CO_2 résumés sur la Figure 5.

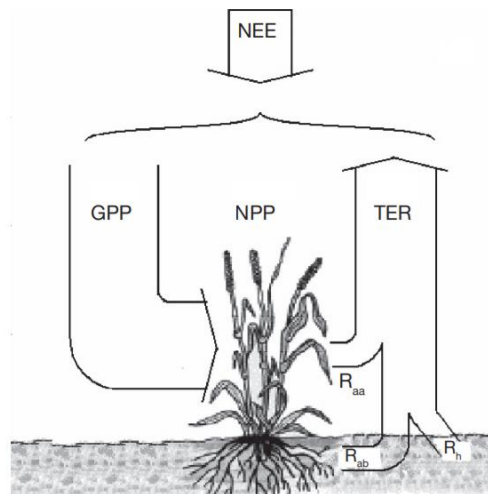
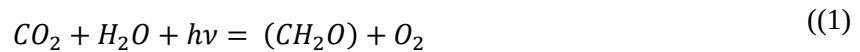


Figure 5 : Flux de CO_2 sur agroécosystème. NEE : flux net de CO_2 . GPP : photosynthèse. NPP : production primaire nette. TER : respiration totale de l'écosystème. Ra : respiration autotrophe aérienne. Rab : respiration autotrophe racinaire. Rh : respiration hétérotrophe. Extrait de Moureau et al., (2008).

2.1.1.1. La photosynthèse

La photosynthèse (**GPP** pour ‘*gross primary production*’) est le processus propre à tous les organismes autotrophes qui permet de convertir la matière inorganique en matière organique (à l’inverse des organismes hétérotrophes dont nous faisons partie). Ce processus peut être vu comme un flux de CO_2 dirigé vers la parcelle. Les plantes créent des glucides à partir de dioxyde de carbone, d’eau, de nutriments et d’énergie lumineuse [Eq. 1]. Les capacités photosynthétiques d’une plante, directement liées à l’état de la végétation, sont donc conditionnées par plusieurs facteurs : le rayonnement, la température de l’air, du sol, le contenu en eau et en nutriments du sol, l’humidité relative de l’air, etc.



Modéliser la GPP va donc reposer sur la prise en compte de ces différents facteurs. Dans l’approche proposée dans le cadre de cette thèse, une estimation précise de la GPP est cruciale car c’est à partir du carbone fixé pendant le processus de photosynthèse que vont être estimés le carbone réémis vers l’atmosphère (respiration autotrophe, voir ci-dessous), et le carbone converti en biomasse et par la suite en rendement. Une estimation précise des productions et des bilans de C implique par conséquent une estimation juste de la photosynthèse.

2.1.1.2. La respiration autotrophe

Chez les plantes, le flux de CO_2 dirigé vers l’atmosphère représente la respiration autotrophe (**Ra**). Cette respiration peut être scindée en deux composantes [Eq. 2] : la respiration d’entretien (**Rm**, pour ‘*maintenance respiration*’) et la respiration de croissance (**Rgr**, pour ‘*growth respiration*’). La Rm correspond à la respiration permettant le maintien en vie des tissus végétaux tandis que la Rgr est celle permettant la création de nouveaux tissus selon Amthor, (2000). La Ra peut aussi être décomposée entre composantes aérienne et racinaire (voir Fig. 5). La différence entre la photosynthèse et la respiration de la plante correspond à la production primaire (**NPP**, pour ‘*net primary production*’), qui correspond au carbone fixé par la plante servant à produire de la biomasse.

$$Ra = Rm + Rgr \quad (2)$$

$$NPP = GPP - Ra \quad (3)$$

2.1.1.3. La respiration hétérotrophe

La respiration hétérotrophe (**Rh**) correspond au flux de CO_2 (dirigé vers l’atmosphère) lié à la décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes et la microfaune qu’il héberge. L’intensité de ce flux, ou la vitesse de décomposition de la matière organique du sol, va dépendre en premier lieu de la température (Kätterer et al., 1998; Kirschbaum, 1995). Néanmoins, le contenu en eau du sol, ainsi que la disponibilité en substrats facilement décomposables représentent des facteurs limitants la respiration du sol (Davidson and Janssens, 2006). Le manque d’eau tout comme l’excès (milieu anaérobie) limitent donc la respiration des microorganismes du sol. Rh dépend également de la gestion des résidus de culture (Mary et al., 2020) ou d’apport d’engrais organique (Clivot et al., 2019). Cette incorporation de matière organique fraîche stimule l’activité des microorganismes et favorise ainsi la respiration du sol, phénomène connu sous le nom de ‘*priming effect*’ (Kuzyakov et al., 2000a). Aussi, la texture du sol et notamment sa proportion en argile peut impacter la Rh, en rendant la matière organique moins accessible aux microorganismes (Baldock and Skjemstad, 2000). Enfin l’impact du

travail du sol sur la respiration hétérotrophe a souvent été questionné, mais il apparaît qu'il n'a pas d'effet direct sur cette dernière (Eugster et al., 2010a).

Les informations concernant la plupart de ces facteurs sont difficilement, voire non accessibles à grande échelle. La simulation de la respiration hétérotrophe est donc complexe à réaliser à grande échelle et les estimations sont souvent associées à de fortes incertitudes (Delogu, 2013).

L'estimation de la GPP, de la Ra et de la Rh permet d'estimer le flux net de CO₂ entre une parcelle agricole et l'atmosphère.

2.1.1.4. Le flux net de CO₂

Le flux net de CO₂ (**NEE** pour '*net ecosystem exchange*'), correspond à la quantité nette de CO₂ échangée à l'interface sol/atmosphère. La NEE est la résultante des trois flux verticaux suscités (Fig. 5, et Eq. 4). La somme de la Ra et de la Rh correspond à la respiration de l'écosystème, notée **Reco** (pour '*ecosystem respiration*', Eq. 5). Ces deux termes sont souvent regroupés car ce sont les deux flux dirigés de la parcelle vers l'atmosphère.

$$NEE = GPP - Ra - Rh \quad (4)$$

$$NEE = GPP - Reco \quad (5)$$

Enfin, la NEE intégrée sur une période de temps donnée (généralement l'année culturale⁶) donne la **NEP** (pour '*net ecosystem productivity*') qui représente la quantité totale de C échangée sous forme de CO₂. Ce terme est une des composantes du bilan de carbone.

$$NEP = \int NEE dt \quad (6)$$

2.1.2. Le bilan de carbone

Le bilan de C d'une parcelle agricole (**NECB**, pour '*net ecosystem carbon budget*') représente la variation du stock de C (ΔSOC) sous forme de matière organique dans le sol entre deux dates (dans notre cas, l'année culturale). Il est fonction des échanges nets de CO₂ avec l'atmosphère et des flux latéraux de C. Les apports latéraux de C proviennent des amendements organiques (ex. fumier, compost, biochar, etc.). Les exports latéraux de C représentent essentiellement la biomasse exportée de la parcelle (grain, pailles, tubercules, etc.). Le NECB s'écrit donc comme :

$$NECB = NEP + C_{exp} - C_{inp} = \Delta SOC \quad (7)$$

Où NEP est le flux net de CO₂ échangé entre la parcelle et l'atmosphère, C_{exp} est le carbone exporté de la parcelle au moment de la récolte et C_{inp} est le carbone importé dans la parcelle sous forme d'amendements organiques. En période de sol nu, la variation du stock de C dans le sol ne dépend que de la respiration hétérotrophe (hormis les apports de C sous forme d'engrais ou les pertes de C par

⁶ Une année culturale est définie en Europe comme la période du 1^{er} Octobre au 30 Septembre de l'année suivante excepté pour les pays Nordique

érosion). Compte tenu des longues périodes de sol nu observées aujourd'hui sur les sols agricoles, il est important de correctement estimer cette variable (voir section 2.1.1.3).

Comme énoncé dans la section 1.3, les stocks de C des sols agricoles ont drastiquement chuté depuis le début de la révolution verte (Lal, 2007, 2004). Le stockage de C dans les sols agricoles appauvris constitue donc aujourd'hui un levier d'atténuation du réchauffement climatique. L'expertise nationale 4p1000 a identifié les sols en grandes cultures comme présentant le plus fort potentiel de stockage additionnel, pouvant dépasser 4‰ (Pellerin et al., 2019). Parmi les pratiques les plus stockantes, l'extension des CI représenterait 35% du potentiel total, suivi par l'agroforesterie intra-parcellaire (19%), et l'insertion et l'allongement du temps de présence des prairies temporaires (13%). C'est pourquoi ces travaux de thèse se sont intéressés à l'impact des CI sur le NECB.

2.1.3. Les autres gaz à effet de serre

Parmi les autres gaz à effets de serre à prendre en compte pour calculer les bilans de GES sur les parcelles agricoles, il faut essentiellement considérer le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O). Ce sont les 2 GES les plus importants en termes de réchauffement global après le CO_2 . Le CH_4 est essentiellement lié au processus de digestion des bovins et autres ruminants, ainsi qu'à la fermentation dans les rizières. Les émissions de N_2O sont liées aux processus de nitrification/dénitrification dans les sols agricoles. Notons également que la consommation de combustibles fossiles par les engins agricoles entraîne également des émissions de GES, essentiellement du CO_2 . Aussi, les émissions indirectes liées à la fabrication (amortie par durée d'utilisation) des engins et à leur entretien, ou à la fabrication, au transport et au stockage des engrais et des produits phytosanitaires (voir Ceschia et al., (2010) pour plus de détails) sont à prendre en compte pour calculer le bilan GES d'une parcelle agricole. Ces émissions de GES directes et indirectes liées à la gestion des parcelles ne seront pas étudiées dans cette thèse qui est principalement centrée sur les flux de CO_2 et les bilans de carbone des parcelles. En effet, ces émissions sont faibles au regard des composantes du bilan de C (Ceschia et al., 2010a; Minasny et al., 2017a) et le principal levier de réduction de l'empreinte C des parcelles agricoles est porté sur l'amélioration des bilans de C (via des changements de pratiques telles les CI).

2.1.4. Modéliser les agrosystèmes

Deux approches de modélisation ont été développées au cours de ces travaux de thèse dans le but de simuler les processus biogéochimiques et biogéophysiques sur agrosystème. Il est toutefois compliqué de regrouper tous les processus biogéochimiques dans un modèle et tous les processus biogéophysiques dans un autre. Par exemple, le modèle agrométéorologique développé dans cette thèse (SAFYE- CO_2) permet d'estimer des flux de CO_2 (effet biogéochimique) mais également des flux d'évapotranspiration (effet biogéophysique). Pourtant nous considérerons ce modèle comme un modèle traitant des effets biogéochimiques car même si une sortie du modèle est un processus biogéophysique, son fonctionnement est basé sur des processus biogéochimiques.

2.1.4.1. Historique

La modélisation agronomique est une science relativement récente. En effet, les premiers modèles datent des **années 50** (e.g. Heady, 1957) et ont été développés pour l'aide à la décision ainsi que pour étudier les retombées économiques liées à certaines politiques agricoles. Pendant la décennie suivante, des modèles de production agricole ont été développés. Ces modèles ont commencé à coupler processus biologiques et physiques. Un des pionniers de la modélisation agronomique est le hollandais **C.T. de Wit** qui donna son nom à toute une famille de modèles (Bouman et al., 1996a). Un autre personnage

important de la modélisation des agrosystèmes est le chimiste américain **W.G. Duncan** qui a été un des premiers, avec de Wit à modéliser finement le processus de photosynthèse (de Wit, 1965; Duncan et al., 1967). Par la suite, Duncan fut également un des premiers à développer des modèles spécifiques à chaque culture (Baker et al., 1972; Duncan et al., 1978). Ces premiers travaux ont largement été repris par la suite.

Suite au succès de la modélisation de la photosynthèse, les modèles de culture, spécifiques à une culture (soja, blé, coton, etc.) prolifèrent dans les années 1970 (Arkin, 1977). En 1972, la conjoncture économique américaine (envolée des prix du blé suite aux achats massifs de l'Union Soviétique) pousse les Etats-Unis à coupler l'information satellite aux modèles agronomiques afin de prédire les rendements (Wiegand et al., 1979). Ces recherches donnent naissance aux emblématiques modèles **CERES-Wheat** (Ritchie and Otter, 1984) et **CERES-Maize** (Jones et al., 1986a), encore largement utilisés aujourd'hui et contenus par la suite dans **DDSAT** (Jones et al., 2003).

Dès lors les modèles de culture se sont multipliés, et parmi les plus connus, on peut citer la suite de modèles 'GRO' ; **SOYGRO** (G. G. Wilkerson et al., 1983a) , **PNUTGRO** or **BEANGRO** (G. Hoogenboom et al., 1992), les modèles emblématiques de la famille 'de Wit' (Bouman et al., 1996a; Penning de Vries, 1989; van Ittersum, 2003) tels que **SUCROS** (Laar et al., 1997) ou **WOFOST** (Diepen et al., 1989a), le modèle dédié à l'étude de l'impact de l'érosion **EPIC** (J. R. Williams et al., 1989a) ou encore la famille de modèles **APSIM** qui font partie des plus utilisés aujourd'hui (McCown et al., 1996). Enfin, le modèle **STICS** est le modèle de culture développé par l'INRA depuis 1996. Initialement développé pour simuler le blé et le maïs ce modèle est capable de simuler une vingtaine d'espèces cultivées, et fait référence dans le domaine agronomique. Le Tableau 1, extrait de Kasampalis et al. (2018) présente les modèles agronomiques les plus connus.

Tableau 1 : Liste des modèles agronomiques les plus emblématiques et références.

Crop Model	Website to Access the Model (dd/mm/yy)
APSIM	APSIM Initiative. Available online: http://www.apsim.info (accessed on 21/03/2018)
AgrometShell	AgrometShell (AMS). Available online: http://www.hoefsloot.com/agrometshell.htm (accessed on 21/03/2018)
Aquacrop	AquaCrop. Available online: http://www.fao.org/aquacrop (accessed on 21/03/2018)
CERES-wheat	CERES Wheat 2.0. Available online: http://nowlin.css.msu.edu/wheat_book/ (accessed on 21/03/2018)
CROPGRO-Soybean	Ecobas. Available online: http://ecobas.org/www-server/rem/mdb/cropgro.html (accessed on 21/03/2018)
Cropsyst	Washington State University, CropSyst. Available online: http://modeling.bsye.wsu.edu/CS_Suite_4/CropSyst/index.html (accessed on 21/03/2018)
DAISY	International Soil Modeling Consortium i. Available online: https://soil-modeling.org/resources-links/model-portal/daisy (accessed on 21/03/2018)
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Available online: http://dssat.net/ (accessed on 21/03/2018)
EPIC	Texas A&M AgriLife Research. Available online: https://epicapex.tamu.edu/ (accessed on 21/03/2018)
FarmSim	Wageningen—Models Library—FarmSim. Available online: http://models.pps.wur.nl/node/961 (accessed on 21/03/2018)

Fasset	Farm ASSEssment Tool. Available online: http://www.fasset.dk/ (accessed on 21/03/2018)
GLAM	Institute for Climate and Atmospheric Science (ICAS). Available online: https://www.see.leeds.ac.uk/research/icas/research-themes/climate-change-and-impacts/climate-impacts/glam/ (accessed on 21/03/2018)
HERMES	zalf. Available online: http://www.zalf.de/de/forschung_lehre/software_downloads/Seiten/default.aspx (accessed on 21/03/2018)
ORYZAv3	International Rice Research Institute (IRRI). Available online: https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/about-oryza-version-3 (accessed on 21/03/2018)
STICS	INRA. Available online: http://www.inra.fr/en/Scientists-Students/Agricultural-systems/All-reports/Modelling-and-agrosystems/STICS-an-agronomy-dynamo (accessed on 21/03/2018)
SUCROS	Wageningen—Models Library—SUCROS. Available online: http://models.pps.wur.nl/node/966 (accessed on 21/03/2018)
SWAP	Soil Water Atmosphere Plant. Available online: http://www.swap.alterra.nl/ (accessed on 21/03/2018)
WOFOST	Wageningen—Models Library—WOFOST. Available online: http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-and-models/WOFOST.htm (accessed on 21/03/2018)

2.1.4.2. Vocations

Chaque modèle de culture est caractérisé par trois facteurs : son application (estimation de rendements, compréhension de processus, etc.), son type d'approche (statistique, empirique, globale, etc.) et son échelle spatio-temporelle (journée, demi-heure, etc.). Ils peuvent également être scindés en 2 grandes familles : les modèles **explicatifs** et les modèles d'**aide à la gestion** des pratiques.

Les modèles explicatifs visent à **enrichir nos connaissances** scientifiques sur les agrosystèmes ainsi que sur les interactions de ces derniers avec leur environnement. Ces modèles sont assez complexes, généralement **mécanistes** ou **semi-mécanistes**, et représentent des processus biologiques, physiologiques, physiques ou chimiques pouvant être très détaillés (Farquhar, 1980). Les échelles spatiales et temporelles de ces modèles sont fines et représentatives des phénomènes qu'ils simulent. De par leur complexité, ces modèles possèdent un grand nombre de paramètres et de variables d'entrée qui les rendent par conséquent difficilement spatialisables. En effet, certains paramètres de ces modèles sont spécifiques aux conditions dans lesquelles ils ont été obtenus (climat, sol, cultivar, etc.) et des informations concernant la gestion des parcelles (date de semis, apport d'engrais, etc.) sont aussi nécessaires mais difficilement accessibles sur de grands territoires. En outre, les temps de calcul de modèles aussi complexes seraient bien trop importants pour simuler de grands territoires (de régional à international) à l'échelle de la parcelle.

À l'inverse, les modèles d'aide à la décision sont des modèles fonctionnels, plus simples dans leur architecture et faisant intervenir beaucoup de fonctions empiriques (*i.e.* théorie d'efficacité d'utilisation de la lumière (Monteith and Moss, 1977a) ou méthode FAO-56 (Allen et al., 1998)). Ces modèles ont vocation à **assister la gestion** des parcelles en déterminant des dates clés (semis, récolte, irrigation, etc.), en évaluant les risques climatiques ou encore en identifiant les meilleurs cultivars à

semer. Cette famille de modèle peut aussi fournir des informations à destination des décideurs politiques qui ont besoin d'outil de ce type pour l'établissement de leur politique. Ils peuvent par exemple permettre de prévenir des crises alimentaires (Thornton et al., 1997) ou d'anticiper la gestion des stocks en fonction des rendements à venir (Meinke and Hammer, 1997). Les modèles agronomiques SAFY-CO₂ et SAFYE-CO₂ développés dans le cadre de cette thèse peuvent être classés dans la famille des modèles d'aide à la décision.

2.1.4.3. Attentes actuelles

Aujourd'hui il n'existe pas d'estimation précise du bilan de carbone des surfaces agricoles. Cela nécessiterait des modèles permettant de simuler les productions et les flux de CO₂ des parcelles sur de grands territoires, tout en prenant en compte la diversité des cultures et des pratiques. Or les estimations précises de ces indicateurs peuvent être obtenues par des modèles explicatifs, très détaillés d'un point de vue des formalismes et processus mais qui sont par conséquent difficilement applicables à grande échelle. Les modèles plus génériques, comme les schémas de surface des modèles globaux (**ORCHIDEE-CROP** (Wu et al., 2016), **SURFEX** (Le Moigne, 2009)), permettent de simuler des zones beaucoup plus grandes mais perdent en précision, les pratiques culturales étant peu prises en compte (*e.g.* aucun de ces modèles ne simule la présence de CI). Enfin, dans ces types de modèles, seules deux familles de cultures sont simulées, celles à métabolismes C3 et C4.

Les modèles à la frontière de ces deux familles de modélisation sont définis comme les modèles '**agrométéorologiques**' (Casadebaig et al., 2011a; Duchemin et al., 2008a; Saadi et al., 2015; Steduto et al., 2009a). En comparaison des modèles explicatifs, ils sont plus simples et établis sur des fonctions empiriques pouvant être appliquées à différentes conditions pédoclimatiques ou différents cultivars. Cette caractéristique permet de pouvoir les appliquer sur de plus grands territoires, avec des temps de calcul acceptables. Ils sont par ailleurs plus détaillés que les modèles génériques puisqu'ils ont vocation à décrire spécifiquement les agroécosystèmes avant, éventuellement, d'être couplés à des modèles de climat.

Notons ici que l'utilisation croissante de la télédétection pour la modélisation agronomique permet d'améliorer la transposabilité des modèles agrométéorologiques. En effet, l'information satellite permet de s'affranchir des données in situ et d'information sur la gestion des cultures qui représentent le principal frein à la spatialisation des modèles agronomiques. Contraindre un modèle agronomique par des observations satellites permet implicitement de prendre en compte l'effet de certaines pratiques (dates de semis, récolte, etc.) tout comme l'effet de certains stress (azoté, hydrique, etc.) sur le développement de la végétation.

L'utilisation de la télédétection dans la modélisation agronomique représente donc un réel atout pour répondre aux attentes actuelles. En effet, il existe aujourd'hui un besoin croissant de connaître l'impact climatique de l'agriculture et plus précisément des parcelles agricoles, afin de pouvoir guider la transition agroécologique dans un contexte de changement globaux. Cela signifie pouvoir évaluer, à l'échelle de la parcelle, voire en-deçà, plusieurs critères (biomasse, rendement, bilan hydrique, NECB) sur de grands territoires. Cette évaluation requiert par conséquent des modèles facilement spatialisable et applicable à l'échelle parcellaire tel SAFYE-CO₂. Les analyses multicritères fines échelles sur de grands territoires, offertes par ces outils, peuvent donc permettre de réduire les impacts environnementaux de l'agriculture, tout en tentant de quantifier les effets (multicritères) de certains changements de pratiques. Une de leur principale limite est qu'étant basés sur de l'observation satellitale, ils ne permettent pas de réaliser des analyses pronostiques.

2.2. Effets biogéophysiques

2.2.1. Le bilan énergétique terrestre

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Cette maxime attribuée à Antoine Lavoisier concerne la conservation de la matière mais elle peut tout autant s'appliquer à l'énergie. Toute celle disponible à la surface terrestre provient du soleil. La Figure 6 représente sa distribution. En moyenne la Terre reçoit 342 W.m^{-2} en haut de l'atmosphère. Ce rayonnement, avant d'atteindre la surface, doit passer par l'atmosphère. Une partie de ce rayonnement est directement renvoyée vers l'espace par les nuages, l'air et les aérosols (Fig. 6) tandis qu'une autre va interagir avec l'atmosphère via les processus d'**absorption** et de **diffusion** et va donc perdre en énergie. La diffusion, peut être de Rayleigh (couleur bleu du ciel), de Mie (impliquant essentiellement les aérosols) ou non sélective (interaction avec des grosses particules). L'absorption concerne les gaz à effet de serre, c'est-à-dire des gaz qui vont se réchauffer sous l'effet d'un rayonnement avec une longueur d'onde préférentielle. Au final, seule une partie du rayonnement dit **TOA** (pour 'top-of-atmosphere') (Fig. 6-A) va atteindre le sol. L'énergie qu'il transporte arrive en majorité sous forme de longueur d'onde visible (0.4 à $0.75 \mu\text{m}$) ou proche infrarouge (0.75 à $4 \mu\text{m}$).

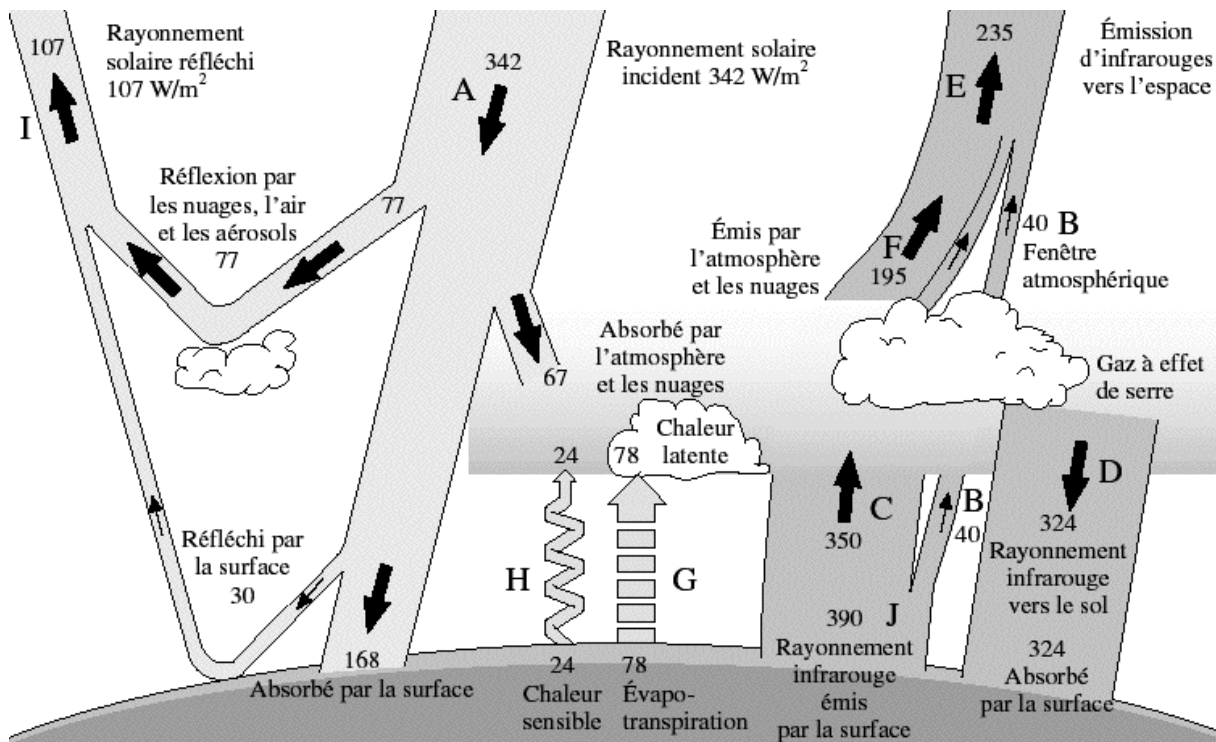


Figure 6 : Répartition et distribution de l'énergie provenant du soleil à la surface de la Terre. Les quantités sont exprimées en W.m^{-2} . Extrait de Kiehl and Trenberth, 1997.

Une partie de ce rayonnement va directement être réfléchi. La fraction d'énergie lumineuse renvoyée par une surface est définie comme l'**albédo** (α). Celui de la Terre est en moyenne de **0.29** (Stephens et al., 2015). Il varie évidemment au sein du système (l'albédo de la surface est d'environ 0.18 (Kiehl and Trenberth, 1997)) et peut varier de 0.9 pour la neige fraîche à 0.05 pour des sols très sombres) mais en moyenne la Terre renvoie directement 29% du rayonnement qu'elle reçoit du soleil. Les 71% restants sont absorbés par le système, redistribués ou réémis par la Terre. En effet, la Terre réémet une partie de l'énergie atteignant la surface sous forme de grandes longueurs d'onde

(**rayonnement infrarouge**, Fig. 6-J). Cette énergie peut aussi être utilisée pour produire des flux de **chaleur sensible** (Fig. 6-H) qui correspondent à un échange de chaleur à la frontière surface/atmosphère ou des flux de **chaleur latente** (Fig. 6-G) qui correspondent à l'évaporation ou à la transpiration (par les plantes) de l'eau ; la somme de ces deux termes correspond à l'évapotranspiration. Enfin, la Terre reçoit aussi du rayonnement infrarouge de l'atmosphère (Fig. 6-D) qui émet de l'énergie comme tout corps ayant une température supérieure à 0 K.

A partir des notations de la Figure 6, on peut écrire le **bilan radiatif** terrestre ainsi :

$$A * (1 - \alpha) + D = H + G + J \quad (8)$$

Soit,

$$R_{TOA} * (1 - \alpha) + LW_{in} = H + LE + LW_{out} \quad (9)$$

Où R_{TOA} est le rayonnement solaire incident, LW_{in} est le rayonnement grandes longueurs d'onde émis par l'atmosphère, H et LE sont respectivement les flux de chaleur sensible et latente et LW_{out} est le rayonnement grandes longueurs d'onde émis par la Terre.

Dans ces travaux de thèse nous nous sommes intéressés à l'impact climatique induit par les variations d'albédo associées à des changements de pratiques sur les surfaces en grandes cultures. En effet, il a été montré par Luyssaert et al., (2014) que les changements de pratiques avaient des effets biogéophysiques d'intensité équivalente à ceux induits par les changements d'occupation du sol. Enfin, Ferlicoq et Ceschia, (2015) ont montré que la gestion de l'albédo des surfaces cultivées offrait un potentiel significatif d'atténuation du changement climatique.

2.2.2. Forçage radiatif induit par des changements d'albédo

Un changement d'albédo va induire une perturbation du bilan énergétique terrestre. En théorie, une telle perturbation, induira une modification de tous les autres termes du bilan énergétique, de manière à retrouver un équilibre. Les interactions complexes entre les différentes composantes du système ainsi que les nombreuses rétroactions (positives ou négatives) induites, rendent difficiles l'estimation de l'évolution du système. Donc en pratique, il est d'usage de quantifier l'effet d'un changement (d'albédo dans notre cas) grâce au calcul du forçage radiatif qu'il induit en haut de l'atmosphère (RF_{TOA}) exprimé en $W.m^{-2}$. Autrement dit, on quantifie l'effet du changement d'albédo avant toute mise en place d'un nouvel équilibre par le système. Les changements qui s'opèrent au sein d'un système aussi complexe que celui de la Terre, afin de rétablir un nouvel état d'équilibre, se déroulent sur une échelle de temps allant de la décennie au siècle (notamment à cause de l'inertie thermique de l'océan).

Le forçage radiatif TOA induit par un changement d'albédo $\Delta\alpha$ pourra s'exprimer ainsi :

$$RF_{\alpha_{TOA}}(W.m^{-2}) = -\Delta\alpha * SW_{in} * T_a \quad (10)$$

Où $RF_{\alpha_{TOA}}$ est le forçage radiatif TOA induit par la modification d'albédo $\Delta\alpha$ (il est négatif et donc refroidissant si $\Delta\alpha$ est positif et inversement), SW_{in} le rayonnement incident courtes longueurs

d'ondes (entre 0.2 et 4 μm) arrivant à la surface et T_a la transmittance atmosphérique qui représente la capacité de l'atmosphère à transmettre l'énergie électromagnétique.

Ce forçage radiatif est généralement exprimé en fonction de la surface concernée par le changement d'albédo. Si l'on s'intéresse à un $RF_{\alpha_{TOA}}$ lié à un changement d'albédo des parcelles agricoles, la perturbation concernera le bilan d'énergie de ces parcelles. Si on souhaite avoir une évaluation globale de l'impact d'un changement d'albédo (local), il est nécessaire de réaliser des exercices de modélisation couplée surface-atmosphère. Aussi, pour comparer ces effets albédo induits par des changements d'états de surfaces ou de pratiques agricoles avec les effets biogéochimiques que ces derniers induisent, il est possible de convertir ce $RF_{\alpha_{TOA}}$ en équivalent CO_2 .

2.2.3. Conversion en équivalent CO_2

L'**équivalent CO_2** est une métrique initialement utilisée pour comparer l'effet des émissions des différents GES sur la base de leur pouvoir de réchauffement planétaire (**GWP** pour '*global warming potential*', e.g. à horizon 100 ans, $\text{GWP}_{\text{CO}_2} = 1$, $\text{GWP}_{\text{CH}_4} = 28$, $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}} = 265$ ⁷). L'équivalent CO_2 exprime la quantité de CO_2 qui entraînerait le même RF, intégré sur un horizon de temps donné, qu'une quantité donnée de GES ou d'un mélange de GES émis.

La plupart des gaz à effet de serre sont mélangés de la même manière dans l'atmosphère, donc une fois leur GWP pris en compte on peut aisément les comparer entre eux. Quand il s'agit de convertir un RF d'origine biogéophysique, local, en équivalent CO_2 , qui est un forçage global, cela est plus délicat.

L'effet global d'une variation d'albédo et plus précisément la nouvelle température d'équilibre moyenne atteinte par le système terre suite à un RF pourrait dépendre, en plus de sa magnitude, de sa nature ainsi que de son altitude et de sa latitude. Certaines études (Goedkoop, 2014; Joshi et al., 2003; Rebitzer et al., 2004) avancent que l'effet global d'un RF dépendrait de sa distribution spatiale. Par exemple, un RF à haute latitude serait deux fois plus efficient qu'un RF à basse latitude (de F. Forster et al., 2000; Hansen et al., 1997a) à cause des rétroactions positives sur la neige et la glace, ainsi que de la meilleure stabilité de la température à haute altitude. Le taux d'humidité de l'atmosphère, qui n'est pas constant en fonction de l'altitude, peut également expliquer des impacts différents en fonction de l'endroit où a lieu le forçage.

Il existe plusieurs méthodes pour convertir un RF en équivalent CO_2 (Bright and O'Halloran, 2019) mais les deux les plus couramment employées sont: la méthode **AF** (pour '*airborne fraction*') constant et la méthode **GWP**. La première méthode est la plus simple et comme son nom l'indique, elle est basée sur un AF constant. L'AF est la quantité de carbone émise par l'homme, qui reste dans l'atmosphère après une période de temps donnée (généralement, 20, 50 ou 100 ans). En s'appuyant sur les travaux de Betts, (2000), Bird et al., (2008) proposent l'équation 11 pour définir l'émission de CO_2 -eq (en gramme) équivalent à un changement d'albédo.

$$RF_{\text{CO}_2\text{-eq}} = \frac{A \cdot RF_{TOA} \cdot \ln 2 p\text{CO}_{2,\text{ref}} \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot m_{\text{air}}}{A_{\text{EARTH}} \cdot \Delta F_{2x} \cdot M_{\text{air}} \cdot AF} \quad (11)$$

Où A est la surface affectée par le changement d'albédo (en m^2), RF_{TOA} est le forçage radiatif induit par le changement d'albédo (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), $p\text{CO}_{2,\text{ref}}$ est la pression partielle de CO_2 de référence (383 ppmv), M_{CO_2} est la masse moléculaire du CO_2 ($44.01 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$), m_{air} est la masse de l'atmosphère

⁷ D'après le cinquième rapport d'évaluation du GIEC

(5.148×10^{15} Mg), A_{EARTH} est la surface de la Terre (5.1×10^{14} m²), ΔF_{2x} est le forçage radiatif induit par un doublement des concentrations atmosphériques de CO₂ ($+3.7 \text{ W.m}^{-2}$). M_{air} est la masse moléculaire de l'air sec (28.95 g.mol^{-1}) et AF est la quantité de carbone émise par l'homme, qui reste dans l'atmosphère après une période de temps donnée (soit 100 ans dans le cadre de cette thèse).

Cette formule permet donc d'estimer les émissions de CO₂ équivalentes à un RF induit par un changement d'albédo. Ce dernier s'exprime sur une période de temps donnée qui est définie par le AF . En effet, ce paramètre varie en fonction de l'horizon de temps (**TH** pour 'time horizon') déterminé. Il correspond à l'intégrale du cycle de carbone de Bern (Friedlingstein et al., 2006) sur une période de temps donnée (e.g. $AF_{\text{TH}=10\text{ans}} = 0.66$, $AF_{\text{TH}=100\text{ans}} = 0.48$, etc.). L'équation 12 peut être simplifiée ainsi :

$$RF_{\text{CO}_2\text{-eq}} = \frac{A \cdot RF_{\text{TOA}}}{rf_{\text{CO}_2} \cdot AF} \quad (12)$$

Où $\text{CO}_2\text{-eq}$ est exprimé en $\text{kgCO}_2\text{-eq}$, rf_{CO_2} est une constante égale à $0.908 \text{ W.kg.CO}_2^{-1}$. Si on cherche à obtenir $RF_{\text{CO}_2\text{-eq}}$ à une échelle annuelle, il suffit de diviser l'équation 12 par le TH considéré (10, 100, etc.). Cette méthode, simple d'utilisation ne prend cependant pas en compte les variations des taux d'émissions anthropiques de CO₂. Pour prendre en compte la durée de vie et le comportement du CO₂ dans l'atmosphère, on préférera la méthode « GWP ». C'est celle utilisée par l'IPCC (IPCC, 2014) et elle est définie comme:

$$GWP = \frac{\int_{t=0}^{\text{TH}} RF_{\text{TOA}}(t) dt}{k_{\text{CO}_2} \int_{t=0}^{\text{TH}} y_{\text{CO}_2}(t) dt} \quad (13)$$

Où GWP est le pouvoir de réchauffement planétaire ($\text{kgCO}_2\text{-eq.m}^{-2}$), k_{CO_2} est l'efficacité radiative du CO₂ dans l'atmosphère ($\text{W.m}^{-2}.\text{kg}^{-1}$) à une concentration constante (389 ppm (Joos et al., 2013)) et $y_{\text{CO}_2}(t)$ est la fonction de réponse impulsionnelle (**IRF** pour 'impulse-response function') du CO₂.

2.2.4. Modéliser l'impact d'un changement d'albédo

L'albédo est un paramètre central du bilan énergétique terrestre. Pourtant, l'effet de l'homme sur l'albédo planétaire de surface était considéré comme faible encore récemment, voire omis. Otterman, (1977) indique cependant que l'augmentation de l'albédo planétaire depuis 6000 ans est de l'ordre de 0.013, soit près de 10%. Gouvernant la quantité d'énergie solaire restant dans le système Terre, il a le pouvoir de réchauffer ou refroidir directement le climat. Les changements d'occupation et d'usages des sols (notamment les changements de pratiques agricoles), qui se sont accélérés et accentués depuis le début de l'ère industrielle entraînent des modifications d'albédo de surfaces. Ces changements, qui concernent de grandes zones, entraînent des forçages radiatifs qu'il est nécessaire d'estimer afin de comprendre et d'anticiper l'évolution du climat et d'identifier des leviers d'atténuation. Concernant les agrosystèmes, les changements de pratiques entraînent également des modifications d'albédo de surface. Au niveau local ces modifications de pratiques et d'albédo vont également avoir un impact sur la répartition des flux d'énergie en surface (e.g. rapport H/LE^8) et donc sur le climat environnant (modifications temporaires de l'hygrométrie, et de la température de surface (Davin et al., 2014; Luyssaert et al., 2014)). À une plus grande échelle et parce que ces changements peuvent concerner de grandes surfaces, c'est tout le système qui va être modifié pour s'adapter à ces changements (Otterman,

⁸ Rapport de Bowen

1977). Cela se traduit in fine par un **changement de température global**. Les sections suivantes se penchent sur les études qui se sont intéressées à simuler l'impact d'un changement d'albédo, au niveau global, puis seulement sur les agrosystèmes.

2.2.4.1. Effets climatiques des changements globaux d'albédo

Depuis le début de l'anthropocène l'homme a modifié le paysage. Ces modifications, se sont accélérées depuis le début de l'ère industrielle. Le principal changement d'**occupation des sols** concerne la conversion des forêts en surfaces agricoles. Ce changement induit généralement une augmentation d'albédo de surface, et donc un $RF\alpha_{TOA}$ négatif (refroidissant). Cette augmentation d'albédo est d'autant plus grande que la surface est enneigée pendant une partie de l'année. En effet, la neige (caractérisée par un albédo élevé) n'est que rarement couvrante sur une forêt tandis qu'elle l'est aisément sur des sols agricoles (ou des toundras, voir Betts, 2000).

Plusieurs auteurs ont tenté d'estimer le $RF\alpha_{TOA}$ lié aux changements d'occupation des sols. Betts et al., (2007) ont quantifié le $RF\alpha_{TOA}$ lié aux changements d'occupation des sols afin de pouvoir les comparer aux RF_{TOA} induit par les émissions de GES et les aérosols. Ils ont montré qu'à l'échelle globale, le processus biogéophysique prévalant sur l'évolution de la température de surface est une augmentation d'albédo liée à la déforestation. L'estimation du $RF\alpha_{TOA}$ depuis l'époque préindustrielle (*i.e.* 1750) est de -0.24 W.m^{-2} . Hansen et al., (1997a) proposent une estimation plus haute de ce $RF\alpha_{TOA}$ à -0.4 W.m^{-2} , tandis que Govindasamy et al., (2001) le considèrent plus faible : -0.08 W.m^{-2} . Davin et al., (2007) ont proposé une estimation dans la même gamme de valeur, avec un $RF\alpha_{TOA}$ évalué à -0.22 W.m^{-2} sur la période la période 1860-1992. Enfin dans leur dernier rapport, l'IPCC estime un $RF\alpha_{TOA}$ induit par le changement d'albédo entre l'état de végétation entièrement naturelle (avant l'influence de l'homme) et l'année 1992 à -0.2 W.m^{-2} .

Dans leur étude Hansen et al., (1997a) ont montré l'importance de la prise en compte de la **localisation** du $RF\alpha_{TOA}$ pour pouvoir le comparer à d'autres forçages (*i.e.* induits par des GES). En effet, ils précisent que tous les forçages ne sont pas équivalents et qu'un forçage induit par un changement d'albédo aux latitudes moyennes devrait être deux fois moins efficace qu'un forçage induit par des émissions de GES aux mêmes latitudes.

D'autres études se sont penchées sur des cas plus précis. Par exemple, Akbari et al., (2009) ont réalisé une étude dans laquelle ils ont estimé l'impact climatique de la modification de l'albédo des villes. Ils ont estimé, à l'échelle globale, que si les toits des bâtiments ainsi que les surfaces pavées étaient peints en blanc cela entraînerait un $RF\alpha_{TOA}$ refroidissant équivalent à 44 [30-100] $\text{GtCO}_2\text{-eq}$. On peut aussi citer l'étude de Zhai et al., (2014) qui s'est intéressée au $RF\alpha_{TOA}$ induit par le changement d'occupation des sols en Chine entre 1990 et 2010. Ils ont montré que sur cette période il y a eu, entre autres, une diminution importante des surfaces en prairie et en forêt (respectivement -5.32 et $-0.85 \cdot 10^4 \text{ km}^2$) et une forte augmentation des surfaces urbanisées et agricoles (respectivement $+5.52$ et $+1.82 \cdot 10^4 \text{ km}^2$). D'après les auteurs, ces changements d'occupation des sols ont entraîné une diminution d'albédo de 0.00042 en moyenne sur la période 1990-2010 et à l'échelle de la Chine. Ce changement d'albédo se traduirait par un $RF\alpha_{TOA}$ de 0.062 W.m^{-2} .

Toutes ces études permettent d'avoir des estimations précises du forçage induit par les changements d'occupation des sols et ainsi de mieux comprendre et représenter le système Terre. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés non pas à des changements d'albédo globaux mais localisés sur grandes cultures.

2.2.4.2. Effets climatiques des changements d'albédo des surfaces agricoles

Les études qui s'intéressent aux changements d'albédo sur parcelles agricoles indiquent que ces variations sont soit dues à un changement de pratique, soit provoquées intentionnellement. Ce dernier cas de figure concerne la « **biogéoingénierie** », une famille de technique de **géoingénierie**. La géoingénierie est un « *terme qui se rapporte à un vaste ensemble de méthodes et de techniques visant à modifier délibérément le système climatique pour lutter contre les effets du changement climatique*⁹ ». La biogéoingénierie consiste par exemple à augmenter l'albédo des cultures en choisissant des espèces au fort pouvoir réfléchissant. Ridgwell et al., (2009) proposent par exemple une méthode de biogéoingénierie en partant du principe que les grandes cultures ont une influence forte sur le bilan énergétique terrestre compte tenu de leur pouvoir réfléchissant souvent supérieur au sol nu et à la végétation naturelle. Les auteurs estiment qu'en choisissant judicieusement les variétés cultivées (morphologie, réflectance des feuilles) de façon à augmenter l'albédo des cultures de 20%, une diminution de la température de surface de 1°C pourrait être observée en périodes estivales dans toute la zone allant de l'Amérique du nord à l'Eurasie. Ils ont également simulé plusieurs scénarii ; augmentation d'albédo de 0.02, 0.04 et 0.08 sur plante C3 et C4. Pour le scénario d'augmentation de 0.04, ils ont estimé une diminution globale de la température de surface de $0.11 \pm 0.091^\circ\text{C}$.

Davin et al., (2014) se sont intéressés au forçage lié au changement d'albédo induit par un arrêt du labour (et un maintien des pailles en surface) ainsi qu'à l'effet du paillage sur les flux de chaleurs latente et sensible. Ils ont montré qu'en comparaison à une pratique conventionnelle (labour), le non labour augmente l'albédo des parcelles d'approximativement 0.1 (les pailles étant plus réfléchissantes que le sol en général). D'après leur étude, cette augmentation pourrait même être supérieure compte tenu de l'albédo de référence élevé du sol nu après labour (~ 0.2) qu'ils ont considéré. En effet, l'albédo de sol nu peut aisément être inférieur à 0.1, étant également impacté par le contenu en matière organique et en eau du sol qui tend à le diminuer. Les auteurs ont estimé que le passage au non labour sur toute l'Europe pourrait entraîner un effet refroidissant local allant jusqu'à 2°C les jours estivaux les plus chauds. Ils ont également montré que ce changement de pratique pourrait augmenter le contenu en eau du sol (horizon 0 - 60 cm) de 20%, mais aussi diminuer les flux de chaleur latente (i.e. effet mulch) entraînant un réchauffement pouvant contrebalancer en grande partie l'effet refroidissant lié au changement d'albédo. Par ailleurs les auteurs arguent que l'augmentation d'albédo liée au passage au non labour est substantiellement plus grand que celui pouvant être atteint par la biogéoingénierie des feuilles des cultures (comme le proposent Ridgwell et al., (2009)). En effet, en considérant un scénario réaliste, Singarayer et Davies-Barnard, (2012) considèrent que le potentiel d'augmentation de l'albédo des surfaces agricoles par le choix des espèces se situerait entre 0.04 à 0.1. Quoi qu'il en soit, il y a un intérêt croissant pour les méthodes de gestion de l'albédo des parcelles agricoles, qui apparaît de plus en plus comme la méthode SRM (pour '*solar radiation management*') la plus efficace et la plus réaliste pour lutter contre le réchauffement climatique (Bright, 2015; Davin et al., 2014; Genesio et al., 2020; Hirsch et al., 2017; Ridgwell et al., 2009).

Il existe donc dans la littérature scientifique nombre d'articles s'intéressant aux effets biogéochimiques ou biogéophysiques d'un changement de pratiques. Mais il existe encore peu d'études considérant conjointement les effets biogéochimiques ET les effets biogéophysiques.

⁹ Définition IPCC

2.3. Effets couplés

Historiquement les études portant sur l'analyse des agrosystèmes sont surtout des travaux en lien avec le bilan de C (Hollinger et al., 2005; Nishimura et al., 2008; Smith, 2004; Smith et al., 2010; Wang et al., 2015). Plus récemment, des études se sont penchées sur les effets biogéophysiques et notamment albédo (Akbari et al., 2009; Davin et al., 2014; Luyssaert et al., 2014), parfois en lien avec des effets biogéochimiques mais appliquées dans un premier temps sur des forêts (Betts et al., 2007; O'Halloran et al., 2012; Rotenberg et Yakir, 2010). Ce n'est que récemment que les premières études appliquées aux cultures ont émergées, incluant les travaux de thèse de Morgan Ferlicoq (2015) ainsi que d'autres travaux très récents (Ceschia et al., 2017; Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a).

Les processus biogéophysiques et biogéochimiques vont être impactés suite à des changements d'états de surface. Ces changements sont induits soit par des changements d'occupation du sol (**LCC** pour '*land cover changes*') soit par des changements de pratiques de gestion (**LMC** pour '*land management changes*'). Concernant les LCC (*i.e.* déforestation pour l'agriculture), les changements biogéophysiques et biogéochimiques sur le climat de surface ont été assez largement étudiés depuis de nombreuses années (Beringer et al., 2005; Bonan, 2008; da Rocha et al., 2009; Mahmood et al., 2014; Pielke, 1998; Pielke et al., 2011). En revanche, hormis l'effet de l'irrigation (Bonfils and Lobell, 2007; Boucher et al., 2004), l'impact climatique des LMC reste assez mal documenté. Or Luyssaert et al., (2014) indiquent que 42 à 58% des terres sont gérées par l'homme et que l'effet sur les températures de surface résultant de LCC ou de LMC sont de mêmes amplitudes. Aussi, l'accroissement démographique va probablement induire de nouveaux LCC et LMC sur des zones encore peu ou pas concernées par des changements pour pouvoir répondre aux besoins alimentaires mondiaux. Des études sont donc nécessaires pour avoir une connaissance précise de l'impact climatique des changements de pratiques qui vont s'accroître dans les années et décennies à venir. Les études traitant de ces thématiques sont encore peu nombreuses. Dans ce contexte, les références suivantes offrent des axes de réflexion intéressants.

Doughty et al., (2011) ont montré qu'une augmentation d'albédo des zones agricoles entraînerait un refroidissement plus important dans les régions aux hautes latitudes (>30%). La diminution d'énergie absorbée par les plantes et ensuite réémise sous forme de flux de chaleur latente et sensible ne se fait pas de la même manière en fonction de la latitude. Aux hautes latitudes, une diminution de l'énergie absorbée se traduirait plutôt par une diminution des flux de chaleur sensible. Aux basses latitudes ce serait les flux de chaleur latente qui diminueraient, entraînant une diminution de la nébulosité permettant à plus de rayonnement solaire d'atteindre le sol, ce qui induirait au final une augmentation de l'énergie absorbée par la surface. Cela montre une fois de plus l'importance des analyses couplées surface atmosphère, afin de prendre en compte les phénomènes de rétroaction.

Cherubini et al. (2012) ont réalisé une étude concernant l'impact climatique de biomasses à vocation énergétique (bois, eucalyptus, saule) sur les concentrations atmosphériques en CO₂ ainsi que sur le bilan radiatif, impacté par les changements d'albédo. Les auteurs indiquent que les processus biogéochimiques induisent un effet global (lié au mélange des GES dans l'atmosphère) tandis que les effets biogéophysiques, notamment les effets albédos ont un effet plus local. Ils insistent donc sur l'importance en situation d'analyse couplée, de considérer des échelles spatiales et temporelles en lien avec l'horizon de temps.

Enfin, quelques travaux existent sur les effets biogéophysiques et biogéochimiques liés à l'introduction de CI. Les premières études sur le sujet ont été réalisées via des analyses de données in situ à l'échelle parcellaire dans le cadre de la thèse de Morgan Ferlicoq (2016). Ces travaux ont démontré

le potentiel de la gestion d'albédo des cultures comme levier de limitation de l'impact de l'agriculture sur le climat. Plus récemment, Ceschia et al., (2017) ont montré que les effets biogéochimiques et biogéophysiques induits par l'introduction de CI rentraient en synergie et qu'il fallait donc systématiquement prendre en compte ces deux aspects, afin de quantifier précisément le potentiel que peuvent représenter les CI (ou d'autres pratiques) dans l'atténuation du réchauffement global.

Kaye and Quemada, (2017) ont aussi réalisé une analyse, à l'échelle parcellaire, des effets albédo et biogéochimiques (bilans C et GES) des CI. Ils estiment le forçage induit par le changement d'albédo égal à $12 - 46 \text{ gCO}_2.\text{m}^{-2}.\text{yr}^{-1}$ et par les flux de GES à $\sim 100 - 150 \text{ gCO}_2.\text{m}^{-2}.\text{yr}^{-1}$. Ils pointent notamment l'importance de la prise en compte de la neige qui peut venir contrebalancer l'effet albédo refroidissant des CI. En effet, la présence d'un couvert végétal au-dessus d'un manteau neigeux, va faire diminuer l'albédo puisque celui de la neige est élevé (~ 0.65). Plus récemment, Lugato et al., (2020) ont réalisé une étude à l'échelle Européenne dans laquelle ils ont estimé le RF_α induit par les CI, ainsi que leur effets sur le stockage de C dans les sols et les émissions de N_2O . Ils confirment notamment les conclusions de Kaye and Quemada, (2017) en montrant que la prise en compte de la neige (par rapport à une approche 'snow-free') ferait perdre 77% de l'effet albédo. Néanmoins la prise en compte de la neige dans leur approche tend à surestimer son impact sur l'albédo de surface.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♠ Les processus biogéochimiques concernent les échanges de composés chimiques tandis que les processus biogéophysiques sont relatifs aux échanges d'énergie.
- ♠ Toute modification d'un état de surface va avoir des répercussions sur les processus biogéochimiques et biogéophysiques.
- ♠ Il est primordial de prendre en compte ces deux aspects pour avoir une estimation complète de l'impact climatique lié à une modification de surface.
- ♠ Peu d'études se sont intéressées aux effets couplés biogéochimiques et biogéophysiques d'un changement de pratique sur les parcelles agricoles.

3. Zone d'intérêt

Ces travaux de thèse s'appuient sur deux approches de modélisation, appliquées à des échelles spatiales et temporelles différentes. Les chapitres I et II de la thèse, qui s'intéressent aux effets biogéochimiques, représentent la plus grande partie du travail. L'approche de modélisation est limitée au Sud-Ouest de la France et couvre 12 ans. Les chapitres III et V, qui traitent des effets biogéophysiques concerne une zone bien plus grande puisqu'elle est appliquée à l'échelle Européenne et s'intéresse à une période temporelle pouvant aller jusqu'à 100 ans. Enfin le chapitre IV s'intéresse aux approches couplées et son application est également limitée au Sud-Ouest de la France.

3.1. Zone d'étude 1 : Observatoire Spatial Régional

Le travail de modélisation agronomique (biomasse, rendement) et biogéochimique (flux d'eau et de CO₂, bilans eau et C) a été réalisé sur la zone de l'**Observatoire Spatial Régional** – Sud-Ouest (OSR-SO). L'OSR-SO, créé en 2002 et piloté par le CESBIO (<https://osr.cesbio.cnrs.fr/>), a pour objectif d'étudier et de modéliser le fonctionnement des surfaces continentales sous pressions climatique et anthropique. Cette zone d'étude jouit d'un grand nombre d'observations satellites et in situ. Elle est historiquement centrée sur une emprise SPOT (Fig. 7) qui s'étend sur environ 2500 km² et 3 départements (Haute-Garonne, Gers et Ariège). Le climat est tempéré et modulé par des influences atlantiques et méditerranéennes. Les printemps sont pluvieux tandis que les étés sont plutôt secs. La température peut aisément dépasser les 35°C pendant les mois de Juillet et d'Août.

La morphologie de la zone d'étude a été formée par la Garonne. Traversant l'OSR du sud au nord, la Garonne a répandu ses sédiments sur sa partie ouest formant ainsi de vastes terrasses composées de sols hétérogènes de type boulbènes et terrefort. Ces sols sont peu perméables et composés de couches de limons d'épaisseur variable sur des sols argileux caillouteux. Plusieurs affluents de la Garonne ont aussi dessiné le paysage (la Save, la Neste, le Gers, etc.) formant ainsi des côteaux. Plus à l'ouest, le paysage est caractérisé par les coteaux de Gascogne faits de dépôts molassiques datant de l'ère tertiaire.

L'agriculture de la zone OSR-SO est essentiellement orientée sur les grandes cultures, avec très peu de fermes d'élevage. Les rotations de cultures les plus fréquemment observées sont la rotation blé / tournesol sur les zones de côteaux, et les rotations blé / maïs / tournesol sur les terrasses. Concernant les CI, elles ne sont mises en place dans la zone d'étude que depuis peu de temps (2015), mais cette pratique s'est intensifiée ces dernières années (surtout à partir de 2017).

Au sein de cette zone se trouvent deux sites instrumentés : **Lamasquère** et **Auradé**. Ces deux sites appartiennent au réseau d'observation ICOS¹⁰.

3.1.1. Sites instrumentés

Les sites d'Auradé et de Lamasquère ne sont séparés que de 12 km (Fig. 7) ce qui leur confère des caractéristiques climatiques similaires. En revanche ces sites se distinguent par leur gestion ainsi que leurs conditions pédologiques. Ces caractéristiques ainsi que les conditions climatiques des deux sites sont résumées dans le Tableau 2. La parcelle d'Auradé dépend d'une ferme céréalière où sont cultivés le blé, le colza et le tournesol. Seul le grain est exporté de la parcelle à la récolte, et le sol reçoit seulement de l'engrais minéral. La parcelle de Lamasquère appartient à une ferme de production laitière,

¹⁰ <https://www.icos-cp.eu/>

et est caractérisée par une rotation blé / maïs ensilage. C'est la ferme expérimentale de l'Ecole d'Ingénieur de Purpan. Voir Béziat et al., (2009) pour plus d'information. Durant les périodes d'intercultures, à Lamasquère comme à Auradé, différents types de végétation ont été observés (CI, repousses de la culture précédente, adventices ; voir Tableau 2).

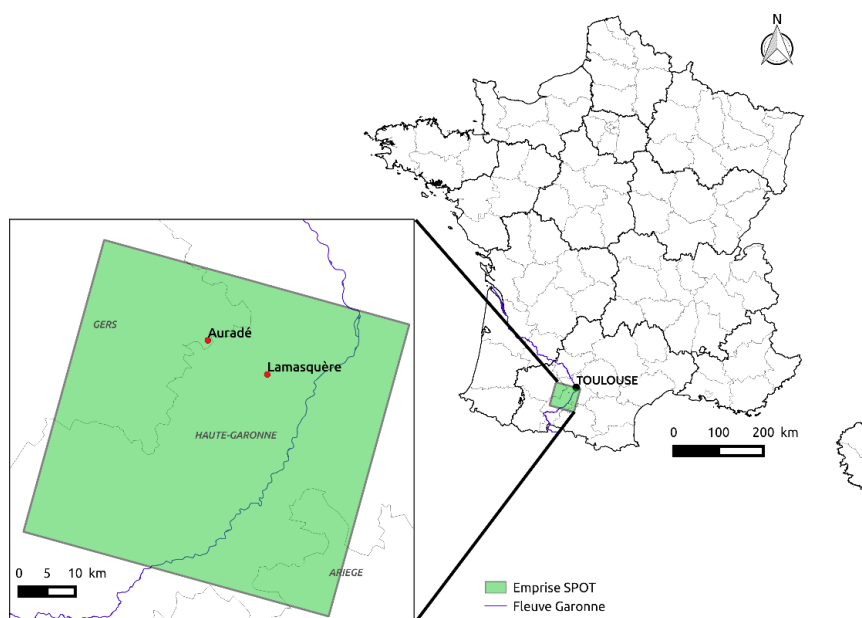


Figure 7 : Localisation des sites instrumentés d'Auradé et Lamasquère en France. Le carré vert représente l'emprise du satellite SPOT (2001-2012).

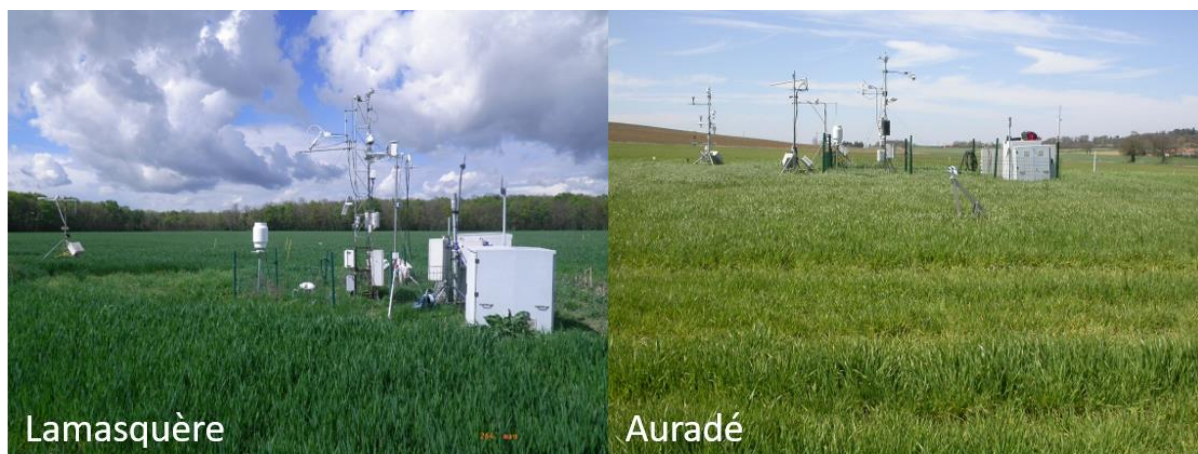


Figure 8 : Dispositifs instrumentaux de Lamasquère et d'Auradé.

Au sein de ces deux parcelles, sont acquis, de manière continue depuis 2005, des mesures météorologiques (*e.g.* température, rayonnement, etc.) et micro-météorologiques (Fig. 8). Elles sont effectuées au centre de chaque parcelle sur des mâts situés à l'intérieur ou à proximité d'un enclos qui abrite les différents dispositifs de mesures. Les flux d'énergie, d'eau et de CO₂ sont mesurés par la méthode des fluctuations turbulentes (ou '*eddy-covariance*' en anglais). Ce dispositif comporte un anémomètre sonique 3D (CSAT3, Campbell scientific inc, logan, UT, USA) ainsi qu'un analyseur de gaz LICOR-7500. Ces deux instruments permettent de mesurer les fluctuations turbulentes de CO₂ et d'H₂O à 20Hz, et de calculer les flux de ces deux gaz à un pas de temps semi-horaire (Aubinet et al., 1999a; Baldocchi, 2003a; Béziat et al., 2009a; Moncrieff et al., 1997a). Le logiciel EdiRe (Robert

Clement, © 1999, University of Edinburgh, UK) a été utilisé pour traiter ces flux. Le post processing (vérification de la qualité des données, analyse de footprint, filtrage, gapfilling, partition des flux de CO₂ en GPP et Reco, partition des flux d'évapotranspiration en évaporation, E, et en transpiration, TR) est réalisé via la chaîne de traitement développée dans le cadre de la thèse de Pierre Béziat (2009).

Tableau 2 : Principales caractéristiques des sites instrumentés d'Auradé et de Lamasquère.

		Auradé (32)	Lamasquère (31)
Caractéristiques	Coordonnées	43°32'59"N 01°06'22"E	43°29'47"N 01°14'16"E
	Surface [ha]	22.2	24.3
	Altitude [m]	245	180
	Pente [%]	2	0
Moyennes climatiques annuelles (2005-2016)	Température [°C]	13.1	13.4
	Précipitation [mm]	618.6	665.8
Sol	Type	Luvisol (coteaux)	Luvisol sur alluvions (plaine)
	Texture	Argile limoneux	Argile
	%sable / %limon / %argile	20.6 / 47.1 / 32.3	12.0 / 33.7 / 53.4
Gestion	Filière	Ferme céréalière	Production laitière
	Fertilisation	Minérale	Minérale et organique
	Irrigation	Non	Oui (maïs)
	Rotation	Blé – Colza – Blé – Tournesol	Blé – Maïs ensilage
	Export	Grain	Grain et pailles
Végétation interculture	Repousses	-	2010/2011
	Adventices	-	2008/2009
	Culture intermédiaire	-	2012-2013
	Mélange	2006/2007	-

En plus des mesures météorologiques et de flux, un grand nombre de mesures permettant de caractériser les propriétés de sol (texture, teneur en N et matière organique etc.), les dynamiques d'humidité du sol, de végétation (indice foliaire, surface verte totale, répartition de la biomasse aérienne, rendement, stades phénologiques, etc.) sont réalisées en routine, et les itinéraires techniques sont relevés chaque année. Toutes les mesures utilisées dans ces travaux de thèse sont détaillées dans la section 4.

3.1.2. Campagnes spatialisées

Ces travaux se sont également appuyés sur un grand nombre de jeux de données acquis lors de campagnes de mesures (voir 4.3). Ces campagnes consistent généralement à réaliser des prélèvements de végétations ou de sol pour caractériser finement les phénomènes étudiés (développement de la végétation, propriété de sol, etc.). Ces données, localisées la plupart du temps sur une ou plusieurs parcelles et collectées lors d'une année culturale, sont primordiales pour valider les approches développées avec précision.

3.2. Zone d'étude 2 : Europe

Le travail de modélisation biogéophysique (effet albédo) a été réalisé à l'aide du modèle **RFCC** (pour '*Radiative Forcing of Cover Crops*') à une bien plus grande échelle : celle de l'Europe. Ce choix a été motivé par le souhait d'obtenir une estimation de l'impact radiatif lié à l'introduction à large échelle des CI dans les rotations de cultures. La zone d'étude (Fig. 9) concerne donc les 28 pays membres de l'Union Européenne (le Royaume-Uni y étant toujours inclus) ainsi que la Suisse et la Norvège.

La période sur laquelle nous avons travaillé correspond à 10 ans d'observation : 2001-2010. Mais des scénarii d'introduction de 100 ans ont pu être simulés à partir de ces données. Ces travaux ont nécessité plusieurs types de données incluant : des données d'occupation du sol, des données satellitaires, des données météorologiques ainsi que des données de statistiques agricoles qui seront détaillées dans les sections suivantes.

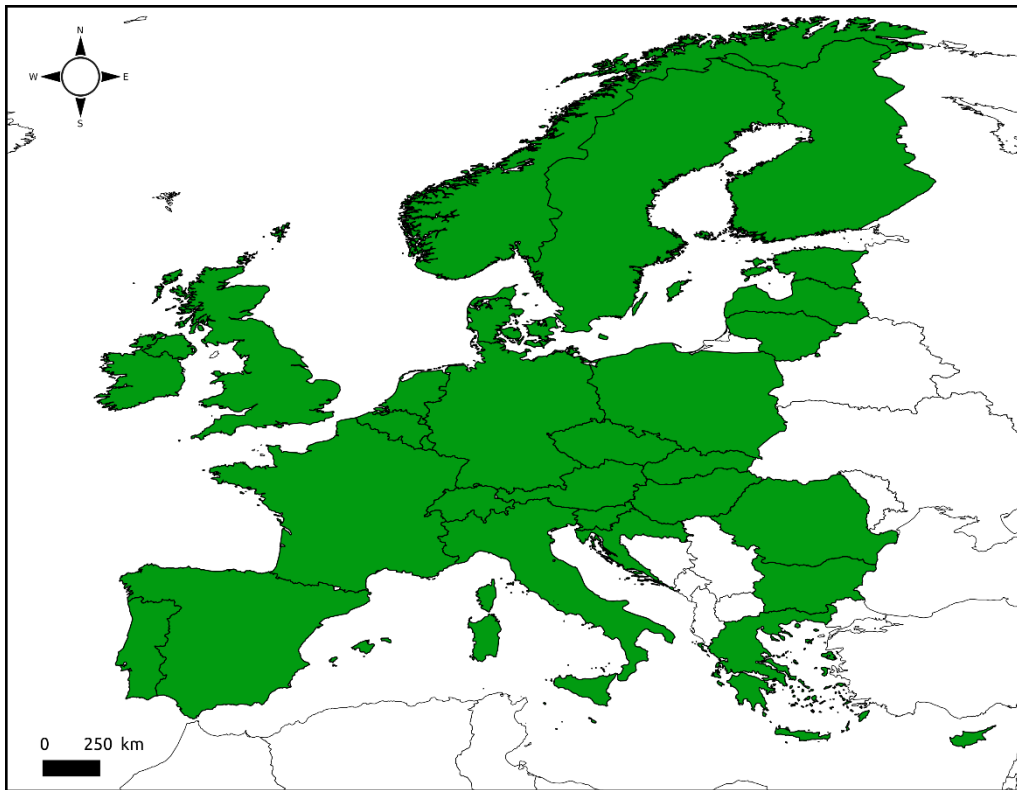


Figure 9 : Zone d'application du modèle d'introduction de CI, RFCC. La zone comprend les 28 pays de l'Union Européenne ainsi que la Suisse et la Norvège.

4. Données

Dans la thèse un grand nombre de données, d'origines variées ont été utilisées. Des données **météorologiques** classiques (*e.g.* température, précipitation), aux **produits satellites** (*e.g.* albédo, indice foliaire), en passant par des échantillons de **sol** ou des **statistiques agricoles**, cette section décrit les différents jeux de données utilisées pour mener à bien ces travaux de thèse.

Certains jeux de données seront présentés succinctement car ils sont présentés de manière plus détaillée dans les articles écrits au cours de cette thèse et constituant une partie du manuscrit.

4.1. Données des sites instrumentés

4.1.1. Données micro-météorologiques

Les variables mesurées (ou déduites des mesures) sur les sites d'Auradé et de Lamasquère et utilisées dans cette thèse sont :

- La température de l'air (à 2 m)
- Le rayonnement global incident
- Les précipitations
- L'humidité du sol à 5, 10, 30 et 60 ou 100 cm
- La densité de flux de photons photosynthétiquement actifs direct et diffus
- Le flux net de CO₂ et ses composantes
- Le flux net d'H₂O et ses composantes

Pour plus de détails sur le dispositif instrumental de ces deux sites, se référer à Béziat et al., (2009) et à la thèse de Morgan Ferlicoq (2016).

4.1.2. Mesures de végétation

Afin de caractériser la croissance et la dynamique de végétation des mesures **destructives** et **non destructives** ont été réalisées. Comme leur nom l'indique, les mesures destructives nécessitent le prélèvement de plantes au champ, tandis que les mesures non destructives se font à distance et sans prélèvement (e.g. photographies hémisphériques).

Les 3 variables qui nous intéressent ici sont le **GAI** (pour '*green area index*'), la **biomasse** et le **rendement**. Le GAI est un indice foliaire défini comme la somme des surfaces vertes de plantes (donc photosynthétiquement active) en m² par m² de surface au sol. Deux méthodes ont été utilisées pour estimer le GAI. Une méthode destructive où un échantillon de végétation est prélevé, puis passé au **planimètre** (instrument qui mesure la surface, dans notre cas le LI3100, LiCor, Lincoln, NE, USA). Une méthode non destructive basée sur l'utilisation de **photographie hémisphérique** ainsi que du logiciel CanEye (Demarez et al., 2008a) qui permettent une estimation du GAI. Le détail de ces mesures est disponible dans la thèse de Morgan Ferlicoq (2016).

4.2. Données météorologiques spatialisées

Deux jeux de données météorologiques spatialisées ont été utilisés dans le cadre de ces travaux de thèse. Les données SAFRAN (Météo-France) ont été utilisées pour appliquer les modèles agrométéorologiques SAFY-CO₂ et SAFYE-CO₂ sur la zone de l'OSR-SO, tandis que les données ERA-INTERIM et ERA-5 (ECMWF) ont été utilisées pour appliquer le modèle RFCC.

4.2.1. SAFRAN

Les données météorologiques **SAFRAN** (Durand et al., 1993a) ont été développées par Météo-France. Disponibles sur la France entière, elles ont une résolution temporelle de 6 h et une résolution spatiale de 8 km. Dans les exercices de simulations, les données de température de l'air (à 2 m), de rayonnement global, de précipitations ainsi que d'évapotranspiration de référence ont été utilisées comme entrées du modèle. Pour ce faire, elles ont été moyennées à la journée et une interpolation bilinéaire a été appliquée en prenant comme point de référence le barycentre de la parcelle à simuler.

4.2.2. ERA-INTERIM et ERA-5

Estimer un forçage radiatif requiert une connaissance de l'énergie solaire incidente et de la transmittance atmosphérique. Pour obtenir ces variables à l'échelle Européenne, les réanalyses atmosphériques de l'ECMWF¹¹ ont été utilisées. Les travaux ont commencé avec les produits **ERA-INTERIM** (Dee et al., 2011) puis, une fois les produits **ERA-5** (Hersbach et al., 2020) disponibles, ils ont été poursuivis avec ces données. Ces deux produits proposent les mêmes variables mais à des résolutions spatiales différentes. Ces produits ERA-5 (Hersbach et al., 2020) fournissent des données de rayonnement incident courtes longueurs d'onde (SW_{IN} pour '*incoming short wave*') sur tout le globe, à un pas de temps horaire et à une résolution spatiale de 31 km (~80 km pour ERA-INTERIM). Pour calculer un RF au sommet de l'atmosphère, la transmittance atmosphérique (T_A) est aussi nécessaire. La transmittance n'étant pas directement proposée dans les produits ERA-5 (ou ERA-INTERIM), elle a été estimée grâce au rapport de SW_{IN} sur le rayonnement TOA (R_{TOA}). Notons ici que certains scientifiques utilisent une transmittance constante dans l'estimation des RF (Kaye and Quemada, 2017a; Lenton and Vaughan, 2009a) ce qui a tendance à surestimer les forçages. L'utilisation d'une transmittance journalière apporte donc une meilleure précision. Enfin les données de précipitation et de neige ont aussi été utilisées pour évaluer respectivement la limitation de développement des CI par les précipitations ainsi que l'impact de la couverture neigeuse sur l'albédo de surface.

4.3. Campagnes de mesures

Un grand nombre de **campagnes terrains spatialisées** ont été réalisées par les équipes du CESBIO depuis 2006. Il m'apparaît d'ailleurs important de remercier ici les personnes qui organisent et réalisent ces campagnes et sans qui ce travail n'aurait pu être réalisé. Merci donc à Franck Granouillac, Bartosz Zawilski, Jean-François Dejoux, Hervé Gibrin, Tiphaine Talleg, Aurore Brut, Valérie Demarez, Morgan Ferlicq ainsi que les nombreux stagiaires, thésards ou autres permanents qui viennent parfois prêter main forte.

Le détail concernant les données acquises lors de ces campagnes de mesures est présenté dans les articles constituant ce manuscrit (voir sections I-4.3.2 et II-4.3.2). En revanche, les principales caractéristiques de ces campagnes sont résumées dans le Tableau 3. La Figure 10 présente l'emprise géographique et l'emplacement des mesures réalisées lors de ces campagnes.

En 2011, dans le cadre de la thèse d'Amanda Veloso (2014), une campagne de mesure a été réalisée sur la culture de blé. Elle a consisté à mesurer la biomasse finale ainsi que le rendement final sur 21 ESUs (pour '*elementary sampling unit*') correspondant à des zones de 20 × 20 m, réparties sur 16 parcelles.

En 2013, une autre campagne de mesure a consisté à mesurer la biomasse et le rendement final sur 9 parcelles et 4 fois durant la saison mais cette fois sur tournesol. Les travaux de thèse s'appuient également sur les données de rendement de tournesol acquises sur près de 200 parcelles dans le cadre du projet CasDAR Tournesol (projet n°1311 financé par le ministère de l'agriculture).

Pour valider le modèle agrométéorologique, les données de deux campagnes de mesures sur maïs ont aussi été utilisées. Réalisées en 2014 et 2015 dans le cadre du projet MAISEO (FUI n°14), elles ont permis de collecter des données de biomasse et de rendement sur 14 ESUs.

Enfin, pour observer et décrire l'hétérogénéité des sols de la zone, des données de texture du sol

¹¹ Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

acquises dans le cadre d'un projet TOSCA (Polyphème) porté par Emmanuelle Vaudour (AgroParisTech) en 2018 ont été utilisées.

Tableau 3 : Récapitulatif des campagnes de mesures sur lesquels se sont appuyés ces travaux.

Nature	Années	Variables mesurées	Echelle	Nombre de parcelles échantillonnées
Blé	2011	GAI, Biomasse	ESU	16
Tournesol	2013	Biomasse, Rendement	ESU	9
Tournesol	2014 et 2015	Rendement	Parcelle	70
Maïs	2014	Biomasse, Rendement	ESU	6
Maïs	2015	Biomasse, Rendement	ESU	8
Sol	2018	Texture (argile, limon, sable)	Ponctuelle	63

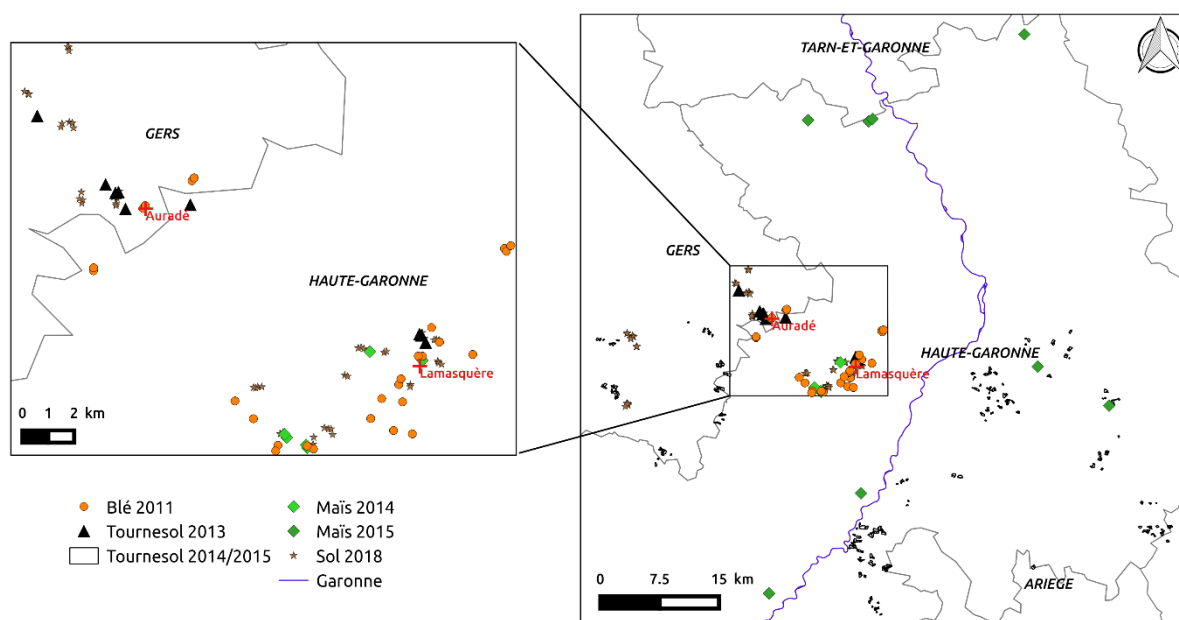


Figure 10 : Localisation des mesures faites au cours des différentes campagnes.

4.4. Données satellites

4.4.1. Partie « biogéochimique »

Cette partie des travaux s'est appuyée sur l'indice de végétation **NDVI** (pour '*normalized difference vegetation index*') et sur l'estimation par satellite du **GAI**. Le NDVI est un indice de végétation par différence normalisée très couramment utilisé pour caractériser le développement de la végétation. Le NDVI est directement déduit des réflectances grâce à l'équation 14. Dans ce rapport de bandes spectrales, NIR (pour '*near infra-red*') correspond au proche infrarouge tandis que Red correspond à la bande rouge.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (14)$$

Le GAI est quant à lui obtenu à partir des réflectances de surface via l'outil **BV-NNET** (Baret et al., 2007a) (pour '*biophysical variables neural network*') qui est basé sur l'inversion du modèle de transfert radiatif **PROSAIL** (Jacquemoud et al., 2009a) par des réseaux de neurones. En amont, les réflectances de surface sont déduites des données satellites grâce à la chaîne de traitement **KALIDEOS** (<http://kalideos.cnes.fr>). Cette chaîne, développée par le CNES, permet d'appliquer les corrections atmosphériques, radiométriques et géométriques aux données satellites. Les données de GAI ont servi à calibrer les modèles SAFY-CO₂ et SAFYE-CO₂ tandis que les données de NDVI ont servi à déterminer des dynamiques de végétation des événements de repousses (pendant l'interculture).

Les caractéristiques des capteurs qui ont été utilisés dans ces travaux sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Principales caractéristiques des capteurs utilisés dans ces travaux de thèse.

	SPOT	Formosat-2	DEIMOS-1	LANDSAT-8	Sentinel-2A
Résolution spatiale	20 m (SPOT2-4) ; 10 m (SPOT5)	8 m	22 m	30 m	10 m
Temps de revisite	Entre 1 et 3 jours	1 jour	Entre 3 et 4 jours	16 jours	5 jours
Footprint	60 km*60 km	24 km*24 km	Up to 625 km	(170 km*) 185 km	290 km
Bandes spectrales (µm)	Green : [0.5-0.59] ; Red : [0.61-0.68] ; NIR : [0.79-0.89] ; SWIR : [1.53-1.75]	Blue : [0.45-0.52] ; Green : [0.52-0.6] ; Red : [0.63-0.69] ; NIR : [0.79 - 0.9]	Green : [0.52-0.6] ; Red : [0.63-0.69] ; NIR : [0.77-0.9]	Aerosol : [0.43-0.45] ; Blue : [0.45-0.51] ; Green : [0.53-0.59] ; Red : [0.64 - 0.67] ; NIR : [0.85-0.88] ; SWIR1 : [1.57-1.65] ; SWIR2 : [2.11-2.29] ; Cirrus : [1.36-1.38]	Aerosol : [0.43-0.45] ; Blue : [0.46-0.53] ; Green : [0.54-0.58] ; Red : [0.65 - 0.68] ; VRE1 : [0.7-0.71] ; VRE2 : [0.73-0.75] ; VRE3 : [0.77-0.79] ; NIR : [0.72-0.95] ; Narrow NIR : [0.85-0.87] ; Water vapour : [0.93-0.95] ; SWIR cirrus [1.36-1.39] ; SWIR1 : [1.57-1.66] ; SWIR2 : [2.11-2.29]
Angle d'observation	Constant	Constant	Variable	Constant	Constant
Années couvertes	2006-2012 ; 2015	2006-2014	2013-2014	2013-2015	2016

4.4.2. Partie « biogéophysique »

Pour cette partie de la thèse, des produits albédo à grande échelle issus du satellite **MODIS** (MCD43GF) ont été utilisés. Ces produits '*snow-free*' (périodes de neige filtrées) proviennent des travaux de Carrer et al., (2014). D'une résolution spatiale de 1/20° et d'une résolution temporelle de 8 jours, ils sont disponibles à une échelle globale. Ils sont le résultat d'un travail de déconvolution par filtre de Kalman des données albédo **MODIS** (MCD43GF) associées aux données d'occupation du sol **ECOCLIMAP** (Faroux et al., 2013a; Masson et al., 2003). Chaque type d'occupation du sol de la classification ECOCLIMAP se voit attribuer une part du signal satellite moyen sur 8 jours. Les classes d'occupation du sol utilisées dans ces travaux sont les classes 07 et 08 qui correspondent respectivement aux cultures C3 et C4. Ces deux types de cultures se distinguent par leur mécanisme de photosynthèse,

et sont censés représenter les cultures d'hiver et d'été dans les produits ECOCLIMAP. Un correctif a été appliqué à ces classes car les cultures de type C4 correspondent essentiellement à des cultures d'été mais les cultures de type C3 peuvent correspondre à des cultures d'hiver (blé, orge, etc.) comme à des cultures d'été (tournesol, pomme de terre, etc.). Ce correctif a donc permis d'obtenir deux nouvelles classes : les cultures d'hiver et les cultures d'été, qui se distinguent par leur période d'implantation. Voir section III.2.3.1 pour plus de détails.

5. Objectifs de recherche et questionnements scientifiques

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans un objectif long terme qui vise à développer des outils permettant : de quantifier l'impact climatique des surfaces agricoles en l'état, ainsi que de certaines pratiques agricoles, et de guider la transition du secteur agricole vers des pratiques agroécologiques. Comme cela a été abordé dans la section 2, deux approches de modélisation ont été développées au cours de ces travaux, afin de prendre en compte les différentes interactions entre les surfaces agricoles et l'atmosphère. La majeure partie du temps de thèse a été consacrée au développement et à l'application du modèle agrométéorologique **SAFYE-CO₂**, permettant d'estimer à la parcelle les composantes des bilans de C et d'eau des cultures. Une autre partie s'est intéressée au développement du modèle **RFCC**, permettant d'analyser à large échelle l'effet albédo induit par l'introduction de CI dans les rotations de cultures.

5.1. Estimation des composantes des bilans de C et d'eau sur grandes cultures

Le premier volet de cette thèse se concentre sur le développement et l'application du modèle **SAFYE-CO₂** (pour '*simple algorithm for yield, evapotranspiration and CO₂ fluxes estimates*'). Ce modèle agrométéorologique est développé au CESBIO depuis 2004, initialement au Maroc dans le cadre du chantier Sud Med¹², pour estimer les rendements sur la culture de blé (Duchemin et al., 2008a). La culture de blé a été introduite en priorité dans le modèle compte tenu de la part majoritaire qu'elle représente dans les surfaces de grandes cultures au Maroc. Ce modèle a ensuite été appliqué en France à la culture de tournesol et de maïs (Claverie et al., 2012; Battude et al., 2016), avant d'être couplé avec un module de bilan hydrique (inspiré de la méthode FAO-56 (Allen et al., 1998)). Ce nouveau modèle (SAFY-WB pour '*water balance*'), permettant d'estimer les flux d'eau à l'interface parcelle/atmosphère, a été appliqué au blé et au maïs (Duchemin et al., 2015; Battude et al., 2017). Voir section II-4.2 pour plus de détails.

Le développement de ces modèles a permis l'estimation des productions et des besoins en eau des cultures majoritairement cultivées en France, mais les échanges de CO₂ entre l'atmosphère et les parcelles ainsi que le bilan carbone de ces dernières n'étaient pas estimés par ces versions antérieures. Deux nouvelles versions, adaptées de SAFY et SAFY-WB, respectivement SAFY-CO₂ et SAFYE-CO₂, ont donc été développées pour permettre l'estimation des flux de CO₂.

A l'aube de cette thèse, 4 grandes espèces ont été identifiées comme cultures à paramétrer en priorité : le **blé**, le **maïs**, le **tournesol** et le **colza** (espèces majoritairement cultivées dans la zone

¹² <https://www.cesbio.cnrs.fr/la-recherche/les-chantiers/sudmed/>

d'étude). À ces cultures, il a été décidé d'ajouter une paramétrisation générique pour simuler la végétation pouvant se développer pendant l'interculture (CI, repousse, adventices), avec comme objectif de pouvoir simuler des rotations culturales et ainsi estimer le bilan de carbone pluriannuel des parcelles agricoles. Des problèmes constatés sur les données de flux acquises sur maïs ont rendu impossible une validation complète de cette culture, et la paramétrisation pour le colza n'a pas été finalisée, par manque de temps. Introduire une nouvelle espèce dans le modèle requiert 3 étapes principales :

- 1- Un travail bibliographique permettant de déterminer les paramètres fixes et éventuellement adapter certains formalismes, propres à chaque culture.
- 2- Fixer les bornes des paramètres à optimiser de manière à reproduire les développements de culture observés tout en restant réaliste.
- 3- Valider la paramétrisation grâce à des observations (*i.e.* production de biomasse, rendements flux de CO₂ et d'eau).

Le blé a été la première espèce à être introduite dans SAFY-CO₂, ce qui a donné lieu à une étude publiée dans la revue *Geoderma* (Pique et al., 2020a). Compte tenu des problèmes observés sur les flux acquis sur maïs, cette culture a été validée mais seulement sur les productions (biomasse et rendement). Enfin, la culture de tournesol a également été paramétrée et validée, ce qui a mené à la publication d'un *proceeding* (ainsi qu'une présentation) aux M2GARSS 2020 (Pique et al., 2020b). Tous ces résultats constituent le **chapitre I** de la thèse, consacré aux développements sur le modèle SAFY-CO₂.

Pour répondre aux interrogations concernant la gestion de la ressource en eau et afin de tenter d'améliorer les estimations de SAFY-CO₂, le modèle **SAFYE-CO₂** (=SAFY-CO₂ + SAFY-WB) a été développé et évalué. Les cultures d'été étant plus soumises au stress hydrique que les cultures d'hiver, et parce que le tournesol est largement cultivé dans le sud-ouest de la France, il a été décidé d'appliquer SAFYE-CO₂ en premier lieu à cette culture et d'étudier la faisabilité d'une application à grande échelle. Ces travaux ont abouti à une étude publiée dans *Remote Sensing* (Pique et al., 2020c). Cette nouvelle version du modèle a aussi été appliquée à la culture de blé. Ces résultats forment le **chapitre II** de la thèse, consacré aux développements sur le modèle SAFYE-CO₂.

5.2. Estimation du forçage radiatif induit par l'introduction des cultures intermédiaires

L'objectif de ce volet de la thèse consiste à analyser l'effet d'un changement d'albédo lié à l'introduction de CI sur le bilan radiatif terrestre. Pour y répondre, la chaîne de traitement RFCC a été utilisée. Initialement développée au cours du stage de fin d'étude de l'Ecole Polytechnique d'Elias Azzi, cette chaîne a été reprise lors de mon stage de fin d'étude et j'ai continué à la développer au cours de ces travaux de thèse.

Une première étape a consisté à valider la chaîne et à l'appliquer à l'échelle Européenne sur une période de 3 ans en simulant différents scénarii d'introduction des CI. Ces premiers travaux ont donné lieu à une publication dans la revue *Environmental Research Letters* (Carrer et al., 2018) dont je suis second auteur. Cette étude constitue le **chapitre III** de la thèse.

5.3. Analyse couplée des effets biogéochimiques et biogéophysiques

Enfin, l'objectif final de la thèse étant d'analyser les effets couplés (biogéochimiques et biogéophysiques) des surfaces agricoles et de changements de pratique sur les composantes du RFnet, un exercice d'application couplée de ces 2 modèles a été réalisé. Cet exercice a consisté à appliquer les modèles SAFYE-CO₂ et RFCC sur une zone située dans le sud-ouest de la France. Dans un premier temps, seul le modèle SAFYE-CO₂ (sans couplage avec le module de bilan hydrique) a été appliqué sur une rotation blé/tournesol afin d'estimer l'impact de la végétation d'interculture sur les flux de CO₂ et par extension sur les bilans de C. Cet exercice a été valorisé par l'écriture d'un proceeding pour la conférence ECAS 2020 (Pique et al., 2020d) et constitue la première partie du **chapitre IV**.

Dans la continuité de cette étude, plusieurs scénarii ont été mis en place et simulés avec SAFYE-CO₂ (avec et sans couplage avec le module hydrique), ainsi qu'avec RFCC afin de quantifier l'impact de la mise en place de CI hivernales à une échelle régionale sur les composantes bilan C et albédo du RFnet. Ces résultats sont présentés dans la seconde partie du **chapitre IV** de la thèse, qui se conclut par une discussion portant sur ces analyses couplées soulevant l'importance de la prise en compte de certains phénomènes biogéochimiques sur des temps longs.

En effet, les premières estimations de l'impact climatique des CI ne prenaient pas en compte certains aspects pouvant avoir un impact significatif sur le forçage radiatif. Ainsi, la décroissance de l'albédo du sol induite par l'accumulation de matière organique suivant l'incorporation dans le sol des CI, une extension de la pratique des CI à d'autres périodes d'intercultures, ainsi que la prise en compte de l'effet de la neige sur les RF α ont été identifiées comme des facteurs importants à prendre en compte dans l'approche développée. Ces aspects ont donc été introduits dans le modèle RFCC et ces résultats ont abouti à l'écriture d'un projet d'article qui sera soumis très prochainement. Ces résultats forment la **chapitre V** de cette thèse.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ Les travaux de thèse se sont scindés en deux parties ; le développement et l'application du modèle agrométéorologique SAFYE-CO₂ et du modèle de forçage radiatif RFCC.
- ♣ Le modèle SAFYE-CO₂ a été validé pour la culture de blé, de tournesol et de maïs (en partie).
- ♣ Le modèle RFCC a été appliqué à l'échelle Européenne sur 100 ans de simulation.
- ♣ Un exercice a permis de coupler ces deux approches de modélisation pour analyser l'impact des CI sur le RFnet.

Chapitre I

Chapitre I : Simulation spatialisée des bilans de C sur grandes cultures

1. Pourquoi un nouveau modèle ?

Estimer le bilan de carbone des parcelles agricoles de grandes cultures est une tâche complexe. Les estimations actuelles sont obtenues soit via des approches inventaires (ou statistiques) se basant sur des réseaux de suivi de l'évolution de la matière organique des sols ou des flux de surface, soit via des modèles décrivant les processus régissant les entrées de C organique et l'évolution de celui-ci dans le sol, de manière plus ou moins complexe.

Les approches inventaires sont des méthodes qui s'appuient sur des réseaux de suivi des propriétés de sol comme le réseau RMQS en France (LUCAS en Europe) ou des sites flux (ex. Réseau ICOS). À partir de ces observations, des estimations des variations de stock de C des parcelles agricoles peuvent être obtenues de manière ponctuelle. Ces observations peuvent ensuite être extrapolées à l'ensemble des surfaces agricoles d'une zone définie. Elles permettent donc d'obtenir des estimations de bilan de C moyen des parcelles agricoles, mais elles sont évidemment entachées de fortes incertitudes. Dans leur étude, Ciais et al., (2010a) ont estimé le bilan de C des parcelles agricoles Européenne (UE-25) sur la période 1990-2010 à l'aide d'inventaires de l'évolution de la teneur en C des terres arables. Ils ont trouvé que le bilan de C des terres arables était de $-13 \pm 33 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ une fois les pertes de C par érosion et brûlage des résidus de culture pris en compte. Mais à grande échelle (régionale à internationale), la multitude des espèces cultivées et des pratiques mises en place couplées aux conditions pédoclimatiques très variées entre les parcelles (Klein Tank et al., 2002) induisent de fortes incertitudes dans l'estimation du bilan de C des parcelles agricoles via ces approches inventaires. Les estimations actuelles sont donc encore entachées de grandes incertitudes. Ce problème est illustré sur la Figure I-1 extraite de Osborne et al., (2010a). Dans leur étude et à partir des données compilées dans le cadre du projet CarboEurope (<http://www.carboeurope.org/>), les auteurs ont estimé que l'incertitude des bilans de C ('*net biome productivity*') sur les terres arables était de 100%.

En plus des fortes incertitudes intrinsèques dont elles sont entachées, les approches inventaires ne prennent pas en compte la variation d'une année sur l'autre des variétés et cultivars semés qui peut être importante en fonction de la conjoncture économique ou politique (Ollier and Utz, 2008). Les approches inventaires permettent donc des estimations à large échelle des bilans de C des parcelles agricoles, mais ces dernières sont assez incertaines. Une façon de réduire les incertitudes est de se baser sur des données de simulation qui peuvent être issues de modèles sols ou agronomiques.

Les modèles sols (AMG ; Clivot, 2019, RothC ; Coleman et Jenkinson, 1996, DNDC ; Li et al., 2005, 1994, 1992, ou encore DayCent ; Parton et al., 1998) tout comme les modèles agronomiques (STICS ; Brisson et al., 1998, CERES ; Ritchie and Otter, 1984, CropSyst ; Stöckle et al., 2003 ou encore WOFOST ; Diepen et al., 1989, voir section 2.1.4) peuvent permettre de pallier en partie le manque de précision des approches inventaires. De complexité assez variable, ces modèles permettent des estimations précises des variations des stocks de C des surfaces agricoles, mais ils requièrent certaines informations qui les rendent difficilement spatialisables. Les modèles de sol nécessitent notamment une connaissance précise des stocks initiaux de C du sol, données ponctuelles dont la couverture est loin d'être suffisante. De leur côté, les modèles agronomiques existants sont difficiles à mettre en œuvre sur

de larges territoires quand il s'agit de produire des bilans de C à l'échelle parcellaire. En effet, de telles estimations nécessiteraient une connaissance, pour chaque parcelle, de toutes les données concernant les pratiques culturales, les analyses de sol ou encore la météo ce qui semble impossible aujourd'hui. Il existe toutefois des estimations des bilans de C via ces approches modèles agronomiques. Par exemple Ciais et al., (2010a) (étude discutée au-dessus) ont estimé le bilan de C des parcelles agricoles Européenne à l'aide de 3 différents modèles (ORCHIDEE-STICS ; Gervois et al., 2008a, Roth-C ; J. Smith et al., 2005, LPJml ; Bondeau et al., 2007) à $-8.3 \pm 13 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. D'autres études, comme l'expertise nationale 4p1000 (Pellerin et al., 2019) ont appliqué le modèle STICS à l'échelle de la France. Mais en plus des incertitudes liées aux stocks initiaux de C organique ou celles liées à la représentation plus ou moins précise des processus simulés, la prise en compte de la proportion de surfaces agricoles avec tel ou tel type de rotation sur tel ou tel type de sol, avec telle ou telle pratique constituent d'autres sources d'incertitudes. Ceci met une fois de plus en exergue la multitude d'inconnues, lorsqu'on veut passer à l'échelle régionale, nationale ou au-delà. Or certaines de ces informations peuvent être déduites des images acquises par la télédétection.

La télédétection apparaît en effet comme un outil puissant pour le suivi des agrosystèmes et de certaines variables d'intérêt comme les teneurs en C superficielles des sols des parcelles agricoles. Cet outil peut aussi être utilisé pour estimer directement certaines variables du couvert végétal ou pour venir en appui des approches de modélisation. Par exemple, Vaudour et al., (2019) ont tenté, à partir des images multispectrales Sentinel-2, d'extraire des propriétés de sol de surface sur des agroécosystèmes aux conditions pédoclimatiques différentes. Parmi ces propriétés de sols, les auteurs ont estimé la concentration en C organique du sol avec une précision satisfaisante pour l'un des deux sites d'étude ($R^2 = 0.56$; $\text{RMSE} = 1.23 \text{ g.kg}^{-1}$) mais pas pour le second ($R^2 = 0.02$; $\text{RMSE} = 3.71 \text{ g.kg}^{-1}$). Ce type d'approche encore peu répandu pourrait offrir des perspectives intéressantes à l'avenir pour le suivi des teneurs en C des sols superficiels des parcelles cultivées.

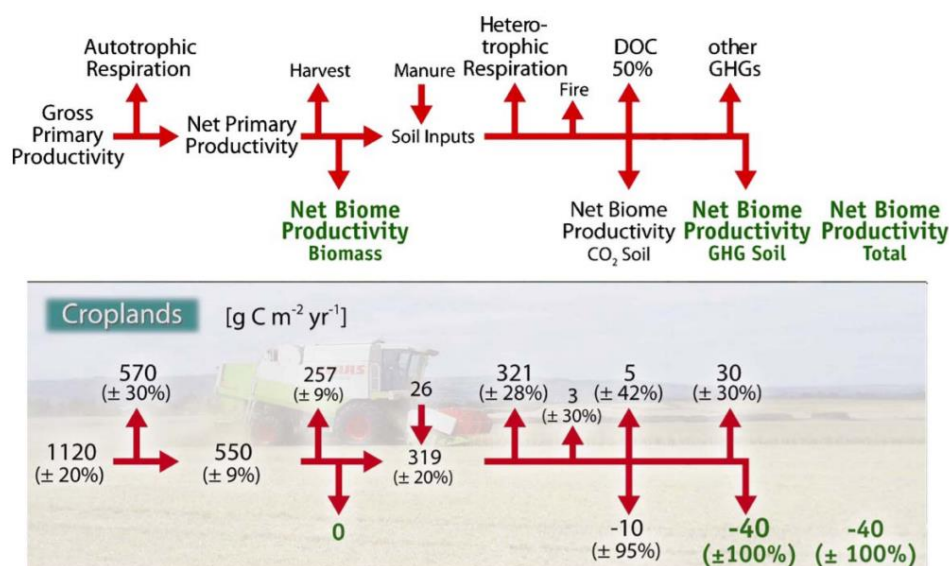


Figure I-1 : Distribution des composantes du bilan de carbone et de GES sur les grandes cultures. Moyennes Européenne et coefficient de variation. Extrait de Osborne et al., 2010a.

Lorsque la télédétection est utilisée conjointement avec des modèles agronomiques, elle offre d'autres perspectives. En effet, comme il l'a été expliqué précédemment, les modèles agronomiques fournissent aujourd'hui des estimations précises des variables permettant le calcul des composantes des bilans de C (biomasse, flux de CO₂) mais de manière locale. Le passage à une échelle supérieure

(régionale, nationale) requiert une connaissance de certaines pratiques comme le choix des cultures, la présence de CI ou le travail du sol (pouvant être mis en œuvre pour la destruction de la végétation d'interculture). Ces pratiques sont maintenant identifiables sur de grands territoires et à une échelle intra-parcellaire. En outre, la télédétection offre également un suivi du développement de la végétation via des indices simples (*i.e.* NDVI ou GAI) permettant ainsi de s'affranchir d'autres informations in situ limitant l'application des modèles agronomiques à des zones restreintes.

Ainsi, le modèle agrométéorologique SAFY-CO₂ développé dans le cadre de cette thèse, est un modèle couplé à l'information satellite permettant l'estimation des biomasses, rendements et flux de CO₂ et ainsi des bilans de C sur grandes cultures sous certaines conditions. Comme ce modèle assimile des produits satellites, il fait partie des modèles diagnostiques (contrairement aux modèles pronostiques). Ce chapitre de thèse détaille et présente la validation de cette approche.

2.SAFY-CO₂ : un modèle adapté à l'estimation des flux de CO₂ et composantes des bilans C

SAFY-CO₂ n'est pas un nouveau modèle créé de toutes pièces, il a été développé à partir de deux modèles déjà existants : SAFY (Duchemin et al., 2008a), et TURC (Ruimy et al., 1996). Le modèle SAFY pour '*Simple Algorithm For Yield estimates*' a été validé sur plusieurs cultures. Initialement développé pour estimer les productions de blé (Hadria et al., 2010a) en couplant un modèle de culture simple avec des produits GAI issus de données de télédétection à haute résolution, l'approche a aussi été mise en œuvre pour le suivi du maïs, du soja et du tournesol (Claverie et al., 2012; Baup et al., 2015 ; Fieuzal et al., 2017a). Ce modèle permet de calculer, à un pas de temps journalier, le GAI et la biomasse aérienne sèche. En fin de période culturale, le rendement en grain est estimé à partir de la biomasse finale via un indice de récolte. La première application de ce modèle (Duchemin et al., 2008a) a permis de démontrer l'apport de la télédétection pour la simulation agronomique. Cette approche permet en effet de contraindre le modèle en fonction de ce qui est 'vu' par le satellite en termes de développement des cultures. Aucune information concernant la gestion des parcelles n'est donc requise dans cette approche puisqu'elle est déjà apportée par le satellite.

Plus tard, dans un objectif d'estimation des besoins en eau des cultures et d'une meilleure gestion de cette ressource, Duchemin et al., (2015) ont développé SAFY-WB (pour '*water budget*') à partir de SAFY. Ce modèle sera discuté dans le chapitre II.

Plus récemment (Veloso, 2014), le modèle SAFY a été modifié pour simuler, en plus des productions, les flux de CO₂ permettant ainsi d'estimer des bilans de C sur parcelles agricoles. Certaines modifications de formalismes ont été nécessaires à l'établissement de SAFY-CO₂. En effet, la version initiale (SAFY) se base sur la théorie d'efficacité d'utilisation de la lumière (Monteith and Moss, 1977a) qui établit qu'il existe une relation linéaire entre production de biomasse et lumière captée par la plante. Cette relation fait intervenir le paramètre ELUE, pour '*effective light-use efficiency*'. À partir de cette biomasse estimée, le GAI puis le rendement sont déduits. Cette représentation fait l'hypothèse d'un rapport GPP/Ra constant au cours de la saison. Or cette hypothèse est fautive (elle n'est valable qu'à un pas de temps annuel). La Figure I-2, extraite de l'étude de Hoyaux et al., (2008) représente la photosynthèse et la respiration autotrophe mesurées sur des feuilles de blé au cours d'une saison. On remarque la dépendance de ces deux variables au temps, et le rapport qui en résulte n'est pas constant au cours de la saison. En effet, les capacités photosynthétiques de la plante diminuent au cours du temps

tandis que la respiration augmente. L'hypothèse d'un rapport constant entre GPP et R_a risque donc d'entraîner une sous-estimation de la production de biomasse en fin de saison avec une ELUE constante.

Afin de corriger l'hypothèse faite dans SAFY, la version SAFY-CO₂ reprend les formalismes du modèle TURC qui estime tout d'abord la photosynthèse à partir du rayonnement absorbé, puis la respiration autotrophe. Ensuite, la différence entre ces deux variables permet d'estimer la production de biomasse journalière. La variable ELUE initialement exprimée en $g_{veg}.MJ^{-1}$ (dans SAFY) est à présent exprimée en $gC.MJ^{-1}$. Par ailleurs, nous avons introduit dans la ELUE une dépendance à la lumière diffuse. En effet, Béziat et al., (2009) ont observé une augmentation des capacités photosynthétiques des cultures sous lumière diffuse. Ceci s'explique notamment par le fait qu'à éclairage équivalent, une plus grande surface photosynthétiquement active est éclairée en conditions diffuses en comparaison à une journée où la lumière directe prédomine. Cette modification est discutée dans les annexes de l'article suivant.

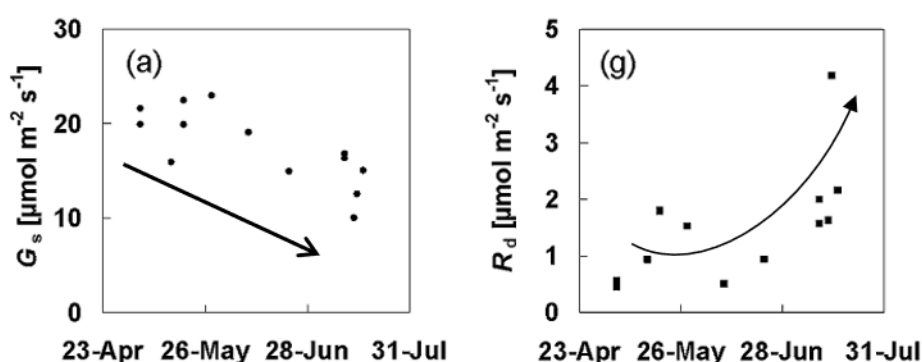


Figure I-2 : Mesures de photosynthèse (gauche) et de respiration autotrophe (droite) réalisées sur des feuilles de blé au cours d'une saison en Belgique en 2004. Extrait de Hoyaux et al., 2008.

La section 4 de ce chapitre présente l'article qui décrit le modèle et l'applique à la culture de blé. Le choix de la culture de blé a été motivé par le fait que cette culture est la plus présente dans la zone d'étude mais aussi à l'échelle nationale et Européenne. En effet, les statistiques Agreste (Grandes Cultures. Surfaces 2019) nous indiquent qu'en France et en moyenne sur la période 2014-2018, 57.1% des surfaces agricoles ont été semées en blé. Cette valeur monte à 76.6% si on y ajoute l'orge, culture que l'on considérera dans notre approche comme similaire au blé dans une première approximation. Par ailleurs, les modèles SAFY et SAFY-WB ont tous deux déjà été validé pour cette culture.

La section suivante résume, en français, les principaux résultats de l'étude publiée en 2020 dans le journal GEODERMA.

3. Résumé de l'article en français

Les surfaces agricoles contribuent aux émissions de gaz à effet de serre mais ont également le potentiel de limiter le changement climatique grâce au stockage de carbone atmosphérique dans le sol. Toutefois, il n'existe pas d'outils basés sur des observations objectives permettant d'évaluer le bilan carbone des parcelles agricoles à l'échelle de la parcelle sur de grands territoires. Ces outils permettraient d'établir plus précisément la contribution des parcelles agricoles aux émissions nettes de CO₂ en fonction des pratiques culturales et d'identifier des leviers pour améliorer le bilan carbone. Dans cette étude, nous présentons une approche de modélisation diagnostique à l'échelle régionale, SAFY-CO₂, assimilant des données satellites optiques à haute résolution spatiale et temporelle (HSTR) dans un

modèle de culture simple. Nous évaluons ici les performances de cette approche en quantifiant la production agricole ainsi que les principales composantes du bilan annuel de carbone pour la culture de blé.

Le modèle SAFY-CO₂ simule, au pas de temps journalier le développement des cultures (biomasse, partition des feuilles, etc.), les composantes du flux net de CO₂ ainsi que le rendement final et le bilan de carbone net annuel de l'écosystème (NECB).

Des cartes multi temporelles de GAI dérivées de données HSTR issues des satellites Formosat-2 et SPOT ont été utilisées pour calibrer le paramètre d'efficacité de la lumière ainsi que les paramètres phénologiques du modèle. Des données issues de la littérature ont été utilisées pour fixer des valeurs à priori de certains paramètres du modèle, et un large jeu de données in situ a été utilisé pour la validation du modèle. Le premier jeu de donnée correspond à 8 années de mesures de flux par fluctuations turbulentes, des mesures de GAI, de biomasses et de rendement acquis sur 2 sites instrumentés dans le sud-ouest de la France. Des données de biomasses et de rendements acquises entre 2005 et 2014 et provenant de 16 parcelles de la zone d'étude ont aussi été utilisées pour la validation du modèle.

Le modèle SAFY-CO₂ est capable de reproduire les dynamiques de GAI (rRMSE = 14%, R² = 0.97) ainsi que les productions de biomasses et de rendements avec une grande précision (rRMSE respectivement de 27% et 21%) et sous des conditions climatiques, environnementales et de gestions variées. De plus, les composantes du flux net de CO₂ estimées par le modèle concordent généralement bien avec les observations et montrent de très bonnes corrélations et de faibles erreurs (RMSE de 1.74, 1.13 et 1.29 gC.m⁻².d⁻¹ respectivement pour la GPP, la R_{eco} et la NEE ; R² de 0.90, 0.75 et 0.85 respectivement pour la GPP, la R_{eco} et la NEE) sur les 8 années de mesures. Cette étude prouve également l'importance de la prise en compte des événements de développements végétatifs post-récolte (adventices, repousses ou cultures intermédiaires) pour une estimation précise des flux annuels de CO₂. Cette approche nécessite très peu de paramètres d'entrée pour estimer le rendement et les composantes du flux de CO₂, ce qui est encourageant pour une application à l'échelle régionale ou globale basée sur des produits de type Sentinel-2. Toutefois, cette approche requiert des informations sur l'apport d'engrais organique et sur l'export des pailles pour les zones de polycultures élevages pour pouvoir estimer le bilan de carbone des parcelles agricoles.

4. Estimation of daily CO₂ 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 – Published in GEODERMA

Pique Gaétan^{(1,2)*}, Fieuzal Rémy⁽¹⁾, Al Bitar Ahmad⁽¹⁾, Veloso Amanda⁽¹⁾, Tallec Tiphaine⁽¹⁾, Brut Aurore⁽¹⁾, Ferlicoq Morgan⁽¹⁾, Zawilski Bartosz⁽¹⁾, Dejoux Jean-François⁽¹⁾, Gibrin Hervé⁽¹⁾, Ceschia Eric⁽³⁾

¹CESBIO, Université de Toulouse, CNES/CNRS/INRA/IRD/UPS, Toulouse, France

²Agence De l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie (ADEME), Angers Cedex 1, France

³INRA, USC 1439 CESBIO, Toulouse, France

Keywords: crop modelling, carbon budget, remote sensing monitoring, winter wheat

* Corresponding author: E-mail address: piqueg@cesbio.cnes.fr

4.1. Abstract

Croplands contribute to greenhouse gas emissions but also have the potential to mitigate climate change through soil carbon storage. However, there is a lack of tools based on objective observations for assessing cropland C budgets at the plot scale over large areas. Such tools would allow us to more precisely establish the contribution of an agricultural plot to net CO₂ emissions according to the plot management and identify levers for improving the C budget. In this study, we present a diagnostic regional modelling approach, called SAFY-CO₂, that assimilates high spatial and temporal resolution (HSTR) optical remote sensing data in a simple crop model and evaluate the performance of this approach in quantifying crop production and the main components of the annual carbon budget for winter wheat.

The SAFY-CO₂ model simulates daily crop development (biomass, partition to leaves, etc.), the components of net ecosystem CO₂ fluxes, and the annual yield and net ecosystem carbon budget (NECB).

Multi-temporal green area index (GAI) maps derived from HSTR data from the Formosat-2 and SPOT satellites were used to calibrate the light-use efficiency and phenological parameters of the model. Data from the literature were used to set a priori values for a set of model parameters, and a large dataset of in situ data was used for model validation. This dataset includes 8 years of eddy-covariance net CO₂ flux measurements and GAI, biomass and yield data acquired at 2 instrumented sites in southwest France. Biomass and yield data from 16 fields in the study area between 2005 and 2014 were also used for validation.

The SAFY-CO₂ model is able to reproduce both GAI dynamics (RRMSE=14%, R²=0.97) and biomass production and yield (RRMSE of 27% and 21%, respectively) with high precisions under contrasting climatic, environmental and management conditions. Additionally, the net CO₂ flux components estimated by the model generally agreed well with in situ data and presented very good and significant correlations (RMSE of 1.74, 1.13 and 1.29 gC.m⁻².d⁻¹ for GPP, R_{eco} and NEE, respectively; R² of 0.90, 0.75 and 0.85 for GPP, R_{eco} and NEE, respectively) over the 8 studied years. This study also highlights the importance of accounting for post-harvest vegetative events (spontaneous re-growth, weed development and cover crops) for an accurate calculation of the annual net CO₂ flux. This approach requires a limited number of input parameters for estimating yield and net CO₂ flux components, which is promising for regional/global-scale applications based on Sentinel 2-like data; however, the approach requires plot-scale data concerning organic amendments and straw management (exportation) in animal farming systems to calculate field C budgets.

4.2. Introduction

Agricultural lands occupy nearly 12% of Earth's terrestrial surface. They not only contribute to but also affect climate change because climatic conditions and water resources affect crop production (P. Smith et al., 2005). Additionally, the global food demand is increasing and may continue to increase for decades, driven by the increasing global population and per capita income that are anticipated through the middle of the next century (Tilman et al., 2011).

It is in this context that the '4 per mille Soils for Food Security and Climate' initiative was launched at COP21, with the aspiration to increase global soil organic matter stocks by 4 per 1000 (or 0.4%) per year as a compensation for part of the global emissions of greenhouse gases by anthropogenic sources and to increase food security (Chabbi et al., 2017a; Minasny et al., 2017a). Since then, this initiative has induced a wide debate in the scientific community concerning its feasibility (Baveye et al., 2018; Poulton et al., 2018), and it has been recognized that such an increase in soil organic carbon (SOC) is likely achievable in soils that are being actively managed for agriculture at a rate of increase that may not be achievable everywhere (Chabbi et al., 2017; Lal, 2016; Minasny et al., 2017; Pellerin et al., 2019). This debate illustrates the need for tools that can estimate changes in cropland SOC and identify potential levers to increase it. Currently, quantifying the net ecosystem carbon budgets (NECB) of croplands at regional or global scales remains difficult because of the heterogeneous character of agricultural landscapes, which have numerous plots with varied management practices and environmental conditions. This character results in uncertainties when assessing the impacts of specific management practices on the cropland NECB (Osborne et al., 2010b) and when determining whether croplands are carbon sinks or sources (Ciais et al., 2010b; West et al., 2010).

Indeed, the general biogeochemical models (such as SPA (Williams et al., 1996), Ecosys (Grant et al., 2007), Isba-Ags (Calvet et al., 1998), ORCHIDEE (Krinner et al., 2005), and ORCHIDEE-STICS (Gervois et al., 2008b)) that are commonly used to simulate the carbon cycle in terrestrial ecosystems are not suited to account for the specificities and complexities of agro-ecosystems, particularly the effect of management practices. In contrast, the agronomic models or so-called crop models (*e.g.*, CERES (Gabrielle et al., 1998) or STICS (Brisson et al., 1998)) that account for management and pedoclimatic effects are primarily designed for simulating crop development and production (net primary production (NPP), yield) at the plot scale. However, unlike our approach, these models require information regarding management practices, which makes them less suitable for large spatial scale applications.

Several studies have demonstrated the benefit of assimilating remote sensing data into regional-scale crop models (Sus et al., 2013; Wu et al., 2012). In particular, the combination of high spatial and

temporal resolution (HSTR) remote sensing data with crop models can provide, at the field scale over large areas, a timely and accurate picture of crop development (Claverie et al., 2012; Hadria et al., 2010), cropland photosynthesis (Wang et al., 2012; Wolanin et al., 2019) and net CO₂ fluxes (Revill et al., 2013a; Sus et al., 2013). Among others, the SAFY (Duchemin et al., 2008; Claverie et al., 2012) and SAFY-WB (Battude et al., 2017a; Duchemin et al., 2015a) crop models constitute coherent frameworks for estimating biomass, yield production and water requirements. These models describe the main biophysical processes underlying crop production by using climatic data and assimilate green area index (GAI) dynamic maps derived from remote sensing to avoid the need for management data, which makes them well suited for large-scale studies. In this work, we modified the SAFY model to simulate the components of the net ecosystem exchange (NEE) and to evaluate the potential of this approach for calculating cropland annual carbon budgets. The resulting model, called SAFY-CO₂, is described and evaluated against in situ data. The objectives of this study are as follows:

- 1- To assess the potential of an approach combining HSTR remote sensing data and a simple crop model to quantify the components of the NEE and of the annual NECB for winter wheat plots in contrasting climatic and management conditions.
- 2- To address the potentialities and limitations of such an approach in the perspective of future regional- or global-scale applications.

To fulfil our objectives, GAI maps derived from HSTR optical data (Formosat-2 and SPOT satellites) from 2006 to 2014 in southwestern France were used to constrain the photosynthetic light-use efficiency and phenological parameters of the model. Consequently, the simulated crop phenology agreed well with the satellite observations, which is essential for correctly estimating CO₂ fluxes and carbon budgets (Grant et al., 2007; Huang et al., 2009; Wattenbach et al., 2010).

A validation of the simulated CO₂ fluxes (photosynthesis, ecosystem respiration and NEE) was performed against eddy-covariance flux measurements that were carried out over two flux sites (Béziat, 2009) in the study area.

In the next section of the manuscript, the study area, experimental datasets and satellite database are presented. The following section describes the SAFY-CO₂ mathematical formulations, the parameterization and calibration procedure and the method for computing the annual NECB. The inputs required to run the model as well as the validation procedure are also detailed. Section 4 is dedicated to the results. The biomass and yield results are presented first, followed by the flux estimate results and finally the annual C budgets. Section five discusses the potentialities, the limitations and potential improvements of such an approach in the perspective of future regional- or global-scale applications. The paper ends with a conclusion concerning the main results, limitations and insights into future developments.

4.3. Materials

4.3.1. Study area

The study area is part of the Regional Spatial Observatory [<http://www.cesbio.upstlse.fr/fr/osr.html>] located next to Toulouse in southwest France which includes 2 instrumented agricultural sites, Auradé (FR-Aur) and Lamasquère (FR-Lam) (Figure I-3). Those two sites belong to the Integrated Carbon Observation System (ICOS) network [<https://www.icos-ri.eu/>] for observations of surface fluxes (CO₂, latent and sensible heat fluxes). The region has a temperate climate, with an annual mean precipitation of approximately 655 mm and an annual mean temperature of 12.9°C

(measured by Météo France at the Toulouse-Blagnac station between 1961 and 1990; see <http://www.infoclimat.fr/climatologie/index.php>). Agricultural activity occupies almost 90% of the landscape, and winter wheat is the main cultivated crop (covering approximately 20% of the total surface area). Sown from mid-October until the beginning of December, winter wheat is harvested from mid-June until the end of July, and straw is usually incorporated into the soil.

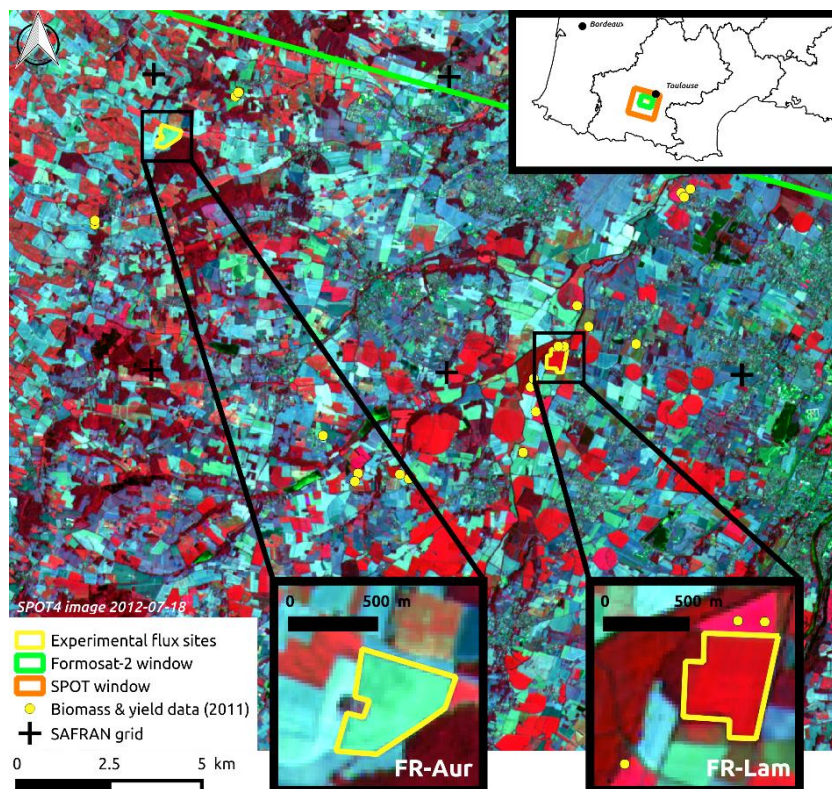


Figure I-3 : The upper right corner shows the location of the study site in southwestern France, as well as the footprint of Formosat-2 (green square) and Spot (orange square) images (in 2014 and 2012, respectively). The SPOT-4 false color image used as the background shows the flux sites of FR-Aur and FR-Lam (zoomed areas), the network of fields sampled for biomass and yield during the 2011 field campaign (yellow points), and the SAFRAN meteorological grid (black crosses).

4.3.1.1. Soil characteristics

The nature of the soils of the study area is shaped by the Garonne River. The Garonne River flows from the South to the North on the east side of the study area. It has spread sediments over a 15 km wide area along its western side resulting in vast terraces of heterogeneous soils called “boulbènes” and “terrefort” characterized by low-permeability and composed of a silt layer of variable thickness over stony clay soils. The geology is old quaternary and the main lithology is old alluviums. The area west of the terraces is characterized by a hilly landscape, consisting of hills and slopes resulting from the erosion of the oldest terraces. Further west the landscape is hilly over hundreds of kilometres and the soils become more calcareous with deposits formed of marl and clayey molasses with limestone.

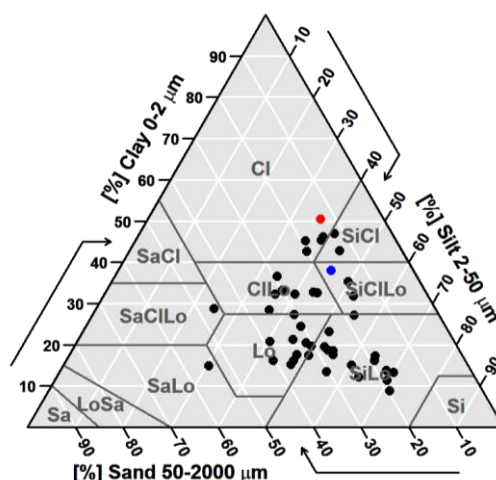


Figure I-4 : Surface texture measurements (FR-Lam in red, FR-Aur in blue and field campaign in black) displayed on USDA classification, with the following classes: clay (CI), silty clay (SiCl), sandy clay (SaCl), clay loam (ClLo), silty clay loam (SiClLo), sandy clay loam (SaClLo), loam (Lo), silty loam (SiLo), sandy loam (SaLo), silt (Si), loamy sand (LoSa), sand (Sa).

The heterogeneous character of the soils of the study area is illustrated (Figure I-4) by the texture measurements (fractions of clay, silt and sand) collected on the flux sites and on a network of fields within the footprint of the satellite images during the year 2018 (see also <https://soilgrids.org/> for predicted soil classification of the study area). The texture measurements are presented within the USDA triangle (United States Department of Agriculture, Figure I-4). With fractions between 9 and 50% for the clay, between 25 and 72% for the silt and between 12 and 55% for the sand, the observed contents cover wide ranges of each component. On average, the texture is composed of 48% of silt and 26% of clay and sand, illustrating the dominance of silt fraction within the study area. FR-Lam soil is more clayey than the FR-Aur one and thus less permeable. As FR-Lam is located on the terraces near a river flood can occur after heavy rainfall. As the FR-Aur site is located on a hillside, its soil is heterogeneous and its depth vary from 1 to more than 2 m.

4.3.2. In situ data

The FR-Aur and FR-Lam sites have been intensively monitored since 2005. Micrometeorological, meteorological, soil and vegetation measurements are performed since then (see Béziat et al., 2009 for more details). Both sites have similar climatic conditions but different soil properties (see I.4.3.1.1), topography and agricultural management practices. Winter wheat was cultivated throughout 8 cropping years, 2005-2006, 2009-2010, 2011-2012 and 2013-2014 at FR-Aur and 2006-2007, 2008-2009, 2010-2011 and 2012-2013 at FR-Lam. To facilitate the reading of this paper, we will identify each site-year by the three first letters of the site followed by the harvest year (*e.g.*, AUR2006 for the site-year 2005-2006 at Auradé).

The FR-Aur field (23.5 ha) is located on a hillside area near the Garonne River terraces and is characterized by a rapeseed/winter-wheat/sunflower/winter-wheat rainfed rotation that only receives mineral fertilizers. Only the grain is exported. The FR-Lam field (23.8 ha) is part of an experimental farm for milk and chicken production owned by the Purpan engineering school EIP (Ecole d'Ingénieurs de Purpan). It is characterized by a maize/winter-wheat rotation that is used to feed livestock and provide litter. Therefore, nearly all aboveground biomass is exported as grain and straw for winter wheat, and irrigated maize is harvested when it is still green for silage. Both organic and mineral fertilizers are applied.

A field campaign was conducted in June-July 2011 in 16 winter wheat fields to obtain spatially distributed in situ biomass and yield data (referred to as the '2011 field campaign'). The selection of fields was based on the analysis of the intra- and inter-field variability of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI derived from the Formosat-2 and SPOT optical images of April) to monitor a wide range of vegetation development. Crop biomass and yield measurements were performed just before the harvest.

Table I-1 : Overview of the in situ data collected from 2005 until 2014, agricultural practices (dates of sowing harvest, etc.), and presence and type of vegetation during the fallow period. F: provided by farmer, D: destructive measurements.

Year	Site/ESU	Date of sowing	Date of harvest	Vegetation after harvest (nature)	GAI	Biomass	Grain yield	Flux and meteorological measurements
2006	AUR	27/10/2005	29/06/2006	Yes (weeds/re-growth)	9	9	F	Yes
2007	LAM	18/10/2006	15/07/2007	No	11	11	F	Yes
2009	LAM	19/11/2008	13/07/2009	Yes (weeds)	8	8	F	Yes
2010	AUR	19/11/2009	12/07/2010	No	5	5	F	Yes
2011	LAM	03/11/2010	02/07/2011	Yes (re-growth)	5	5	F	Yes
	Field Campaign	-	-	-	-	16	D	No
2012	AUR	21/10/2011	14/07/2012	No	5	5	F	Yes
2013	LAM	29/10/2012	22/07/2013	Yes (cover-crop)	5	5	F	Yes
2014	AUR	26/10/2013	10/07/2014	No	5	5	F	Yes

4.3.2.1. GAI, biomass and yield data

During the vegetative cycle, the crop development at the experimental sites was regularly monitored using destructive measurements of GAI and dry aboveground mass (DAM) (see Béziat, 2009 for protocol), while yield data were provided by the farmers that cultivate the two flux sites. Farmer's data are often a mean of the yield at several fields surrounding the instrumented sites.

During the 2011 field campaign, biomass and yield data were collected from 16 fields according to the VALERI sampling protocol [<http://w3.avignon.inra.fr/valeri/>]. The samples were collected from five homogeneous square subplots inside the 16 Elementary Sampling Units (ESUs) of 20×20 m². The subplots sampled in each ESU were located in the ESU centre and corners. For each subplot, 4 rows with lengths of 50 cm and an inter-row distance of 13 cm were collected, which resulted in a sampling surface area of 0.25 m². The samples were dried and weighed, and the destructive grain yield was measured after threshing. The mean and associated standard deviations of the five subplots were calculated for each ESU.

Table I-1 summarizes, for each year, the number and the kind of data that were acquired and it specifies if spontaneous regrowth, cover crop or weed development occurred or not after harvest for each year.

4.3.2.2. Flux and meteorological measurements

Turbulent fluxes of CO₂, water vapor (evapotranspiration and latent heat), sensible heat and momentum were measured continuously using the eddy-covariance (EC) method (Aubinet et al., 1999; Baldocchi, 2003; Moncrieff et al., 1997). The EdiRe software (Robert Clement, © 1999, University of

Edinburgh, UK) was used to calculate the turbulent fluxes. The NEE was calculated as the sum of turbulent CO₂ fluxes and changes in CO₂ storage under the EC devices. Flux filtering, quality controls and gap filling were performed following the CarboEurope-IP recommendations ([www.carboeurope.org], see Béziat et al., (2009) for more details). The NEE was partitioned into gross primary production (GPP) and ecosystem respiration (R_{eco}) components according to the method proposed by Reichstein et al., (2005) and adapted by Béziat et al., (2009) for croplands (a process that could lead to over- or underestimations of the two components of the NEE). During the periods of bare soil, the GPP was set to 0, and the measured NEE fluxes only represented the R_{eco} component. Finally, the net ecosystem production (NEP) was derived from the annual integration of the NEE values. Synchronously, the standard meteorological variables were recorded at each experimental site and included different radiation components (*i.e.*, direct and diffuse components of incoming global radiation). After pre-processing, the semi-hourly fluxes and meteorological data were integrated or averaged at a daily time scale to be consistent with the model time step. Note that because of instrument failure, there was a 3-month gap in the flux measurements at the beginning of 2011 at FR-Lam.

For the '2011 field campaign' simulations, the SAFRAN meteorological data produced by Météo-France (Durand et al., 1993a) are used. The SAFRAN data provide the air temperature, incoming global radiation, precipitation, and relative air humidity 2 m above the ground and the wind speed 10 m above the ground based on weather station measurements and modelling. The data are available every 6 h over an 8 km spatial resolution grid. The daily means of these climatic variables are calculated for each 2011 campaign field using bilinear interpolation. The other simulations are performed using the climatic data recorded at the instrumented sites.

During the studied years, the climatic conditions were very contrasted. The 2006-2007 cropping year was characterized by a mild winter resulting in strong vegetation developments while water stress occurred at the end of the 2005-2006 cropping season due to very low spring rainfall (86 mm at FR-Aur compared to 197 mm on average over all studied years, see Béziat et al., 2009). The 2008-2009 autumn was characterized by heavy rainfall (cumulated precipitation of 192 mm during 2009 fall at FR-Lam compared to 154 mm in average between 2006 and 2014 at the same site) following the sowing, delaying crop emergence and resulting in very low biomass and yield production. The 2009-2010 cropping year was close to average in terms of precipitations and temperatures except during winter as temperatures were below the average (5.1°C at FR-Aur compared to 6.6°C on average) and were negative during several days resulting in two cumulated weeks delaying the crop development. In 2010-2011, the winter and spring were very dry (precipitation of 93 and 103 mm at FR-Lam in winter and spring respectively compared to 169 and 208 mm on average) delaying, crop development while hot temperatures in spring (average temperature of 16.5°C at FR-Lam during 2011 spring compared to 15.7°C on average during this period between 2006 and 2014) accelerated the development and the senescence. The cropping season 2011-2012 was characterized by a cold winter (mean temperature of 5.9°C at FR-Aur compared to an average of 6.6°C) during which low precipitations occurred (86 mm instead of 162 mm on average). In 2012-2013 heavy rainfall during winter and spring (323 and 296 mm at FR-Lam in winter and spring) coupled with hot temperatures in summer (21.1°C compared to a mean of 20.5°C) led to high biomass production. Finally, the cropping year 2013-2014 was characterized by its warm winter (8.1°C against 6.6°C on average) allowing the crop to start early in the season.

4.3.3. Satellite data and products

4.3.3.1. Multi-satellite optical images

This study uses an extensive dataset of HSTR from several satellites. Because of the spatial and temporal resolution of this dataset, and also as the bands necessary for this study are available from

Sentinel-2 we consider that their combined use in this modelling exercise is representative of what could be achieved with Sentinel 2. Figure I-5 presents a chronogram of the satellite images used in this study between 2006 and 2014. The images from those different satellites were combined to better monitor crop development and to reduce the gaps between successive observations. Nevertheless, the presence of clouds and/or shadows reduced the number of useful images. For instance, only one cloud-free SPOT image (April 26th) was available from mid-February until mid-June 2008; consequently, this site-year was not processed in the present study.

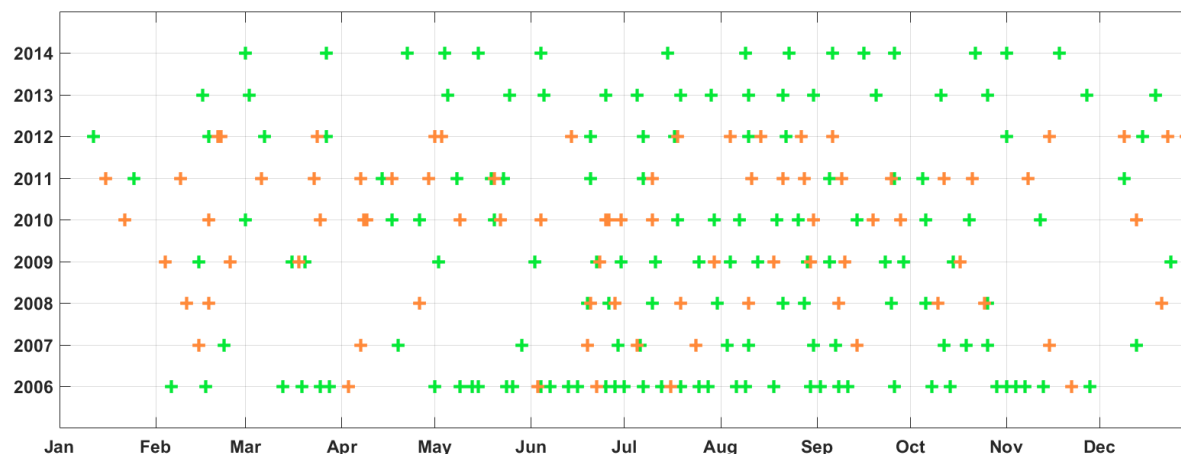


Figure I-5 : Timeline of the images acquired by Formosat-2 (green) and SPOT-2/4/5 (orange).

The high spatial resolution images provided by Formosat-2 (F2, 155 images) and Spot-2/4/5 (80 images) were in the optical domain (multispectral mode). The F2 images were characterized by a spatial resolution of 8 m (footprint of 24×24 km²) and were acquired at the same viewing angle ($\pm 45^\circ$) in four narrow wavelengths (blue, green, red and near-infrared) (Chern et al., 2008). The SPOT images were characterized by spatial resolutions of 20 m (Spot-2/4) and 10 m (Spot-5) covering an area of 60×60 km². The images were acquired at two incidence angles (75° and 102°) in at least three wavelengths (green, red, and near-infrared), with the medium-infrared wavelength for SPOT-4/5 (Arnaud and Leroy, 1991).

Surface reflectances were derived from the satellite data using the KALIDEOS processing chain [<http://kalideos.cnes.fr>] for atmospheric, radiometric and geometric corrections. The mean geometric correction accuracy was close to 0.2 pixels (LaFrance, Lenot, Ruffel, Cao, & Rabaute, 2012), which is satisfactory for the surface area of the studied fields.

The combined use of images acquired by different satellites was important to increase the number observations per cropping year (see Figure I-5). The comparison of the reflectances or of the NDVIs derived from different sensors, including Formosat-2 and SPOT, acquired at close dates over various crops, had highlighted the good performances of the processing chain and the limited effect of the sensor type (Battude et al., 2016a; R. Fieuzal et al., 2017a).

4.3.3.2. From image reflectance to GAI estimates

The seasonal dynamic maps of GAI were derived from the surface reflectances using the BV-NNET tool (Biophysical Variables Neural NETWORK, Baret et al., (2007)), which consists of a trained artificial neural network (ANN) using the outputs of a radiative transfer model (PROSAIL Jacquemoud et al., (2009)). ANNs were first trained with the wide range of conditions estimated by the radiative transfer model. Then, the trained network was used to predict the GAI from satellite reflectances. The GAI estimates derived from F2 and SPOT reflectances were compared to non-destructive measurements

based on digital hemispherical photographs collected over a range of crops (Demarez et al., 2008b) and showed a determination coefficient of $R^2 = 0.86$ and an absolute root mean square error (RMSE) of approximately $0.5 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ (Veloso, 2014). Battude et al., (2016) also compared BV-NNET derived GAI from several satellites, including SPOT and Formosat-2. They showed very good correlation ($R = 0.92$ and $\text{RRMSE} = 23\%$) and performances that were similar to the ones found in the literature (Berjón et al., 2013; Bsaibes et al., 2009; Duan et al., 2014). The BV-NNET procedure did not include the aggregation of the leaves, which can lead to the underestimation of GAI during periods of strong vegetation development (Claverie et al., 2012b). GAI estimates were finally averaged considering all the pixels of the studied plots after the application of an offset of 10 m to avoid edge effects and to consider only the GAI of the considered crop.

4.4. Methodology

4.4.1. The SAFY-CO₂ model

The SAFY-CO₂ model (Figure I-6) was adapted from the SAFY model (Simple Algorithm for Yield Estimates; Duchemin et al., 2008) to simulate the components of the net CO₂ fluxes and the cropland annual carbon budget. SAFY is a daily time step crop model that simulates the temporal evolution of GAI, DAM and final grain yield (YLD) by considering two climatic input variables: incoming global radiation and mean temperature. This approach is based on Monteith and Moss's (1977) light-use efficiency theory, which links the production of the total DAM with the photosynthetically active portion of the solar radiation (PAR) absorbed by the plant. In SAFY, the ratio of photosynthesis to autotrophic respiration is assumed to be constant when estimating the DAM from the absorbed PAR (APAR). The SAFY model has been extensively used for the estimation of biomass and yield in contrasting climatic conditions and crop types (Battude et al., 2016a; Claverie et al., 2012b; Duchemin et al., 2008a, 2015a; Fieuzal et al., 2011a).

Conversely, in SAFY-CO₂, the GPP is first estimated as a function of the APAR. Then, the components of the biomass (above and below ground) and the corresponding components of the net CO₂ fluxes and annual carbon budget are calculated. In this section, the main formalisms and equations of the model are presented and the parameters are detailed in the tables. Each table summarized the notations, the values or the ranges and the methods for estimating the parameters for the winter wheat crop and the post-harvest vegetative events.

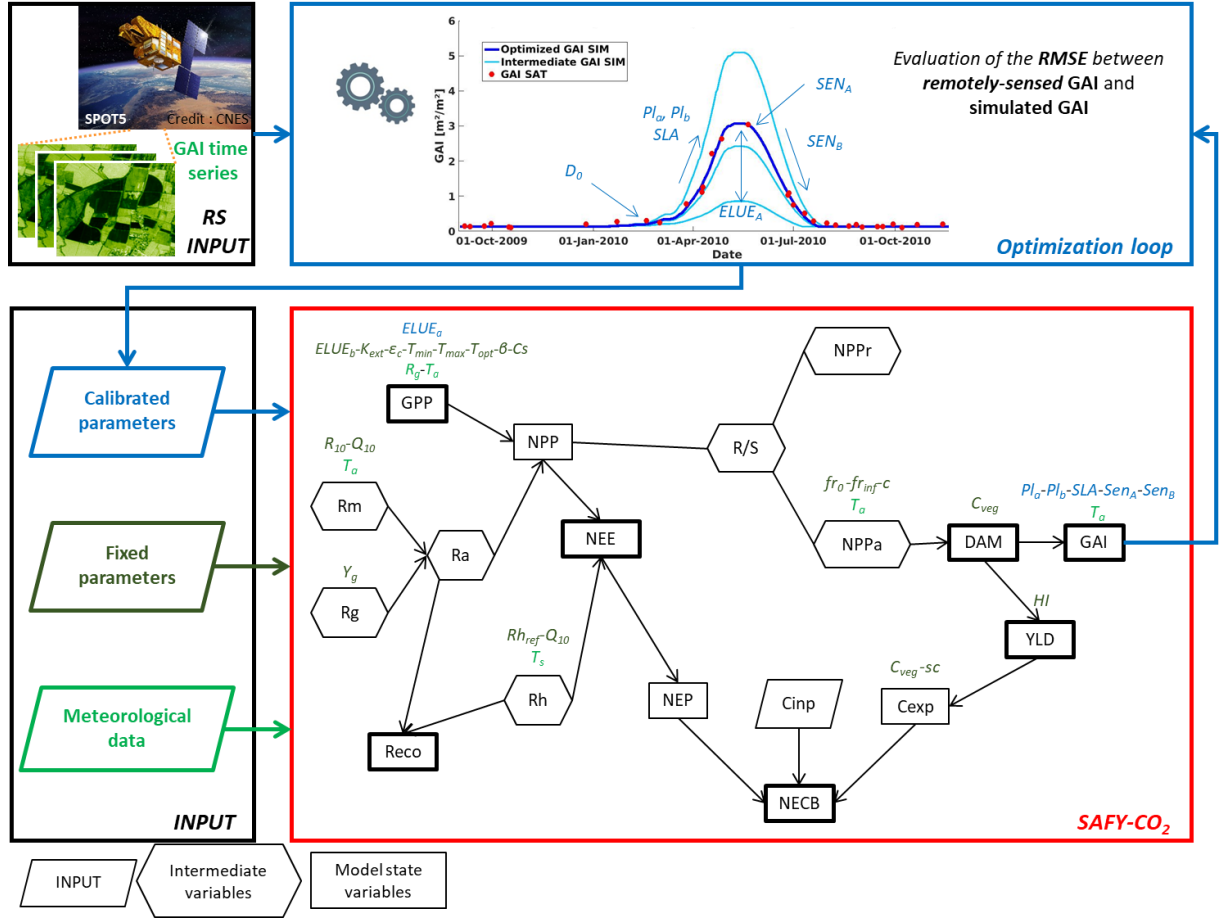


Figure I-6 : Schematic representation of the assimilation procedure of GAI derived from high resolution satellite optical images for the calibration of the agro-meteorological model SAFY-CO₂ by minimizing difference between satellite derived (SAT) and simulated (SIM) GAI. Also, the figure shows the procedure for estimating the crop biomass, the components of the net CO₂ fluxes (GPP, RECO, NEE) and the annual carbon budgets (NECB) over a cropping season (see Tables 2 to 6 and equations 1 to 11.3.1 for more details concerning the processes simulated and the parameters).

First, the model computes photosynthesis (GPP) [eq. I-1] as a function of the incoming global radiation (R_g), the climatic efficiency (ϵ_c), the fraction of APAR by the plant (f_{APAR}) [eq. I-1.1], the temperature stress function (f_T) [eq. I-1.2], the effective efficiency of the conversion of absorbed radiation to fixed CO₂ through plant photosynthesis (f_{ELUE}) [eq. I-1.3], and a multiplicative coefficient ($sR10$) [eq. I-1.4.1 and I-1.4.2], which takes into account the decline in canopy photosynthetic capacity during the senescence phase (see Béziat, 2009). $sR10$ is set to 1 until senescence begins [eq. I-1.4.1] and then defined as the ratio between the GAI of the previous day and the maximum seasonal GAI value multiplied by the corrective factor C_s . The senescence phase first acts on the lower portion of the plant (closer to the soil) and then acts on the higher canopy elements. Thus, the actual phenological senescence may be greater than the phenological senescence detected by satellite observations, which thus requires a corrective factor. Therefore, the C_s coefficient is included in the computation of $sR10$ to correct for the effects of senescence over simulated fluxes. The effects of diffuse global radiation over canopy photosynthesis are not always considered in crop models when estimating crop productivity. However, measurements, including the measurements at our flux sites, have indicated that the efficiency is very sensitive to the diffuse components of incoming global radiation (Béziat, 2009; Hollinger et al., 1998; Roderick et al., 2001). An effective light-use efficiency function is thus defined to account for the

fraction of diffuse global radiation (see I.4.4.2). Because diffuse incoming radiation R_{df} is not often measured in the field, the De Jong (1980) approach was used to estimate the R_{df}/R_g ratio over the study area from the top of the canopy and the top of the atmosphere radiation data.

$$GPP = R_g * \varepsilon_c * fAPAR * f_T(T_a) * fELUE * sR10 \quad I-1$$

$$fAPAR = 1 - \exp^{(-K_{ext} * GAI)} \quad I-1.1$$

$$f_T(T_a) = 1 - \left(\frac{T_{opt} - T_a}{T_{opt} - T_{min}} \right)^\beta \text{ for } T_{min} < T_a < T_{opt} \quad I-1.2.1$$

$$f_T(T_a) = 1 - \left(\frac{T_{opt} - T_a}{T_{opt} - T_{max}} \right)^\beta \text{ for } T_{opt} < T_a < T_{max} \quad I-1.2.2$$

$$f_T(T_a) = 0 \text{ for } T_a < T_{min} \text{ or } T_{max} < T_a \quad I-1.2.3$$

$$fELUE = ELUE_a * \exp^{(ELUE_b * \frac{R_{df}}{R_g})} \quad I-1.3$$

$$sR10 = 1 \text{ from sowing to senescence} \quad I-1.4.1$$

$$sR10 = \frac{GAI}{GAI_{max} * Cs} \text{ from senescence to harvest} \quad I-1.4.2$$

Table I-2 : List of SAFY-CO₂ model parameters for calculating the GPP.

Description	Notation	Unit	Value / Range	Method	Source
Climatic efficiency	ε_c	-	0.48	Literature	Varlet-Grancher (1982)
Light-interception coefficient	K_{EXT}	-	c	Literature	Veloso (2014)
Minimal temperature for growth	T_{min}	°C	0	Literature	Porter (1999)
Maximal temperature for growth	T_{max}	°C	37	Literature	Porter (1999)
Optimal temperature for growth	T_{opt}	°C	20	Literature	Porter (1999)
Polynomial degree	β	-	2	Literature	Duchemin (2008)
Corrective factor over GPP during senescence	Cs	-	1.2	In situ data	-
Effective light-use efficiency parameter A	$ELUE_a$	gC.MJ ⁻¹	[0.8-1.05] (winter wheat) [0.5-0.8] (post harvest vegetative events)	Calibration	-
Effective light-use efficiency parameter B	$ELUE_b$	-	1.34	In situ data	See supplementary material

The NPP is then derived from the difference between the GPP and the autotrophic respiration (R_a) [eq.I-2], which was separated into two components: maintenance respiration (R_m) and growth respiration (R_{gr}) (McCree, 1974) [eq. I-3]. R_m is calculated from the NPP of the previous day and a maintenance coefficient m_R [eq. I-3.1], which corresponds to the fraction of maintenance respiration per NPP unit. In this equation, R_{10} is the reference respiration at 10°C. R_{gr} is calculated using the method described by Amthor (1989) and improved by Choudhury (2000), as shown in eq. I-3.2. The constant Y_g is the growth conversion efficiency.

$$NPP = GPP - R_a \quad I-2$$

$$R_a = R_m + R_{gr} \quad I-3$$

$$R_m = NPP * m_R * sR10 \quad I-3.1$$

$$m_R = R_{10} * Q_{10}^{\left(\frac{T_a - 10}{10}\right)} \quad I-3.1.1$$

$$R_{gr} = (1 - Y_g) * (GPP - R_m) \quad I-3.2$$

Table I-3 : List of SAFY-CO₂ model parameters for calculating autotrophic respiration.

Description	Notation	Unit	Value / Range	Method	Source
Maintenance respiration parameter: Q_{10}	Q_{10}	-	2	Literature	Amthor (2000)
Maintenance respiration parameter: R_{10}	R_{10}	gC/g _{DM}	0.0025	literature	Béziat (2009)
Growth respiration conversion efficiency parameter	Y_g	-	0.74	Literature	Amthor (1989)

Finally, the total NPP is divided into root (NPP_r , [eq. I-4.1]) and aerial (NPP_a , [eq. I-4.2]) components, estimated by considering a root-to-shoot ratio (RtS) in accordance with the method proposed by Baret et al., (1992) [eq. I-5]. In this equation, SMT is the sum of temperature, D_0 is the emergence date and D_s is the first day of the spiking stage. fr_0 is the extrapolated value of the root fraction fr at emergence, fr_∞ is the asymptotic value of fr , and c is the relative rate of decrease. The DAM is estimated by dividing the NPP_a by the coefficient C_{veg} , which represents the plant carbon content [eq. I-6].

$$NPP_r = NPP * RtS \quad \text{I-4.1}$$

$$NPP_a = NPP * (1 - RtS) \quad \text{I-4.2}$$

$$RtS = fr = fr_\infty + (fr_0 - fr_\infty) * \exp\left(-c \left(\frac{SMT_{D_s}^{D_s} - SMT_{D_0}}{SMT_{D_s} - SMT_{D_0}}\right)\right) \quad \text{I-5}$$

$$DAM = \frac{NPP_a}{C_{veg}} \quad \text{I-6}$$

Table I-4 : List of SAFY-CO₂ model parameters for calculating the aboveground and the belowground mass.

Description	Notation	Unit	Value / Range	Method	Source
Root fraction parameters	$f_0 - f_{inf} - c$	-	0.63 / 0.11 / 1.48	Literature	Baret (1992)
Carbon content coefficient	C_{veg}	gC/g _{veg}	0.46 [20 st Oct-15 th Jan] (winter wheat)	Literature	Béziat (2009)
Day of plant emergence	D_0	day	[End of main crop-31 th Dec] (post-harvest vegetative events)	Calibration	-

Once the biomass computed, the grain yield and GAI can be estimated, as in the SAFY version. The GAI is the sum of the GAI of the previous day and the positive and negative change in GAI of the current day [eq. I-7]. Leaf production and leaf senescence are controlled by a growing degree-day approach. The positive increment [eq. I-7.1] is the product of a function of leaf partitioning [eq. I-7.1.1], the specific leaf area parameter and the daily DAM production. The negative increment, which is only evaluated from the beginning of senescence, depends on the two senescence parameters Sen_a and Sen_b [eq. I-7.2]. The grain yield estimation [eq. I-8] depends on the total biomass production at the end of the vegetative period (DAM_{max}) and a constant harvest index HI (see I.4.4.2).

$$\Delta GAI = GAI + \Delta GAI^+ - \Delta GAI^- \quad \text{I-7}$$

$$\Delta GAI^+ = \Delta DAM * Pl * SLA \quad \text{I-7.1}$$

$$Pl = 1 - Pl_a * \exp^{(Pl_b * SMT)} \quad \text{I-7.1.1}$$

$$\Delta GAI^- = GAI * \frac{SMT - Sen_a}{Sen_b} \quad \text{I-7.2}$$

$$Yield = DAM_{max} * HI \quad \text{I-8}$$

Table I-5 : List of SAFY-CO₂ model parameters for calculating the leaf biomass production, the yield and the senescence.

Description	Notation	Unit	Value / Range	Method	Source
Harvest index	HI	-	0.45	In situ data	Dai et al., 2006
Specific leaf area	SLA	m ² .g ⁻¹	[0.005 – 0.04]	Calibration	-
Partition-to-leaf function parameter A	Pl _A	-	[0.01-0.5]	Calibration	-
Partition-to-leaf function parameter B	Pl _B	-	[0.0001-0.02]	Calibration	-
Sum of temperature for senescence	Sen _A	°C	[1045-2000] (winter wheat) [100-900] (post-harvest vegetative events)	Calibration	-
Rate of senescence	Sen _B	°C.day ⁻¹	[10 ³ -2.10 ⁴]	Calibration	-

The NEE is calculated as the difference between the NPP and the carbon losses due to heterotrophic respiration (R_h) [eq. I-8]. R_h is calculated using a Q_{10} first-order exponential equation (Delogo, 2013). R_{href} is the reference respiration at 0°C, and $\exp^{b*10}$ is equal to Q_{10} .

The ecosystem respiration is defined as the sum of R_a and R_h [eq. I-10].

$$NEE = NPP - R_h \quad \text{I-8}$$

$$R_h = a * \exp^{b*T_s} \quad \text{I-9}$$

$$a = R_{href} \quad \text{I-9.1}$$

$$Q_{10} = \frac{Rh(T_s + 10)}{Rh(T_s)} = \frac{a * \exp^{b*(T_s+10)}}{a * \exp^{b*(T_s)}} = \exp^{b*10} \quad \text{I-9.2}$$

$$R_{eco} = R_a + R_h \quad \text{I-10}$$

Table I-6 : List of SAFY-CO₂ model parameters for calculating the heterotrophic respiration.

Description	Notation	Unit	Value / Range	Method	Source
Heterotrophic respiration parameter: R_{href}	R_{href}	gC.m ⁻² .d ⁻¹	0.34	Literature	Suleau (2011)
Heterotrophic respiration parameter: Q_{10}	Q_{10}	-	2.3	Literature	Suleau (2011)
Conversion factor of T_a into T_s	t	-	1.07	In situ data	-

4.4.2. Model parameterization and calibration

The parameters of the SAFY-CO₂ model are set using one of the following three options: i) literature sources, ii) multisite in situ measurements and iii) optimization using the time series of satellite-derived GAI. The parameters in the first two categories are set as equal for all of the investigated fields and years of study (see equations I-1 to I-10 and Tables I-2 to I-6), while the parameter of the third category are optimized. Parameter b of the exponential function in the relationships between $ELUE$ and R_{dt}/R_g [eq. I-1.3] is fixed to 1.34 based on field data (*i.e.*, CO₂ fluxes and meteorological data) acquired over several years for contrasting climatic, soils, and management conditions at 5 European instrumented sites, including ours (Lonze, BE; Auradé, FR; Grignon, FR; Lamasquère, FR; Oensingen, CH; see Supplementary Material). This parameter is set to a generic value to facilitate the large-scale application of the approach.

The parameters in the third category are set using an iterative minimizing method with a RMSE objective function between satellite-based GAI and SAFY-CO₂ GAI estimates. This procedure aims at determining the values of parameter “ a ” of the $fELUE$ function [eq. I-1.3] and 6 phenological parameters, *i.e.*, the day of plant emergence (D_0), the specific leaf area (SLA), the two parameters of the

partition-to-leave function (Pl_a , Pl_b), the sum temperature for senescence (Sen_a) and the rate of senescence (Sen_b).

The minimization procedure, applied to each simulations (*i.e.*, each cropping year and each field), is based on an adapted version of the Nelder-Mead simplex method (Lagarias et al., 1998), which considers a priori boundaries for each parameter to constrain the solutions within realistic parameter intervals. The minimization process runs the model, computes a cost function (in this case the RMSE derived from the comparison between the estimated and the remote sensed GAI) and iteratively updates the values of parameters to converge to the best parameter combination, coinciding with the lowest cost function value. To reduce the probability of local minima, a global approach is applied that runs the optimization process 30 times, with different *a priori* conditions for each parameter. A set of the parameters with the best solution is considered (*i.e.*, lower RMSE for the GAI estimates). The number of optimization runs is set to 30, based on a sensibility analysis, so that the best combination of parameters is always retrieved, while avoiding unnecessary runs.

The optimization process requires boundaries for the parameters to calibrate (Pl_a , Pl_b , Sen_a , Sen_b , SLA , $ELUE_a$, D_0). These boundaries are first estimated based on a literature review. Then, a sensitivity analysis of the model is conducted to adjust these boundaries using a grid search. The ranges of the parameters are discretized, and all possible combinations are simulated (more than 3 million simulations). Then, the outputs are compared to the outputs obtained by optimizations performed using the adapted simplex method described above and the same parameter boundaries. This comparison allows us to do the following.

- 1- Verify that the adjusted boundaries reproduce all plant development conditions, with the constraint of a limited dispersion in the outputs.
- 2- Validate the efficiency of the adapted version of the simplex in retrieving the best set of parameters.

Compared to SAFY, the SAFY-CO₂ version considers the biomass production of re-growth, weeds and cover crops (hereafter called post-harvest vegetative events) and their effect on the CO₂ fluxes and annual C budgets. Indeed, these post-harvest events can have an important impact on the NEE (Béziat et al., 2009a; Ceschia et al., 2010a; Poeplau and Don, 2015a) and thus on the NECB. Therefore, the model is adapted to simulate these events without the distinction of their nature (*i.e.*, spontaneous re-growth, weeds or cover crop).

In a first attempt to estimate the effects of post-harvest vegetative events on the net CO₂ flux components and ultimately on the annual NECB, the same parameterization considered for winter wheat is also considered for all post-harvest vegetative events. For the studied years, when the satellite-derived GAI indicates the presence of vegetation on the field after harvest (*i.e.*, AUR2006, LAM2009, LAM2011, and LAM2013), the model is first run to simulate the main crop. Then, a second optimization is performed on the vegetation following the main crop, optimizing $ELUE_a$ and the 6 phenological parameters. The boundaries of parameters Sen_a , D_0 and $ELUE_a$ are changed compared to those fixed for winter wheat, while the ranges of the 4 other parameters remain the same.

4.4.3. From daily net ecosystem CO₂ fluxes, NEE to the annual net ecosystem carbon budget, NECB

To compute the annual NECB [eq. I-11], carbon input (C_{inp}) and export (C_{exp}) terms are added to the annual cumulated NEE (*i.e.*, the NEP) [eq. I-11.1]. The NEP is the carbon absorbed or released by

the field (through photosynthesis and respiration processes) over a cultural year, a positive NEP indicates that cumulated soil and autotrophic respiration are higher than cumulated photosynthesis, meaning that the field loses carbon towards the atmosphere and vice versa. The value of NEP is computed from October 1st to September 30th because this period usually corresponds to the agricultural cropping year in Europe (Ceschia et al., 2010a). The term C_{inp} represents the amount of C that is brought to the field as organic fertilizer (only at FR-Lam in this study) and as seeds. Since C_{inp} could not be simulated, the C_{inp} values provided by the farmer as well as analysis of the organic fertilizer C content (Béziat et al., 2009a), were used to calculate the NECB at LAM.

C_{exp} generally corresponds to the yield [eq. I-11.2] in the study area, as typically, only grain is exported from the field (*e.g.*, FR-Aur). However, in some cases, straws are also exported from the field (*e.g.*, FR-Lam). From the perspective of regional-scale applications, this term ($straw_{exp}$) is estimated as a function of the total straw biomass ($straw_{tot}$), which corresponds to the final aboveground biomass (DAM_{max}) minus the final grain yield [eq. I-11.3]. The sc parameter [eq. I-11.3.1] is estimated from in situ data during the 2011 field campaign and set to 0.3.

$$NECB = NEP + C_{exp} - C_{inp} \quad \text{I-11}$$

$$NEP = \int_{1^{st} Oct}^{30^{th} Sept} NEE \quad \text{I-11.1}$$

$$C_{exp} = Yield * C_{veg} \quad \text{I-11.2}$$

$$C_{exp} = C_{veg} * (Yield + (DAM_{max} - Yield) * sc) \quad \text{I-11.3}$$

$$sc = \frac{straw_{exp}}{straw_{tot}} = \frac{straw_{exp}}{DAM_{max} - Yield} \quad \text{I-11.3.1}$$

4.4.4. Model implementation and validation strategy

The proposed approach requires several types of input data, which are taken into account at different stages of the modelling process or during the calculation of the carbon budgets. To run the model, meteorological data (R_g and T_{air}), soil parameters (heterotrophic respiration parameters) and plant parameters (some being fixed and some being calibrated (see Table I-2 to I-6 for more details) are needed. The model can simulate the output variables only with those information, however, in the absence of calibration process, the estimates are very likely to be erroneous. To correctly simulate the crop development and thus get meaningful outputs, the satellite derived GAI is used to calibrate Pl_a , Pl_b , Sen_a , Sen_b , $ELUE_a$, SLA and Do . Once the calibration process achieved, the parameters are set for each field and climatic year allowing to reproduce the vegetation dynamic (GAI, DAM, YLD) as well as the CO_2 fluxes (GPP, R_{eco} , NEE). Because at this stage, only remote sensing data and crop maps are needed, the approach can be up-scaled easily. Nevertheless, assessing carbon budgets demand additional data that are not easily available at plot scale over large areas yet. The two additional input data needed are: the amount of C imported (C_{inp}) to the plot (as seeds and eventually as organic amendments), and an information on whether straw are exported from the plot or not. These two inputs allow to estimate the NECB [eq. I-11].

The validation strategy relies on different types of datasets. Concerning the GAI, the comparison of the model output with the satellite derived GAI is not really a validation since the later is used to calibrate the model but rather a verification of the model's ability to reproduce vegetation dynamic. To evaluate the performances of the model to simulate biomass, data from the instrumented ICOS flux sites and from the 2011 field campaign are considered. For yield validation, only the results from the 2011 field campaigns are presented (covering a range of values from 1.87 to 8.93 t.ha⁻¹) as the annual yields provided by the farmer at the two instrumented sites may be averages of several fields from the farm

and therefore present high uncertainties (see Béziat et al., 2009). These validations are presented in section I-4.5.1.1.

To evaluate the performance of the model in terms of CO₂ flux simulations we used the data from the two ICOS sites (FR-Lam and FR-Aur). The use of very contrasted climatic years and management regimes at FR-Lam and FR-Aur (see section I.4.3.2.2) makes our validation approach more robust. Those results are presented in section I-4.5.1.2.

Among the objectives of the present study, assessing annual carbon budget is the most challenging. Indeed, the performances of the model to simulate both the NEP and the amount of biomass exported at harvest must be quite high to compute NECB as those two terms are usually of opposite sign and partly compensate each other. A small absolute error on one of those two terms will end up in a large absolute error on the NECB. Section I-4.5.2.1 presents the ability of the model to reproduce the cumulated NEE, which leads to the NEP. Then sections I-4.5.2.2 and I.4.6 present and discuss, respectively, the capability of the model to assess the NECB.

4.5. Results

4.5.1. Evaluation of the overall model performances

4.5.1.1. GAI, DAM and yield estimates

Figure I-7 shows an overview of the statistical performances of the model in estimating GAI and DAM by comparing the estimates with satellite-derived GAI and destructive biomass measurements for the FR-Aur (even-numbered years) and FR-Lam (odd-numbered years) sites in the 8 cultivation years. In addition, Figures I-8a and I-8b present scatter plots of these two variables, distinguishing observations performed during the entire studied period (2006-2014) at the two flux sites and measurements collected during the 2011 field campaign. At the flux sites, the GAI relative root mean square errors (RRMSEs, *i.e.*, RMSE normalized by the mean observed value) range between 6 and 24% (for the years 2014 and 2007, respectively), while the determination coefficients (R^2) are between 0.919 and 0.998 (for the years 2009 and 2014, respectively, Figure I-7). When also considering fields from the 2011 campaign (Figure I-8a), the GAI is reproduced by the model with a very high R^2 (0.97) and with almost no bias (0.004 m².m⁻²). The magnitude of this performance confirms that the model allows the correct interpolation of the GAI derived from remote sensing, as has already been demonstrated in previous studies (Duchemin et al., 2015a; Fieuzal et al., 2011a; Hadria et al., 2010a).

On average, the model also reproduces the DAM with good precision. When considering all investigated fields across the studied years (Figure I-8b), the RMSE, RRMSE and R^2 were 201 g.m⁻², 26.6% and 0.90, respectively. These performances are consistent with those achieved using the SAFY model (maize and sunflower had RMSEs of 252 and 145 g.m⁻², respectively, and RRMSEs of 24.7 and 39.1%, respectively, in Claverie et al., 2012), as well as the performances of other models such as the APSIM-wheat model (Asseng et al., 1998a) and STICS (Brisson et al., 2002a), which estimated winter wheat biomass with R^2 of 0.90 and 0.78, respectively, and RMSEs of 0.101 and 0.266 kg.m⁻², respectively. Nevertheless, the performances are more scattered when analysing annual statistics (Figure I-7). Indeed, the DAM RRMSE values are between 11 and 39.2% (for the years 2007 and 2013, respectively), while the R^2 values are between 0.945 and 0.998 (for the years 2012 and 2006, respectively). In general, the modelling approach tends to underestimate the highest biomass values at the end of the season (observed at LAM2011, AUR2012, LAM2013 and AUR2014). The highest levels of errors, for the DAM in 2012 and 2013, correspond to the strongest vegetation developments of 1960 g.m⁻² and 2298 g.m⁻², respectively, reached at the end of the crop season. Those DAM underestimations

are caused by the underestimation of the effective GAI produced by BV-NNET for the highest values since the clumping effect is not accounted for (Claverie et al., 2012a). This issue will be further discussed in Section I.4.6.2.

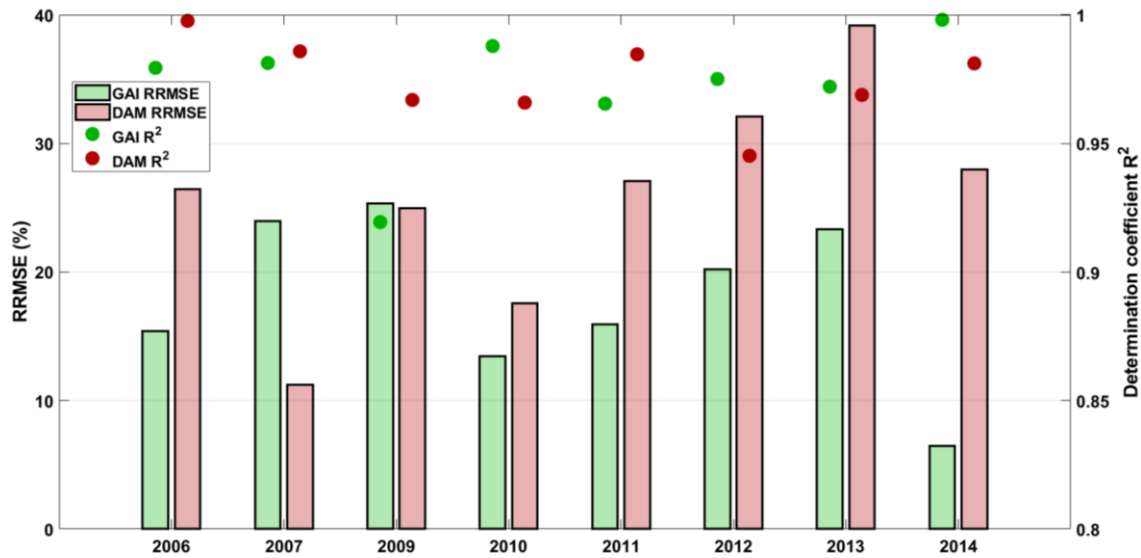


Figure I-7 : Statistical performances (relative root mean square errors and coefficients of determination correspond to the bars and dots, respectively) associated with the estimation of the GAI (green) and DAM (red) for winter wheat at the Auradé (even-numbered years) and Lamasquère (odd-numbered years) sites.

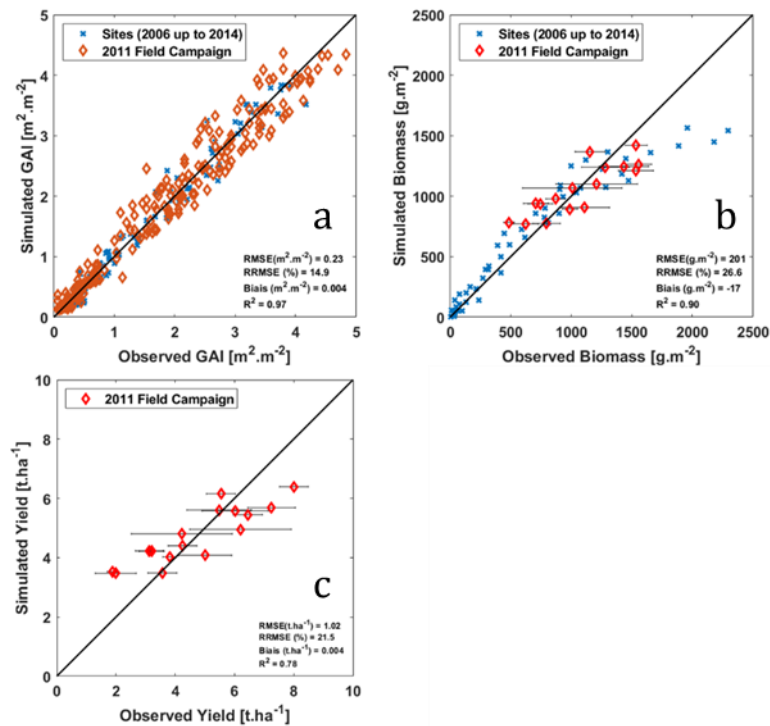


Figure I-8 : Comparison between the observed and the estimated crop variables (GAI, DAM and yield) over the crop period. Sites refer to FR-Lam and FR-Aur.

On average, yields (only data from the 2011 field campaign are analysed here, see I.4.5.1.1) are estimated with good precision ($RMSE=1.02 \text{ t.ha}^{-1}$, $RRMSE=21.5\%$, $R^2=0.78$), but underestimations are observed for the highest observed values. These underestimations are directly related to the DAM underestimations described above, as yield is estimated as a fraction of the final biomass. Nevertheless, the yield-estimation performances of SAFY-CO₂ are similar to those of SAFY (Duchemin et al., 2008a) and STICS (Brisson et al., 2002a) for wheat, with R^2 values of 0.64 and 0.65, respectively, and RMSEs of 0.5 and 1.6 t.ha^{-1} , respectively.

4.5.1.2. Components of the net CO₂ fluxes: daily GPP, R_{eco} and NEE

In this section, the components of the net CO₂ fluxes simulated by SAFY-CO₂ are compared to the measured NEE at the FR-Aur and FR-Lam flux sites and with the GPP and R_{eco} estimated following the partitioning of NEE. For the 8 investigated cropping years, the model performances are evaluated in terms of the error (RMSE) and correlation (R^2) (see Figure I-9). These statistical parameters are also calculated for the following periods of each cropping year (see Figure I-10):

- 1- From the beginning of the cropping year (October 1st) until the emergence of the crop
- 2- From the emergence of the crop until the maximum vegetation
- 3- From the maximum vegetation until harvest
- 4- From harvest until the end of the cropping year (September 30th)

4.5.1.2.1. GPP estimates

When considering the whole vegetative periods (*i.e.*, crop development and post-harvest vegetative events) of the 8 site-years, the simulated GPP dynamics agree well with the measurements, showing R^2 values between 0.82 (LAM2011) and 0.94 (LAM2007) and RMSEs between 1.34 (LAM2009) and 2.39 (LAM2011) $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$.

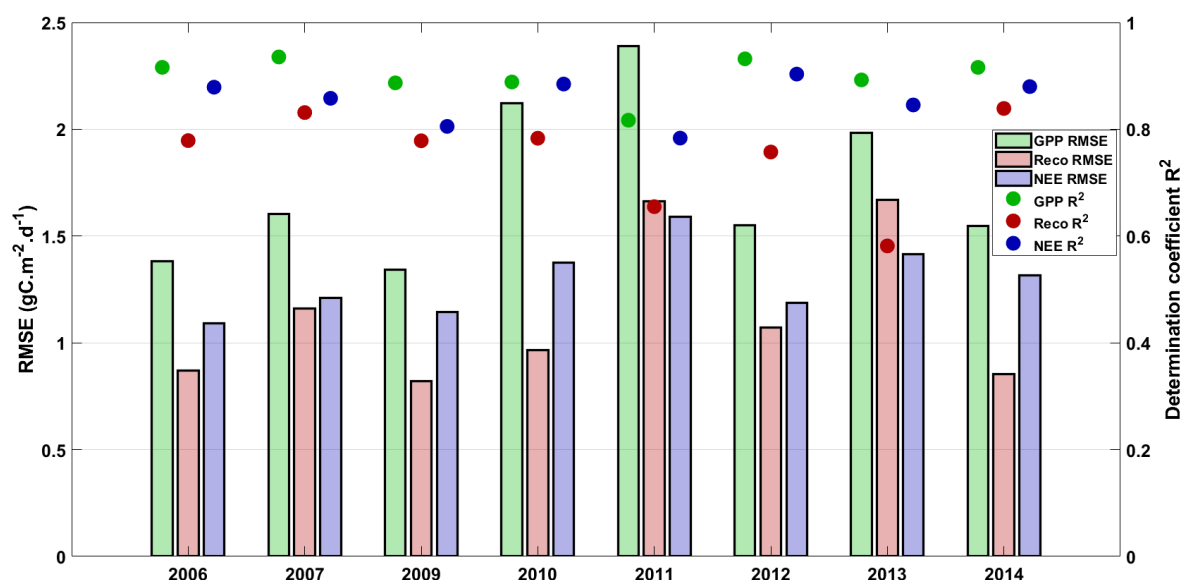


Figure I-9 : Statistical performances (root mean square errors and coefficients of determination are bars and dots, respectively) associated with the estimations of the daily GPP, R_{eco} and NEE for the 8 winter wheat cropping years (October 1st to September 30th) at FR-Aur (even-numbered years) and FR-Lam (odd-numbered years).

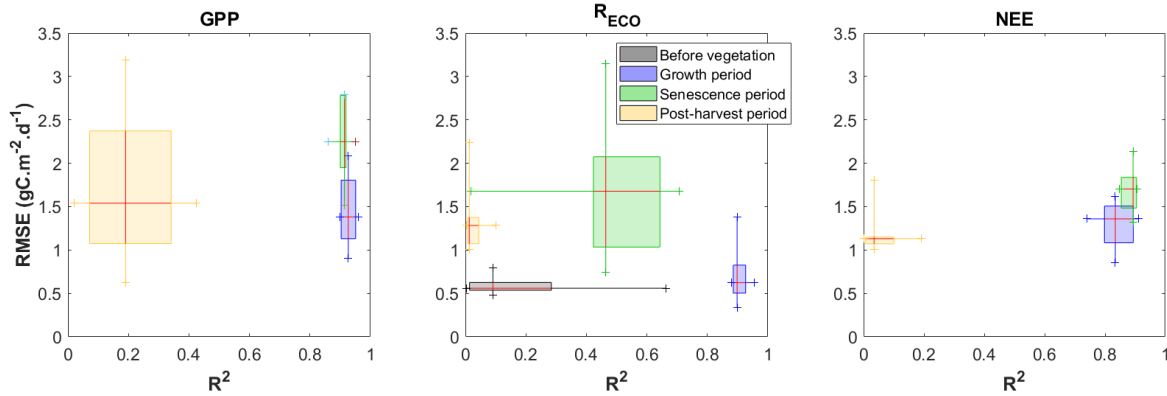


Figure I-10 : Boxplot of the pluriannual determination coefficients (R^2) and the pluriannual root mean square errors (RMSEs) of the simulated GPP, R_{eco} and NEE in the before-crop, crop-growth, crop-senescence, and post-harvest periods for the 8 cropping years of winter wheat at AUR and LAM. Only the years with post-harvest vegetative events (2006-2009-2011-2013) are considered for the boxplot of the post-harvest GPP.

In 2011, however, the simulated GPP during crop development showed poor statistics. A strong development of vegetation occurred in early 2011, while no flux data were recorded between January 1st and March 31th. Consequently, the CO_2 fluxes were gap filled, and thus, the simulated GPP is underestimated over this period, leading to low R^2 and high RMSE values.

During crop development (growth and senescence, excluding post-harvest vegetative events), the simulated GPP shows R^2 values between 0.86 and 0.96 and RMSE values between 0.90 and 2.79 $gC.m^{-2}.d^{-1}$. These periods are well reproduced by the model, the growth period shows slightly better performances than the senescence period. This trend can be explained by two phenomena: i) the underestimation of the simulated GPP during senescence due to the abovementioned limits of remote-sensed GAI (underestimation due to saturation effects) coupled with the potential lack of remote sensing observations, which prevents the correct reproduction of GPP during the senescence phase and ii) the presence of weeds growing inside the senescent crop (the understory vegetation often observed at FR-Lam), which are undetectable by the satellite but still impact the flux measurements (see *Temporal Evolution* of LAM2013).

Considering the post-harvest period, only site-years with significant vegetative events are considered (*i.e.*, weeds for AUR2006 and LAM2009, spontaneous crop re-growth for LAM2011 and cover crops for LAM2013). The values of the R^2 between the simulated and observed GPP are lower during this period than during the crop development period for several reasons. First, at this stage, the same parameterization as the winter wheat parameterization is used for simulating the different types of post-harvest vegetative events (except concerning the parameters calibrated based on GAI satellite estimates – see section I.4.4.2). Second the post-harvest vegetation is characterized by higher spatial heterogeneity than winter wheat, leading to likely divergence between observed and simulated CO_2 fluxes. Indeed, the footprint of the EC system is probably not fully representative of the entire field simulated by the model. Nevertheless, the overall performances of the model always increase when post-harvest vegetative event are considered.

4.5.1.2.2. Reco estimates

Overall, the ecosystem respiration follows the same dynamics as the GPP but in an attenuated way (*i.e.*, the differences between bare-soil and vegetative periods are smaller). The simulated R_{eco} dynamics are in good agreement with the observations, as shown in Figure I-9. The annual RMSE values

range from 0.82 (LAM2009) to 1.67 (LAM2013) $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, and the R^2 values range from 0.58 (LAM2013) to 0.84 (LAM2014).

The mean annual performances of the model in estimating R_{eco} are lower than those in estimating GPP but are consistent with other studies that aim to estimate ecosystem respiration in agricultural fields. Zhan et al. (2019) found R^2 values between 0.84 and 0.87 and RMSEs between 1.52 and 1.65 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ for a maize-soybean system, while Lohila et al., (2003) estimated the total ecosystem respiration of barley with a simple soil temperature-dependent model with good precision (R^2 between 0.71 and 0.79). A more detailed analysis of our results shows that the R_{eco} is always well estimated during the crop growing periods, showing R^2 values between 0.88 and 0.95, while the statistical performances are lower in other periods than in the crop growing period (Figure I-10). One explanation for this difference is that the formulation for estimating heterotrophic respiration is too simplistic to reproduce some of the processes occurring in the soil, especially after harvest. This issue will be further discussed in Section I.4.6.2.

Additionally, for GPP, the presence of weeds growing inside the senescent crop, which is hardly detectable by the considered satellite but still impacts flux measurements (see the temporal evolution of LAM2013 in section *temporal evolution*), cannot be considered in our modelling approach. On the other hand, the good performances during the crop growing periods indicate that the model accurately reproduces autotrophic respiration, which can represent 80% of the R_{eco} during the crop season (Béziat, 2009). The modelled R_{eco} estimates are thus satisfactory considering the simplicity of its representation as well as the limited number of inputs in this crop modelling approach.

4.5.1.2.3. NEE estimates

The daily dynamics of the NEE are well reproduced by the SAFY- CO_2 model even when GPP and R_{eco} are underestimated, since the errors of the two components compensate for each other (either because the partitioning process overestimates the in situ data or because the model underestimates the crop development, which affects both GPP and R_{eco}). The model that shows good performances over the cropping year in terms of errors and correlations, with RMSEs between 1.09 (AUR2006) and 1.59 (LAM2011) $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ and R^2 values between 0.78 (LAM2011) and 0.90 (AUR2012). The model achieves better performances during the vegetative stages than during fallow periods (as is the case for GPP and R_{eco} due to the reasons mentioned above).

In order to compare the performances of SAFY- CO_2 to simulate NEE with other agronomical or land surface models, our results were confronted to those presented by Wattenbach et al., (2010). In their study, they compared the performances of DNDC (Li et al., 2005, 1994, 1992), ORCHIDEE-STICS (de Noblet-Ducoudré et al., 2004; Gervois et al., 2008b), SPA (Williams et al., 1996) and CERES-EGC (Gabrielle et al., 2006; Lehuger et al., 2009) in reproducing the GPP, R_{eco} and NEE for several site-years, including the AUR2006 crop season. SPA and SAFY- CO_2 outperformed the other approaches by reproducing the dynamics of the cumulated NEE, with R^2 values of 0.993 and 0.995, respectively. In terms of errors, SAFY- CO_2 and CERES-EGC showed the lowest RMSEs, 33.6 gC.m^{-2} and 44.16 gC.m^{-2} , respectively.

4.5.1.2.4. Temporal evolution

We decided to show the performances of SAFY- CO_2 in simulating the time courses of the GPP, R_{eco} and NEE for three contrasting site-years (AUR2006, LAM2009 and LAM2013) among the eight cultivation years. The objectives here are i) to identify potential sources of errors in the GPP and R_{eco} estimates that can affect the NEE and the net annual CO_2 fluxes (NEP) and therefore the NECB estimates, ii) to verify whether the proposed approach is robust for varying soils, management practices

and climatic years and iii) to analyse the potential of this approach to simulate contrasting post-harvest vegetative events.

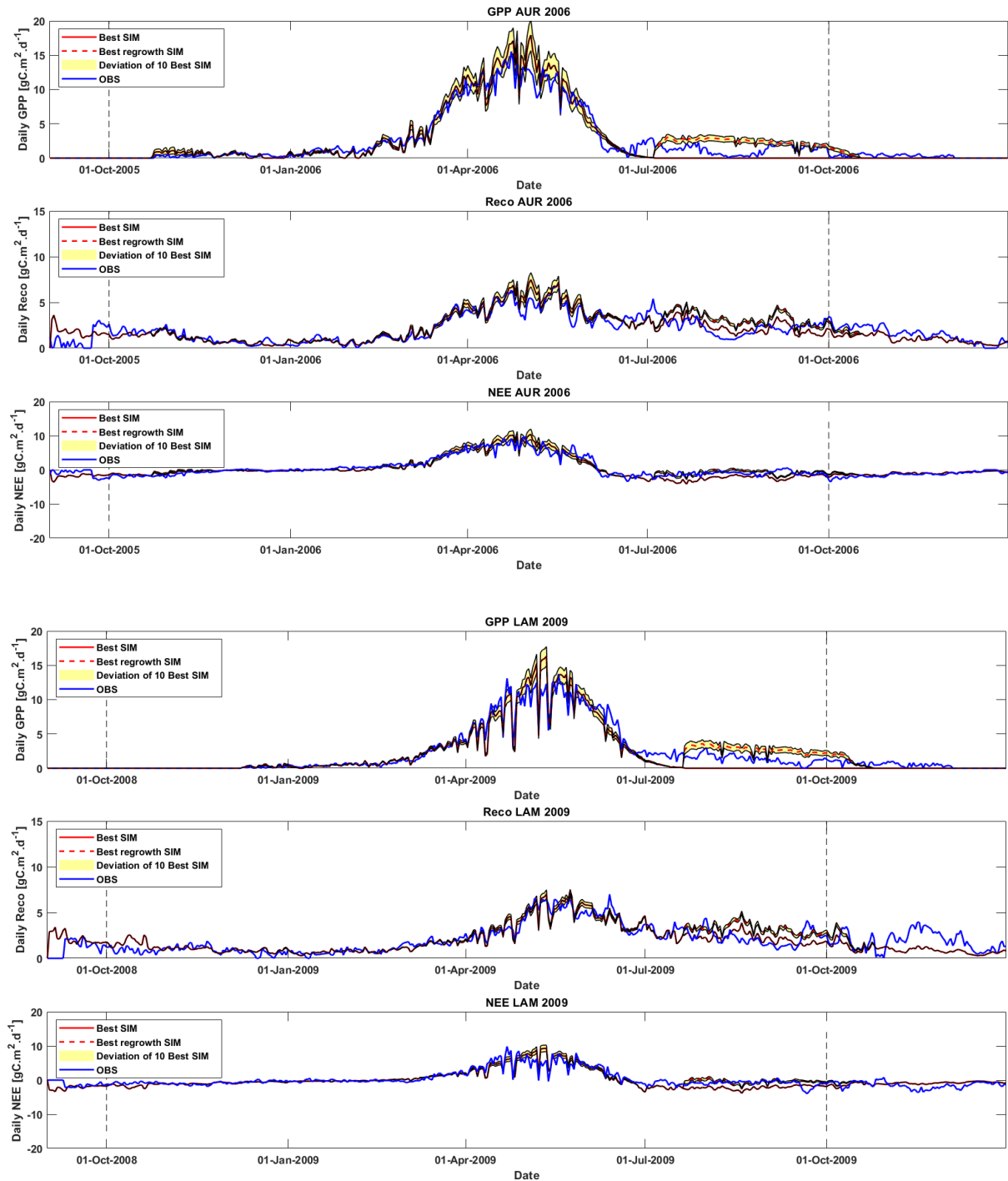


Figure I-11 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red or red dashed lines) GPP, R_{eco} and NEE for 2 site-years (AUR2006 and LAM2009). The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for re-growth and weed events. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year.

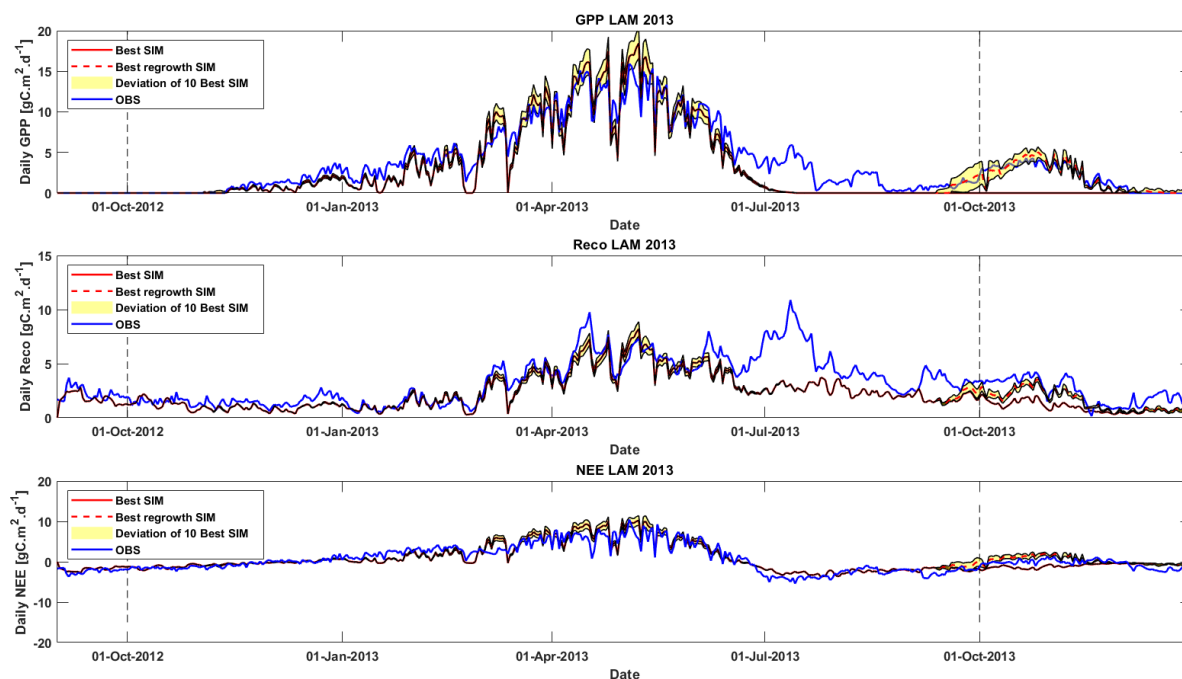


Figure I-12 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red or red dashed lines) cumulated GPP, R_{eco} and NEE for LAM2013. The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for the cover crop. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year.

- Auradé 2006

The 2006 cropping year at FR-Aur (grain farm) is characterized by very clear sky conditions and strong radiation, little precipitation in spring (23.4, 29.7 and 32.8 mm of rain during April, May and June, respectively, in 2006; in contrast, the monthly means in these months over the 8 years of the study and both sites are 64.1, 61.1 and 95.4 mm, respectively) and several re-growth/weed events occurring after harvest. For this site-year (Figure I-11), the model correctly reproduces the GPP and the R_{eco} in terms of errors (RMSEs of 1.38 and 0.87 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, respectively) and dynamics (R^2 of 0.92 and 0.78, respectively). Consequently, the NEE for this year is accurately estimated (RMSE and R^2 of 1.09 and 0.88, respectively). Nevertheless, the modelled GPP is slightly overestimated after maximum development and at the beginning of senescence (Figure I-11). This overestimation could be related to the water stress conditions observed after the maximum GAI was reached (Béziat et al., 2013) that cannot be fully considered by the model. Moreover, spontaneous re-growth and weeds developed twice after harvest. The first event led to increases in the observed GPP and R_{eco} just after harvest and was interrupted by soil work on July 31. The second vegetative event occurred from mid-August until late September 2006 and was interrupted by soil work on September 29. In a first attempt, we simulate only one vegetation cycle after harvest, so the two events are simulated as one (see red dashed line in Figure I-11); as a consequence, GPP and R_{eco} are overestimated. NEE estimates during this period are improved (RMSE from 1.22 to 0.93 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) by accounting for weed/re-growth development.

- Lamasquère 2009

The 2008-2009 cropping season at FR-Lam (milk and chicken production farm) was characterized by strong rains in November and December that saturated the soil, causing poor emergence and late winter wheat development. Additionally, weeds developed before harvest during the winter wheat senescence. The GPP dynamics for LAM2009 are well reproduced, with an R^2 of 0.89. Additionally,

R_{eco} and NEE present R^2 values of 0.78 and 0.81, respectively, over the cultivation year. The errors of the GPP, R_{eco} and NEE are also low, showing RMSE values of 1.34, 0.82 and 1.14 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, respectively. However, during May 4, peaks are observed in measurements (13 days in total) that are not reproduced by the model. This divergence between simulated and observed GPP comes from the underestimation of the fELUE for days with high radiation and very clear sky conditions. After harvest (from mid-July to mid-September), the presence of weeds in the field is highlighted by the measured GPP dynamics. As for 2006, the dynamics and the range of the simulated post-harvest GPP and R_{eco} are not correctly reproduced by the model since the parameterization is the same as that for winter wheat, and many phenomena are not considered (*i.e.*, priming effect, nitrogen or water stress, etc.). Nevertheless, accounting for weeds in the model allows a better estimation of the NEE (RMSEs decreasing from 1.7 to 1.14 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).

- Lamasquère 2013

We present the results of FR-Lam over the LAM2013 cropping year because it is the only site-year during which a cover crop was grown. Indeed, in 2013 at FR-Lam, after the harvest of the winter wheat, white mustard was sown on the 21st of August and incorporated in the soil on the 4th of December. Unlike re-growth and weed development, the development of the cover crop is rather homogeneous in the field and follows a growing cycle that is correctly reproduced by the model, in addition to the CO_2 fluxes (RMSE = 0.68 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ and $R^2 = 0.88$ for GPP; RMSE = 1.14 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ and $R^2 = 0.62$ for NEE).

LAM2013 is also marked by an early winter wheat development that benefited from good climatic and soil conditions for emergence. Therefore, the final biomass is high (2298 g.m^{-2}) compared to that of other years (mean and standard deviation over the 8 studied years: 1566 $\pm$ 453 g.m^{-2}). This site-year is also characterized by weeds that developed during the senescence of winter wheat. These weeds could not be observed by the considered satellites, and the model was not able to simulate their effects on the CO_2 fluxes (particularly on the GPP and the R_{eco}) observed just before and after harvest. The difference between the observed and simulated NEE dynamics is small, either because the “observed” GPP and R_{eco} partly balanced each other or because the increases in the “observed” R_{eco} and GPP are caused by errors in the NEE partitioning process.

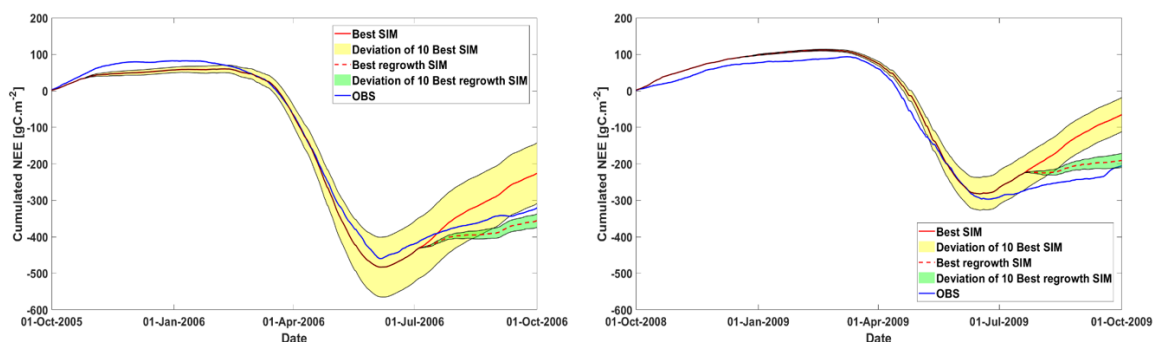


Figure I-13 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red and red dashed lines) daily values of the GPP, R_{eco} and NEE for 2 site-years: a) AUR2006 and b) LAM2009. The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for re-growth and weed events. The yellow envelope represents the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (*i.e.* smaller GAI RMSE).

4.5.2. From the cumulated NEE to yearly carbon budget

4.5.2.1. Analysis of the cumulated NEE dynamics

For the sake of conciseness, the analysis of the temporal behaviour of the cumulated NEE focuses on the same site-years (*i.e.*, AUR2006 and LAM2009). These values are presented from October 1st until September 30th of the following year because this period corresponds to the agricultural cropping year in our area. The analysis of the cumulated NEE dynamics measured by the flux towers and modelled by SAFY-CO₂ allowed for the identification of the CO₂ net assimilation and release phases (Figure I-13). A negative slope in the cumulated NEE curve (*i.e.*, corresponding to net assimilation, with $GPP > R_{eco}$) is observed during the growing season and during crop re-growth or weed or cover crop development. A positive slope (*i.e.*, corresponding to CO₂ release, with $GPP < R_{eco}$) is observed during the bare-soil periods and the senescence stages.

The modelled cumulated NEE for AUR2006 slightly diverges from the observations before the growing season because of the underestimation of the simulated R_{eco} during this period. The effect of the overestimation of the GPP at the end of the growing stage and beginning of the senescence stage (as discussed above) leads to an underestimation of the maximum simulated cumulated NEE value.

Finally, the slope becomes positive after harvest (when there is no more GPP). The modelled cumulated NEE is well estimated when re-growth and weeds considered (red dashed line) and diverges when they are not considered in the model (red solid line).

In 2009, the simulated cumulated NEE matches well with the observations before and during the vegetative period. Indeed, over this period, the model reproduces the GPP and the R_{eco} well, leading to a good estimation of the NEE. After harvest, not considering weeds causes the model to diverge from the observations, as in 2006, while modelling post-harvest vegetation development attenuates this bias (even if the simulated weed growth starts later here than on the field).

When the post-harvest vegetative events are simulated, the difference between the observed and the simulated NEP is improved from 95 and 140 gC.m⁻² to 33 and 16 gC.m⁻² for AUR2006 and LAM2009, respectively.

These results emphasize the need to include the effects of re-growth events, weeds and cover crops in the model because they represent non-negligible contributions to the NEP, which in turn could have an important impact on the final annual NECB values.

4.5.2.1.1. Carbon budget over 8 agricultural seasons of winter wheat

The NECB model estimates and its components (NEP, C_{exp}) are compared with those of the eight site-year measurements (Table I-7). In this table, the effects of post-harvest vegetative events on NEE and NECB are considered. For FR-Lam, the C_{inp} is prescribed for the calculation of the modelled NECB, as the amount of C input as organic manure cannot be estimated by remote sensing. Also, C_{inp} corresponding to the amount of seeds brought to the plots are prescribed for both sites (even if very small compared to the other terms). The NEP values estimated by SAFY-CO₂, which vary from -191 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2009) to -486 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2011), are generally close to the measured values, which vary from -208 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2009) to -410 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2011). Table I-7 shows that for all site-years, winter wheat is a CO₂ sink, and the model is able to reproduce the inter-annual variability in this sink activity. The years showing the largest difference in terms of NEP are AUR2014, AUR2012 and LAM2013, with differences of 30%, 24% and 22%, respectively, compared to observations. For AUR2014, this difference can be explained in different ways. First, the senescent phase is not well reproduced by the model because only one satellite image was available during this period, leading to

an overestimation of the GPP. Second, after harvest, an increase in R_h is observed and is not reproduced by the model. This is due to the incorporation of straw into the soil, which leads to an increase in the soil microbial activity. The difference observed for AUR2012 is partly due to two post-harvest increases in R_h (priming effect) that could not be reproduced by the model. The first event, occurring at the beginning of July, was induced by rainfall. The second event followed ploughing that occurred at the beginning of August. Moreover, the NEP values of two of the three site-years where significant re-growth vegetative events occurred (during the cultural year) are better estimated once the re-growth is considered. Indeed, for AUR2006 and LAM2009, the differences between the simulated and observed NEP values are -30 and -68%, respectively, before taking re-growth into account and +10 and -7.8%, respectively, after taking re-growth into account. For LAM2011, NEP is first underestimated (-21%) and then overestimated (+19%).

Table I-7 : Annual net ecosystem carbon budgets (NECB) and their components (NEP, C_{inp} , C_{exp}) derived from the in-situ (OBS) and modelled (SIM) data for 8 site-years. Uncertainties on observations are also shown (for more details see Béziat et al., 2009).

Site-Year	NEP				Cinp	Cexp				NECB				
	SIM	OBS	Diff	Diff	OBS	SIM	OBS	Diff	Diff	SIM	OBS	Diff	Diff	
	[gC/m ² /yr]			[%]	[gC/m ² /yr]	[gC/m ² /yr]			[%]	[gC/m ² /yr]			[%]	
AUR2006	-355	-322 ± 20	-33	10	-6.25 ± 1.88	270	216 ± 56	54	25	-94	-113 ± 60	19	-17	
LAM2007	-302	-371 ± 33	69	-19	-389 ± 95.4	387	322 ± 29	65	20	-304	-439 ± 105	135	-31	
LAM2009	-191	-208 ± 19	17	-8	-150 ± 45	293	279 ± 25	14	5	-48	-78 ± 55	30	-38	
AUR2010	-253	-301 ± 47	48	-16	-6.25 ± 1.88	253	204 ± 53	49	24	-6	-102 ± 71	96	-94	
LAM2011	-486	-410 ± 45	-76	19	-166 ± 49.8	400	355 ± 32	45	13	-252	-221 ± 74	-31	14	
AUR2012	-362	-293 ± 34	-69	24	-6.25 ± 1.88	326	223 ± 20	103	46	-41	-76 ± 40	35	-46	
LAM2013	-421	-345 ± 32	-76	22	-178 ± 53.4	436	488 ± 40	-52	-11	-163	-36 ± 74	-127	355	
AUR2014	-316	-243 ± 34	-73	30	-6.25 ± 1.88	285	214 ± 67	71	33	-31	-29 ± 75	-2	6	
SIM vs. OBS All Sites	RMSE [gC/m ² /yr]		61		-	RMSE [gC/m ² /yr]		61		RMSE [gC/m ² /yr]		77		
	RMSE [%]		-19.7			RMSE [%]		21.3		RMSE [%]		-56.1		
	R ²		0.58			R ²		0.83		R ²		0.66		

The analysis of the amount of carbon exported from the ecosystem at harvest (C_{exp}) shows that this amount varies considerably from one site-year to another. The simulated C_{exp} varies from 253 gC.m⁻².yr⁻¹ (AUR2010) to 436 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2013), while the observations range from 204 gC.m⁻².yr⁻¹ (AUR2010) to 488 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2013). C_{exp} values are often larger at FR-Lam than at FR-Aur due to the export of grain and straw and the model tends to overestimate the C_{exp} . The differences between the observations and model estimates of C_{exp} vary between 5% and 46%. However, the comparison of the modelled C_{exp} and the observed C_{exp} should be performed with caution since the precision of the yield provided by the farmer is questionable (especially at the Lamasquère site where most of the straws are exported) since those values are averaged over several fields of the farm (see section I.4.5.1.1). For this reason, Béziat et al. (2009) concluded that the uncertainty of in situ C_{exp} is often higher than the uncertainty of the NEP at our sites. For AUR2012, for instance, the C_{exp} estimated from the farmer's data is 223 gC.m⁻².yr⁻¹, while our destructive measurements encompassing over 30 subplots of 3.75*10⁻² m² in the field suggest a C_{exp} of 406±53 gC.m⁻².yr⁻¹. When analysing the performance of the model against our own destructive field samples, the model generally performs much better (see Figure I-8b and I-8c). This indicates that our modelling approach may perform better for estimating C_{exp} (and therefore NECB) than what is presented in Table I-7.

The NECB estimated from in situ data or from SAFY-CO₂ characterize all of the site-years as carbon sinks. The modelled NECB estimates vary from -304 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2007) to -6 gC.m⁻².yr⁻¹ (AUR2010), while the in situ NECB estimates vary from -439 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2007) to -29 gC.m⁻².yr⁻¹ (AUR2014). The FR-Lam site-years present the greatest variations between years, and the carbon inputs (NEP + C_{inp}) are stronger than those of FR-Aur, partly because of organic fertilization.

As shown in Table I-7, the relative differences between the modelled and in-situ NECB vary from 6% (AUR2014) to 355% (LAM2013). In absolute terms, these differences vary from 2 gC.m⁻².yr⁻¹ (AUR2014) to 135 gC.m⁻².yr⁻¹ (LAM2007) but the sign of NECB is always similar between both approaches. Regarding all simulated years, the model shows RMSE of 77 gC.m⁻².yr⁻¹. Note however that, the modelled NECB match to that observed for five simulated years out of eight if the uncertainties are considered. Indeed, the uncertainties on the in-situ NECBs (derived from uncertainties on the observed NEP, C_{inp}, C_{exp}) range from 40 to 105 gC.m⁻².d⁻¹. These results highlight the importance of precisely estimating each of the terms that compose the NECB to obtain accurate estimations of the annual crop carbon budgets (both with the in-situ and the modelling approaches).

4.6. Discussion

4.6.1. Performances and benefits of our approach

In this study, our objective is to evaluate the potential of high resolution GAI products assimilation into a simple crop model for simulating the biomass, the yield, the net CO₂ fluxes components and the annual C budget of winter wheat crops at plot scale. The main advantage of this approach is that it requires few input data and little or no external information about management practices. Also, even with a limited number of equations and parameters compared to more complex crop models that require data on management practices, SAFY-CO₂ achieves equivalent or better performances regarding estimates of key components of the C budget: CO₂ fluxes, biomass and yield (see sections I-4.5.1.1 and I-4.5.1.2).

Next, we demonstrated the ability of the model to reproduce winter wheat dynamics, production and CO₂ fluxes under contrasted climatic and management conditions with the same parametrization. It shows the ability of such a remote sensing driven diagnostic approach (*e.g.* for calculating GPP) to account implicitly for the main stresses (N, drought, temperature...) and the main crop development limiting factors.

Finally, our methodology allows accounting for the effect of post-harvest spontaneous re-growth, weeds and cover crops on the CO₂ fluxes. As showed by Ceschia et al., (2010) this is essential for estimating accurately cropland C budgets and only remote sensing based approaches allow characterizing the dynamics and the spatial heterogeneity of the various post-harvest vegetative events. Therefore, in spite of a generic parameterization of the SAFY-CO₂ model for those post-harvest vegetative events, the overall performances of the model for simulating CO₂ fluxes and C budgets always increase when they are accounted for. The performances should improve thanks to the higher temporal resolution of the Sentinel missions. Next step could be to apply a specific parametrization, depending on the nature of those events or on their species composition (*e.g.* for cover crops), provided that the information is given by the farmer or can be retrieved by remote sensing (*e.g.* through cover crop classification).

4.6.2. Potential limitations of this approach and drawbacks for large scale application

The first main limitation of this approach based on optical remote sensing is that gaps in optical remote sensing observations during crucial periods of the crop development could lead to wrong estimates of the GAI dynamics, biomass and CO₂ fluxes or could even make our approach inoperative (*e.g.* in 2007-2008). Fortunately, recent Sentinel 2 satellite missions provide observations at high spatial resolution (10m) every 5 days all over the globe which could partially solve this problem. Also, it was

shown that the combined use of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite data, like Sentinel 1, can overcome this issue (see Ameline et al., 2018; Baup et al., 2019; Betbeder et al., 2016; Remy Fieuzal et al., 2017; Revill et al., 2013). Indeed, the signal of the SAR satellites is not affected by clouds and they can even observe the surface at night. Another limitation of this optical remote sensing approach is that it cannot detect understorey vegetation (*e.g.* weeds) and their effect on the CO₂ fluxes. Here again SAR data may overcome this issue as microwave signal are associated to deeper penetration capabilities (compared to optical reflectance), depending on the considered wavelength, and providing a valuable information on vegetation structure and water content (Brown et al., 2003).

The second main limitation of this approach concerns the availability of plot scale information regarding straw management and organic fertilization. Those practices cannot be detected or quantified by remote sensing at this stage and therefore the uncertainty on the C budgets estimates in areas where animal farming occurs is high. This issue may be overcome in the future if data from the Farm Management Information Systems (FMIS) become more easily and more widely accessible. Another limitation for applying our approach concerns the size and the shape of the agricultural plots. As mentioned above, the contours of the plots must be eroded so that the signal is not influenced by surrounding landscape elements. Thus, we consider that for plots below 0.5-1 ha, GAI products may not be of good enough quality to apply our approach. Also, high resolution GAI and crop maps are needed in our approach. In Europe, the latter can be obtained via the Land Parcel Identification System (LPIS) and both data inputs should be available in a near future via the High Resolution Layers Copernicus Land Monitoring Service (<https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers>). The last limitation of our approach is that it cannot be used for forecasting, since it is based on satellite observations, although it is possible to test the effect of some scenarios on the C budgets (*e.g.* accounting or not for the effects of the post-harvest vegetative events or for the impact of exporting or not the straw from the plot).

Of course, the question of the transposability of our approach and of its domains (spatial and temporal) of validity should be considered with caution. Indeed, the current parametrization of the SAFY-CO₂ model is adapted to the pedoclimatic conditions where it has been set and it should be adapted to other crop species. Also, the boundaries of the calibrated winter wheat phenological parameters are set for our pedoclimatic conditions. Applying this approach to areas where winter wheat has different periods of emergence and senescence would require to redefine those boundaries (*e.g.* in Northern countries). Note however that 1) the future High Resolution Phenology Copernicus Land Monitoring Service should provide, all over Europe since 2017, the dates of emergence and end of the growing for the crops and cover crops at plot scale for each cropping year by the end of this year and that 2) the transposability of the original SAFY model has already been tested in contrasted pedoclimatic conditions (France, Mexico and Morocco; see (Claverie et al., 2012; Duchemin et al., 2015, 2008; respectively) and for different crop species (corn, soybean, sunflower and wheat).

Also, the parametrisation of the Q₁₀ based approach for estimating heterotrophic respiration is well adapted to the type of soils and climates similar to the ones found in our area of study but it should probably be adapted to other soil types (*e.g.* organic or sandy soils) and climatic conditions. Still, with a similar approach, Delogu et al., (2017) obtained good R_h estimates (RMSE comprised between 0.15 and 0.73 gC.m⁻².d⁻¹ and R² between 0.42 and 0.92 depending on the site) over contrasted pedoclimatic conditions. Another potential issue concerning our approach relates to the simplistic method for estimating R_h which should be considered as a first step for estimating R_h. In the future, this method could be improved, with little changes in the formalisms, by considering a R₁₀ parameter that depends on top soil slow carbon content as it is proposed in Delogu et al., (2017). Another step of improvement could be to account for the priming effect following the incorporation of fresh organic matter into the

soil (Kuziyakov et al., 2000a). Indeed, with our modelling approach we could already estimate the amount of crop residues, cover crop, weeds and spontaneous re-growth incorporated in the soil. However, accounting for the effect of organic fertilization is not an option at this stage, since this kind of information is not yet available at plot scale over large areas. For similar reasons, we did not account for the effect of soil work on soil respiration and also because it was shown that it has no significant effect on soil respiration (Eugster et al., 2010b) and no clear effect on SOC mineralisation (*e.g.* in Dimassi et al., 2014; Powlson et al., 2016; Virto et al., 2012). Also, a potential drawback of our approach for estimating R_h is that the effect of the soil water content is not accounted for. As for the SAFY model (Battude et al., 2017a; Duchemin et al., 2015a), we have already tested the coupling of a soil water module (FAO56; Allen et al., 1998) to the SAFY-CO₂ model (see Veloso, 2014). Such a coupling allows accounting for soil water content effects on photosynthesis and on heterotrophic respiration, and requires that accurate data concerning soil properties (*e.g.* texture, depth) at the plot scale are available. Unfortunately, the current products mapping soil properties (*e.g.* GlobalSoilMap, SoilGrids) either have a too coarse resolution for our area of study (250 m, for SoilGrids) or have too little accuracy to meet the needs of a SAFY-CO₂ – soil water module coupled approach at plot scale (*e.g.* the performances of GlobalSoilMap in France are $R^2 = 0.27$ and $RMSE = 128 \text{ g.kg}^{-1}$ for clay content). Therefore, in the perspective of up-scaling our current approach for estimating annual cropland C budgets, we chose to rely only on currently available and sufficiently accurate data at plot scale. This is the reason why we chose a simple Q_{10} approach for estimating heterotrophic respiration at this stage. Of course, if this choice is likely suitable for plot scale annual C budget estimates, at crop rotation scale or over longer periods of study, the coupling of the SAFY-CO₂ model with a soil organic matter model (*e.g.* RothC, Coleman and Jenkinson, 1996; AMG, Saffih-Hdadi and Mary, 2008) should be considered. Such a step would benefit from 1) the improvement of the current soil products (*e.g.* GlobalSoilMap) which could be achieved by developing the current methods of inversion based on high resolution multi-spectral or hyperspectral remote sensing data (see Castaldi et al., 2019; Vaudour et al., 2019) and 2) from an easier and more systematic access to the FMIS data.

Another limitation of our modelling approach is that it tends to underestimate the highest biomass values at the end of the season and therefore also the yield, impacting the C budgets estimates. These underestimations may be partly due to the underestimation of satellite-derived GAI (Claverie et al., 2012a). In such a context, the assimilation of both GAI derived from optical images and dry biomass estimated from SAR images into the agro-meteorological model overcomes the limitation, as presented by Betbeder et al., (2016) in the specific case of soybean. Furthermore, taking into account the clumping effect in radiative transfer model would make it possible to limit the underestimation of GAI values (derived from optical images) when vegetation becomes dense.

Still, we show that, within the limit of its domain of application, our approach was able to reproduce correctly the GAI, biomass and CO₂ flux dynamics and it was able to estimate the NEP with a satisfactory level of accuracy. The relatively large error of prediction on the C budgets (mean RMSE of $77 \text{ gC.m}^{-2}.\text{yr}^{-1}$ and rRMSE of 56 %) has to be tempered considering the uncertainties on the NECB calculated from the in-situ data. Indeed, besides the inherent uncertainties on the NEP associated to measurements errors and data processing, there is a strong uncertainty on the in-situ C_{exp} term for the two ICOS sites as mentioned previously. Considering the resulting uncertainties on the in-situ NECB, we conclude that the modelled NECB match the observations for five years out of eight. Also, section 4.1.2.4 showed that the model was able to estimate the yield with a rather good precision, suggesting that the error on the NECB could be reduced when comparing our estimates with in-situ NECB calculated with more accurate yield data. Still, even if SAFY-CO₂ provided accurate estimations of the annual components of the NECB we cannot claim at this stage that the model can reproduce accurately

carbon budgets, especially over the long term. More accurate in-situ data, a larger dataset of validation and/or simulations on longer periods evaluated against estimates of soil C stock changes based on soil analysis would be needed to conclude.

Of course, other approaches allowing to estimate carbon budget exist, such as soil organic matter models which are designed to simulate the evolution of soil C stocks. The two most widely used and validated SOM are Roth-C (Coleman and Jenkinson, 1996) and CENTURY (Parton et al., 1987). Those models estimate soil C stock changes have been evaluated against long term experiments. Contrary to the proposed approach, they need information about soil texture, management practices or residue quality. Their relative error in estimating soil C stock changes is comprised between 2-30% (Falloon and Smith, 2006; Guo et al., 2007; Smith et al., 1997) for Roth-C model and between 1.8-16.4% for CENTURY (Cong et al., 2014; Falloon and Smith, 2003). These results, which are more accurate than those achieved with SAFY-CO₂ model should be tempered by the fact that they represent two different approaches, requiring different input and designed for different purposes and time-scales.

Also, as in other studies (Ceschia et al., 2010b; Schmidt et al., 2012) our results showed that for all cropping years the plots behave as a net CO₂ sinks and our results concerning the potential C storage of winter wheat crop are consistent with other studies (*e.g.* Aubinet et al., 2009; Ceschia et al., 2010). In addition, our results show that, in soils with low SOC content, post-harvest vegetative events (*e.g.* cover crops) increase soil organic carbon storage which is consistent with other studies (Kaye and Quemada, 2017; Pellerin et al., 2019; Poeplau and Don, 2015; Tribouillois et al., 2018).

Finally, in spite of the limitations and potential drawbacks of this approach, it seems to be a good compromise for estimating the components of the annual C budgets over large areas at this stage and we think that it offers great perspectives of development and applications at large scale thanks to the new satellite missions and Copernicus services.

4.7. Conclusion

In this work, we demonstrate the potential of high-resolution remote sensing data assimilation in a semi-physical crop model (SAFY-CO₂) to successfully provide estimates of some of the main components of cropland annual carbon budgets (*i.e.*, net CO₂ flux components and yield). While this modelling approach is promising because it requires few input parameters and no management data for estimating crop production and net CO₂ fluxes, this approach should be considered a first step for filling the gap in obtaining spatially explicit representation of the main components of cropland carbon budgets at the regional scale for a crop rotation or longer. Indeed, the main limitation of this approach is that, in areas concerned with animal farming, the calculation of the carbon budget requires data on i) organic amendments and ii) the fraction of straw exported at harvest, which presently cannot be retrieved by remote sensing at this stage. The second main limitation relates to the fact that the simple Q₁₀ based approach for estimating heterotrophic respiration does not allow us to estimate accurately the C budget for periods longer than the cropping year. For longer periods of study, the benefit of coupling our model with a soil module should be investigated. Another limitation concerns the availability of satellite observations, since our approach is data driven. However, because of recent HTRS satellite missions (Sentinel 2 and Landsat-7&8), this type of approach could be generalized and more accurate and robust. Synthetic aperture radar satellites (*e.g.*, Sentinel 1) could also be used to overcome cloudy conditions (Veloso et al., 2017). In addition, our results show that the performance of the model in estimating net CO₂ fluxes and thus C budgets are significantly improved by considering the development of weeds and crop re-growth after harvest. These events, as well as the presence of cover crops in crop rotations, are

rarely or never accounted for in regional or global modelling of CO₂ fluxes, although they significantly impact cropland carbon budgets.

In the perspective of future global-scale applications, our approach could be strengthened (validated for a wider range of climates and management regimes) and extended to other crops by using data from international flux networks (*e.g.*, ICOS and FLUXNET) and from recent HTRS satellite missions.

4.8. Supplementary material

4.8.1. Effect of diffuse radiation on the ELUE

The fraction of diffuse radiation affects photosynthesis (Béziat et al., 2009a) and should be accounted for when simulating GPP. Furthermore, because the photosynthetic rate of leaves is usually saturated under high incoming radiation, leaves with lower irradiance will be more efficient than those with higher irradiance, and a reduction in the volume of shade leaves within the canopy should result in an increase in the efficiency of the canopy in the presence of low and diffuse radiation (Roderick et al., 2001). Thus, the photosynthetic efficiency is expected that to increase as the diffuse solar radiation increases. To quantify this effect, we used data from 5 European flux sites, including the Lamasquère and Auradé sites. The 3 other sites were Lonzée (LON) in Belgium, Grignon (GRI, located near Paris) in France and Oensingen (OEN) in Switzerland. For all sites, the ELUE increased non-linearly with the ratio of diffuse over total global radiation (Fig. I-14). As a consequence, the relationship between the effective light-use efficiency and the ratio between diffuse and direct radiation at ground level was defined as an exponential function, with parameter “b” fixed to 1.34 and parameter “a” calibrated based on the assimilation of GAI derived from satellite observations. The relationship seemed relatively generic; the correlation coefficient of the regression was 0.63.

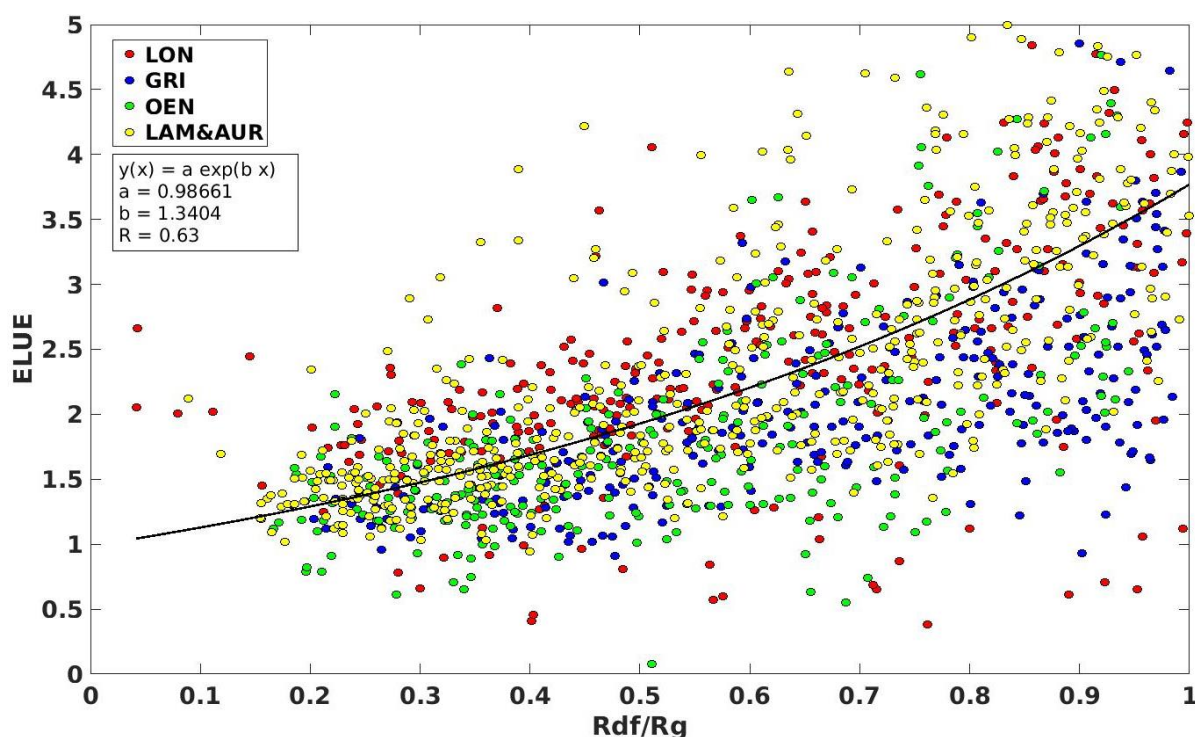


Figure I-14 : Relationship between the ELUE and the ratio between diffuse (Rdf) and global (Rg) radiation measured at 5 European flux sites (Lonzée, Grignon, Oensingen, Lamasquère & Auradé).

4.8.2. Temporal evolutions of the in-situ and simulated net CO₂ flux components

The purpose of this section is to compare the temporal evolutions of in-situ and simulated CO₂ fluxes (GPP, R_{eco}, NEE and cumulated NEE) at FR-Lam and FR-Aur for the site years discussed in the text but not shown.

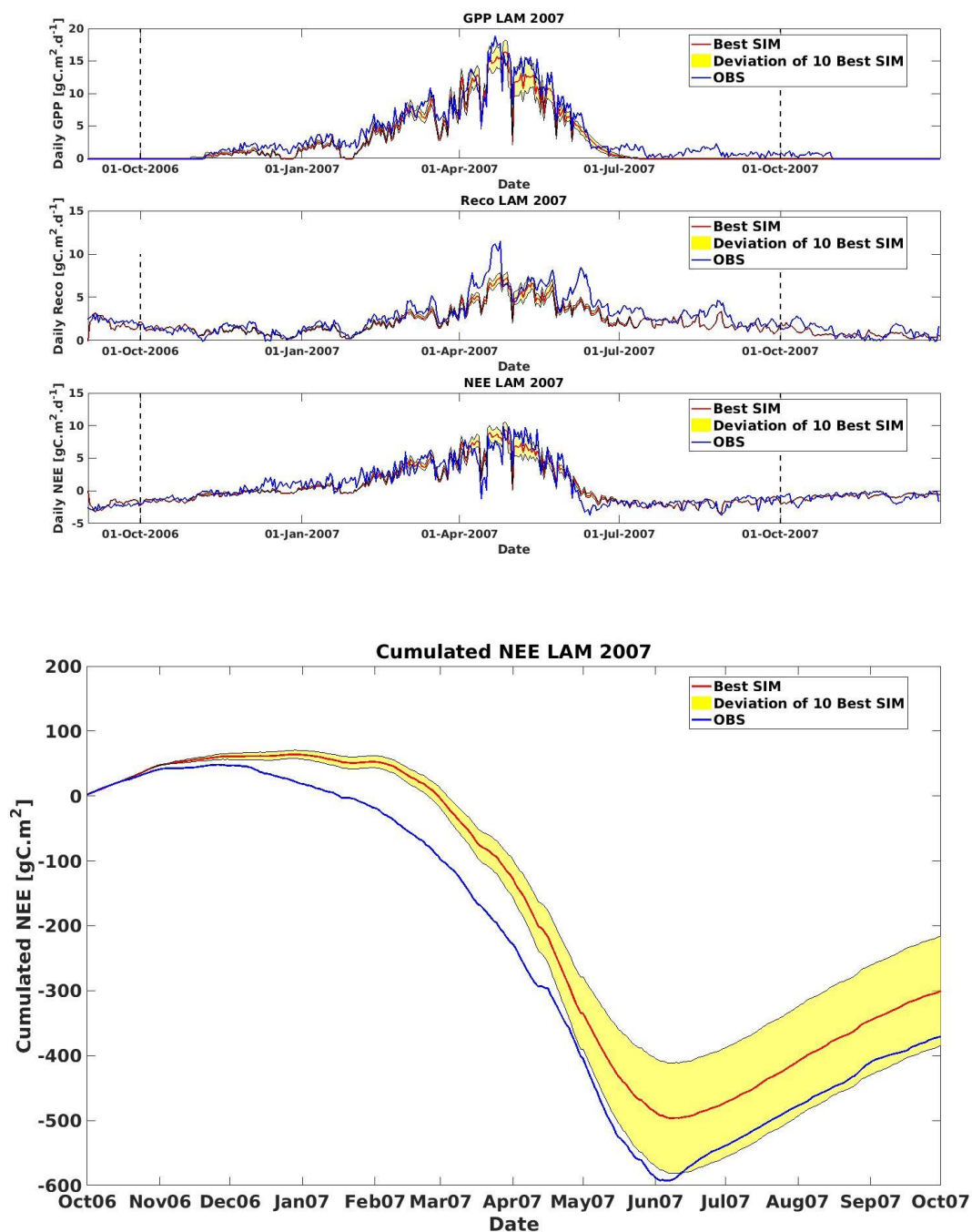


Figure I-15 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for LAM2007. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year.

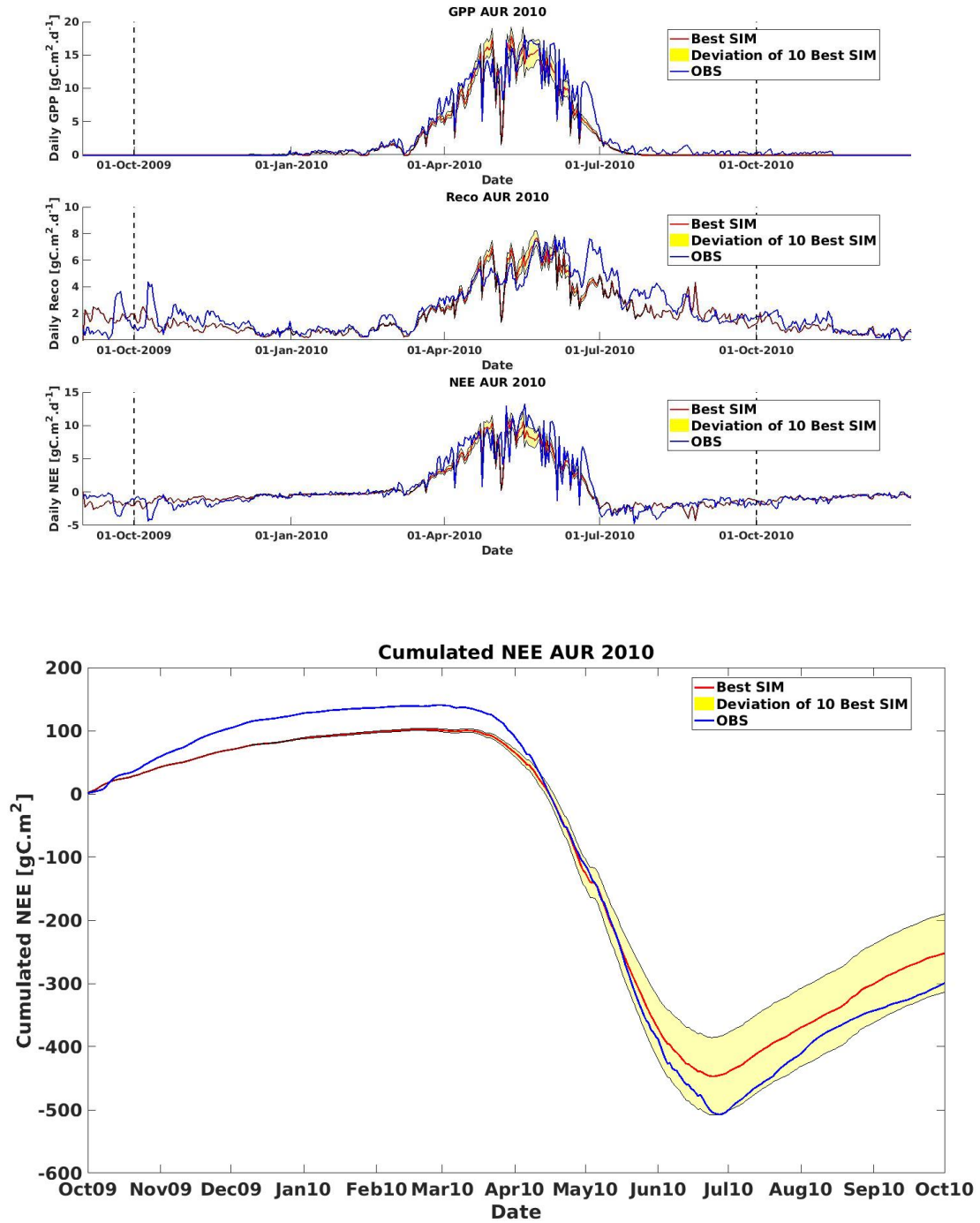


Figure I-16 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for AUR2010. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year.

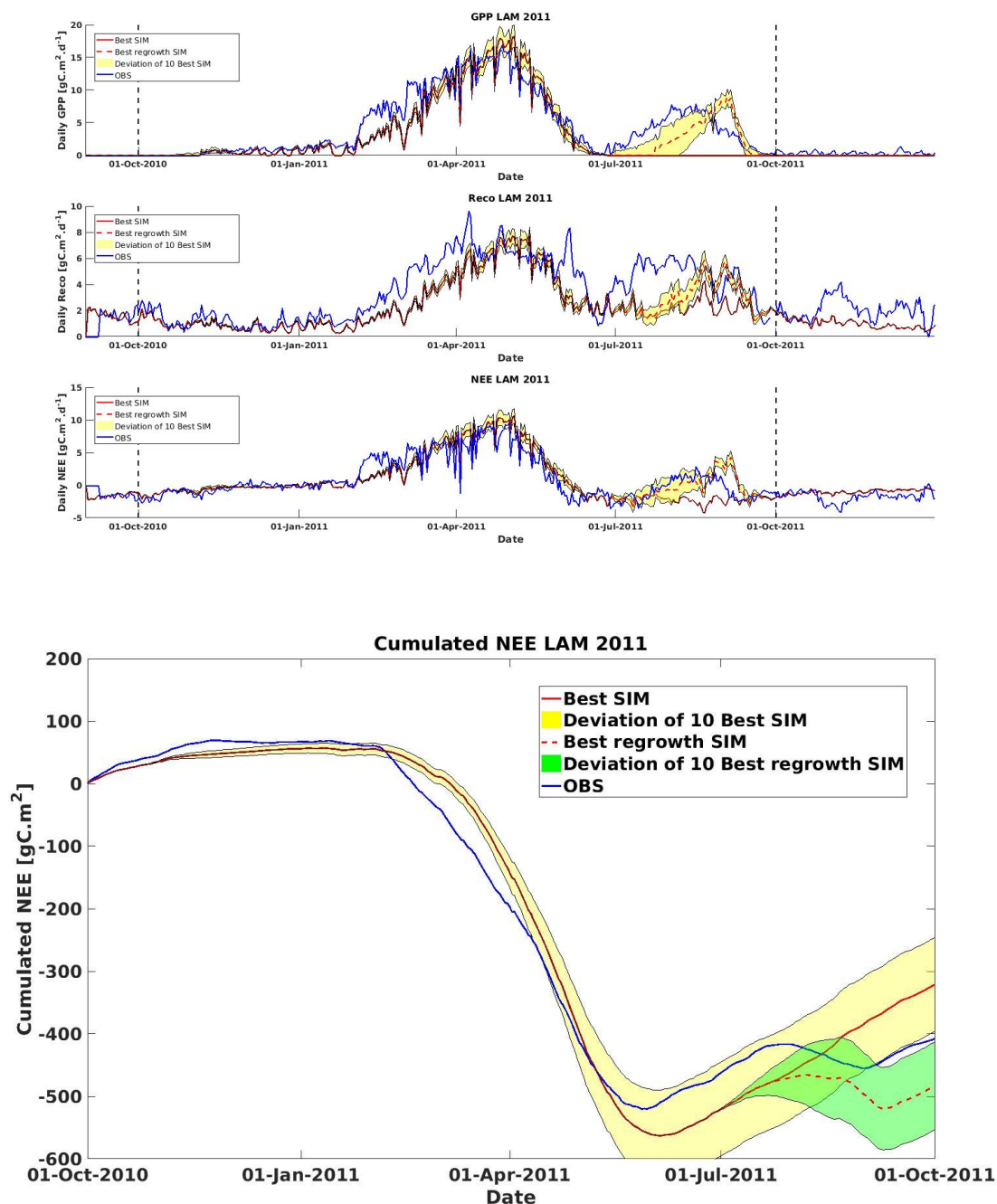


Figure I-17 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red or red dashed lines) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for LAM2011. The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for re-growth and weed events. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error).

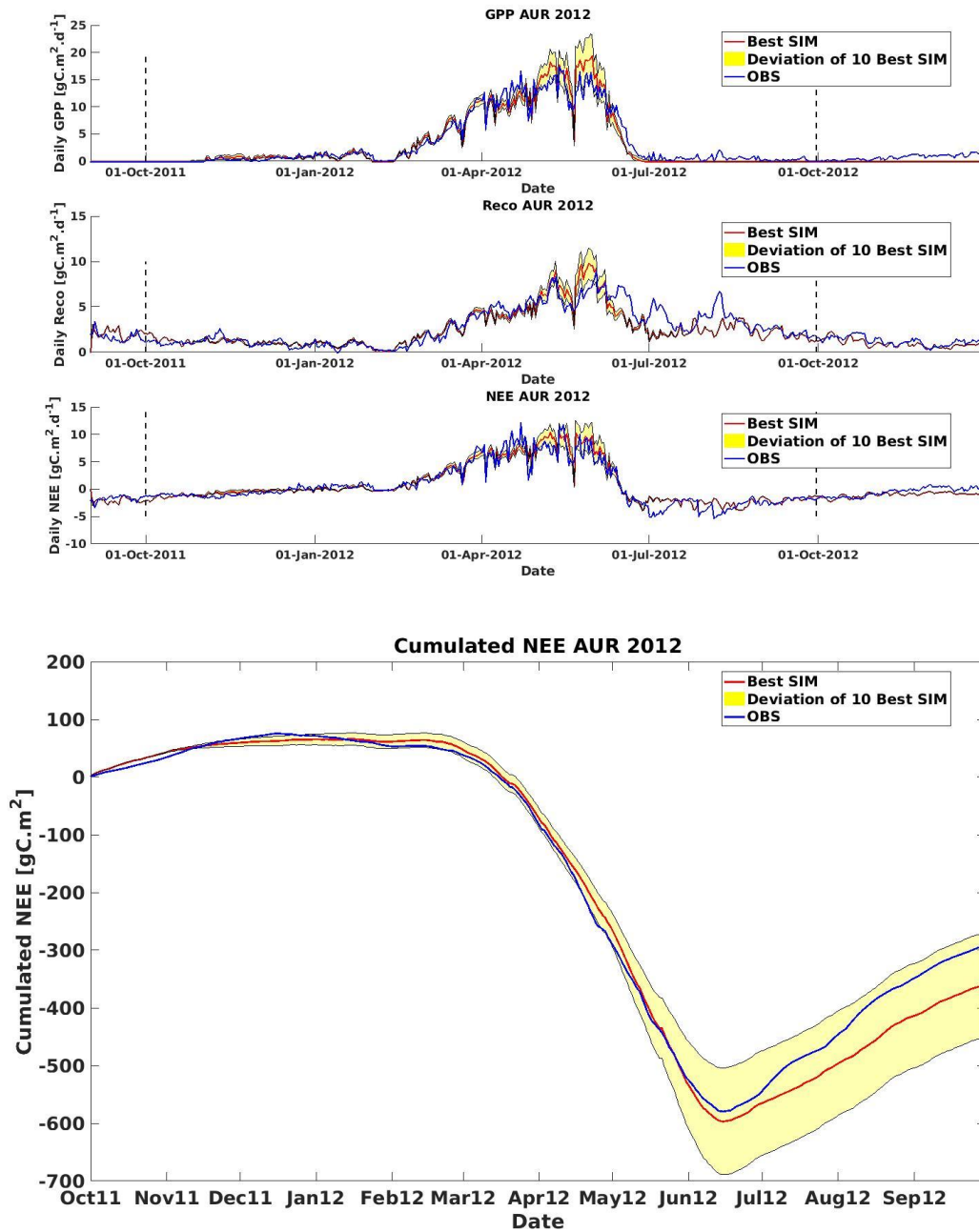


Figure I-18 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red lines) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for AUR2012. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year.

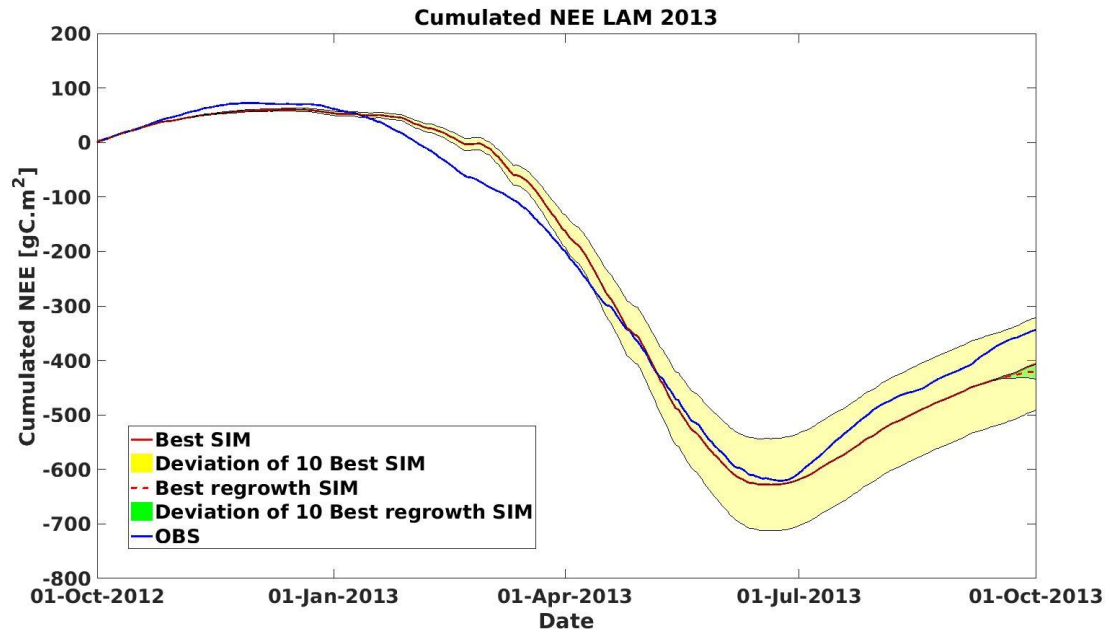


Figure I-19 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red or red dashed lines) cumulated NEE for LAM2013. The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for re-growth and weed events. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error).

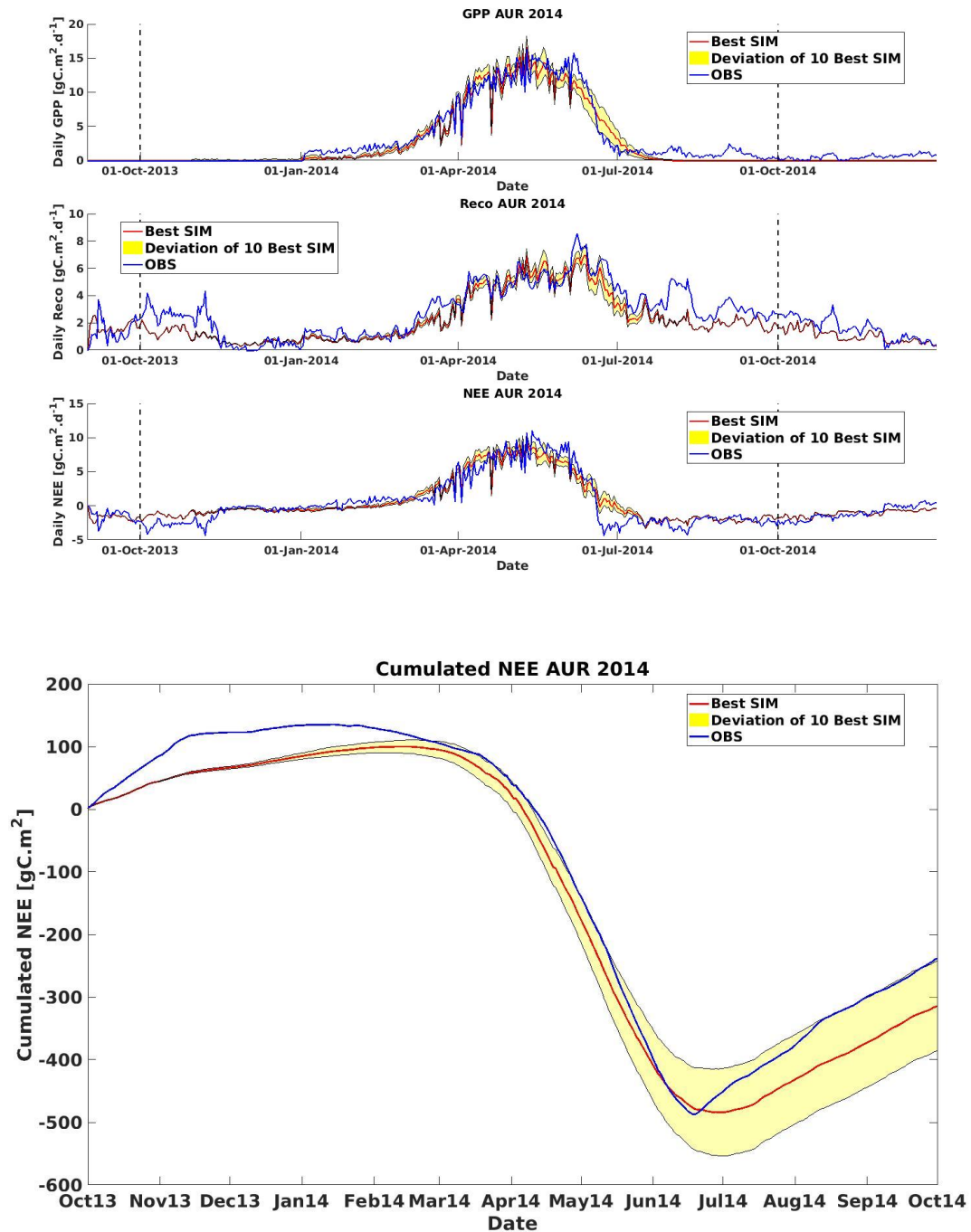


Figure I-20 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red lines) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for AUR2014. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year.

4.8.3. Comparison of the performance of several cropland ecosystem models

We used the study from Wattenbach et al. (2010) to compare the statistical performances of SAFY-CO₂ (with and without accounting for post-harvest vegetative events) with those of other cropland ecosystem models.

The following models were compared:

- 1 – **CERES-EGC** (Gabrielle et al., 2006; Lehuger et al., 2009)
- 2 – **DNDC** (Li et al., 2005, 1994, 1992)
- 3 – **SPA** (Williams et al., 1996)
- 4 – **ORCHIDEE-STICS** (de Noblet-Ducoudré et al., 2004; Gervois et al., 2008b)
- 5 – **SAFY-CO₂** without taking post-harvest vegetation events into account
- 6 – **SAFY-CO₂** including post-harvest vegetation events simulation

In their study, Wattenbach et al. (2010) compared the ability of those 4 models (1 to 4) to reproduce CO₂ fluxes (GPP, R_{eco} and NEE) and evapotranspiration (ETa) for winter wheat and maize in 5 European sites, including Auradé. The models were evaluated for the Auradé 2006 in situ data, which we also simulated in our study (Fig. 1-21).

Overall, the version of SAFY-CO₂ accounting for post-harvest vegetative events achieved better performances than the other models (Table I-8). The coefficient of determination was between 0.862 (ORCHIDEE) and 0.993 (SPA & SAFY-CO₂ re-growth), while the RMSE [gC.m⁻²] was between 123.22 (ORCHIDEE) and 22.71 (SAFY-CO₂ re-growth) (Table. The 4 models (other than SAFY-CO₂) showed difficulties in correctly reproducing phenology. ORCHIDEE-STICS, SPA and CERES-EGC overestimated the amplitude of crop development, leading to an overestimation of the maximum biomass. The authors also observed a phase shift in the DNDC simulations that resulted in crop development that occurred too early in the season. These results show the power of assimilating GAI derived from remote sensing to constrain crop modelling. By reproducing satellite observations, the model can reproduce well the crop phenology, biomass, yield and CO₂ fluxes well without management data.

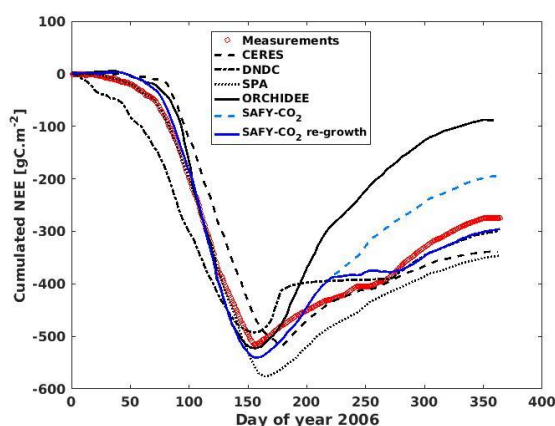


Figure I-21 : Cumulated NEE simulated by 5 different models (CERES-EGC, DNDC, SPA, ORCHIDEE-STICS and SAFY-CO₂ with and without accounting for post-harvest vegetation events) at the Auradé site during the 2006 cultural year (winter wheat).

Table I-8 : Statistic performances (R^2 , RMSE and RRMSE) of 5 cropland ecosystem models : CERES-EGC, DNDC, SPA, ORCHIDEE-STICS and SAFY-CO₂ (with and without accounting for post-harvest vegetation events)

	CERES	DNDC	SPA	ORCHIDEE	SAFY-CO ₂	SAFY-CO ₂ re-growth
R^2	0,970	0,971	0,993	0,862	0,968	0,995
RMSE [gC/m ²]	45,16	49,04	46,49	123,22	53,14	33,62
RRMSE [%]	-15,6	-16,9	-16,0	-42,5	-18,3	-11,6

Note that the best estimation of cumulated NEE was achieved by the version of SAFY-CO₂ that accounts for post-harvest vegetative events. This was the only model able to reproduce post-harvest vegetative events thanks to the use of remotely sensed GAI.

♠ Ma contribution

Cette étude avait été entamée au cours de la thèse d'Amanda Veloso (2014) mais elle n'avait pas été publiée. Le modèle avait été mis en place et la culture de blé avait été simulée. En reprenant ce travail, j'ai recodé le modèle pour m'assurer qu'il n'y avait pas d'erreur dans les formalismes ou dans l'architecture du modèle et cela m'a aussi permis de me l'approprier. J'ai ainsi corrigé quelques erreurs mineures dans les formalismes et j'ai également récupéré toutes les données nécessaires à l'étude (GAI, satellite, sites flux Européen, campagne, etc.) pour les mettre en forme. J'ai ensuite réalisé une étude de sensibilité me permettant de fixer avec une meilleure précision les bornes des paramètres à optimiser. J'ai ensuite obtenu tous les résultats présents dans la publication à l'exception des sorties des autres modèles présentées dans la section I.4.8.3, directement extraites d'une autre étude. Les objectifs, analyses et enjeux de l'étude ont été discuté avec mes encadrants. J'ai écrit l'article, je l'ai soumis et j'ai répondu aux relecteurs.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♠ Il n'existe pas d'estimations précises du bilan de C des terres arables à large échelle.
- ♠ Les modèles de culture existants sont mal adaptés à l'estimation des bilans de C des parcelles agricoles sur de grands territoires car ils nécessitent de nombreuses données d'itinéraires techniques.
- ♠ Le modèle de culture SAFY-CO₂, piloté par des produits satellites, a été créé à partir de SAFY et permet l'estimation du flux net de CO₂ et de ses composantes.
- ♠ SAFY-CO₂ a été validé pour la culture de blé et présente des performances similaires à d'autres modèles de culture largement utilisés.
- ♠ Le modèle permet également de simuler la végétation pouvant se développer pendant l'interculture (repousses, adventices, CI)

- ♣ Si les données concernant l'application d'amendements organiques et l'export des pailles étaient disponibles à la parcelle sur de larges territoires, il serait possible d'estimer leurs bilans de C.
- ♣ Il est nécessaire de calibrer et valider d'autres cultures avec le modèle SAFY-CO₂ afin de pouvoir simuler des rotations de cultures et estimer les bilans de carbone associés à ces rotations ou à telle ou telle pratique.

5. Conclusion de l'article en français

Dans cette étude, nous avons démontré le potentiel de l'assimilation de données satellites à hautes résolutions spatiale et temporelle dans un modèle de culture simple (SAFY-CO₂) pour estimer avec précision les principales composantes du bilan annuel de carbone des parcelles agricoles (*i.e.* le flux net annuel de CO₂ et le rendement). Cette approche de modélisation est prometteuse puisqu'elle nécessite très peu de paramètres et aucune donnée de pratique pour estimer les productions agricoles et les flux nets de CO₂. Elle devrait être considérée comme un premier pas pour combler le vide qui existe pour obtenir une représentation spatiale explicite des composantes principales du bilan de carbone des parcelles agricoles à l'échelle régionale et pour des rotations de cultures. En effet, la limitation principale concerne les zones de polycultures élevage puisque dans ces cas, l'estimation du bilan de carbone nécessite des données sur i) l'application d'engrais organique et ii) la fraction de paille exportée lors de la récolte, qui ne peuvent pas être estimés par télédétection actuellement. La seconde limitation est celle de la représentation simplifiée de la respiration hétérotrophe estimée par une approche Q₁₀ qui ne permet pas une estimation précise du bilan de carbone à une échelle pluriannuelle. Pour ce faire, le couplage de SAFY-CO₂ avec un modèle de sol devra être réalisé. Une autre limitation de l'approche concerne la disponibilité des images satellites qui pilotent le modèle. Cependant, et grâce aux récentes missions satellites HSTR (Sentinel 2, Landsat 7/8), ce genre d'approche pourrait être généralisée, plus robuste et précise. Les satellites radar à synthèse d'ouverture (*e.g.* Sentinel 1) pourraient aussi être utilisés en cas de ciel nuageux (Ameline et al., 2018; Revill et al., 2013a). De plus, nos résultats montrent que les performances du modèle pour estimer les flux nets de CO₂ et donc les bilans de carbone sont nettement améliorées une fois les événements de repousses ou d'adventices post-récoltes pris en compte. Ces événements, tout comme la présence de culture intermédiaires dans les rotations de culture, sont rarement, voire jamais pris en compte dans les simulations de flux de CO₂ à l'échelle régionale ou globale, bien qu'ils aient un impact significatif sur le bilan carbone des parcelles agricoles.

Dans un objectif d'application à grande échelle, notre approche pourrait être renforcée (validée dans des conditions pédoclimatiques plus variées) et étendue à d'autres cultures en utilisant les données de réseaux de mesures internationaux (*e.g.* ICOS, FLUXNET) et des missions satellites HSTR récentes.

6. Extension à d'autres cultures : cas du maïs

Le choix de la culture de maïs comme culture à calibrer après celle du blé a été motivé en premier lieu par la superficie qu'elle représente et par le fait que cette culture était déjà calibrée dans SAFY (Claverie et al., 2012a). La culture de maïs représente 16.5% des surfaces agricoles en France (d'après statistiques Agreste 'Grandes cultures') ce qui en fait la 3^{ème} culture la plus cultivée après le blé et l'orge en termes de surface.

La simulation d'une nouvelle culture dans SAFY-CO₂, comme dans la plupart des modèles de cultures nécessite un jeu de paramètre spécifique. Les paramètres propres au maïs ont été, pour la majorité, extraits de la littérature. Notons ici qu'il n'existe pas de valeur unique pour ces paramètres et que souvent ils sont assez variables d'une étude à l'autre. On cherchera dans ces cas, les études les plus génériques possibles afin que les paramètres soient représentatifs du plus de configurations possibles (conditions pédoclimatiques, rotation, etc.). Pour les paramètres ne pouvant pas être déduits de la littérature, il a fallu les estimer à partir de mesures in situ. Les sections suivantes détaillent ces travaux.

6.1. Calibration du paramètre ELUEb

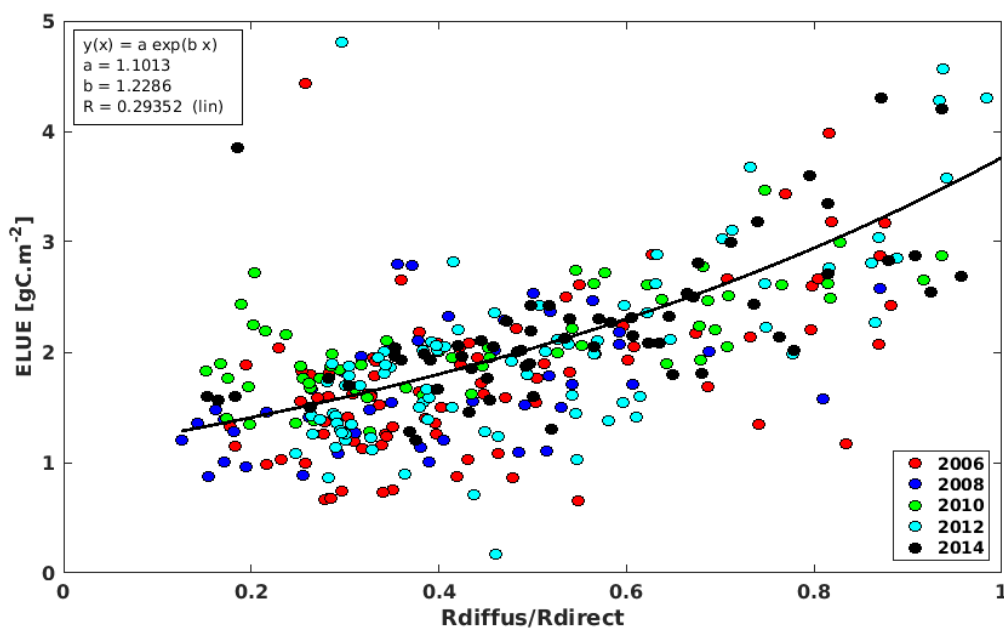


Figure I-22 : ELUE estimée à partir des données météorologiques et de GPP acquises à Lamasquère en fonction du ratio rayonnement diffus sur rayonnement direct. Les paramètres de la régression sont indiqués dans l'encadré de gauche.

Comme présenté précédemment, le paramètre ELUEb permet de prendre en compte l'effet du rayonnement diffus sur l'efficacité d'utilisation de la lumière pour la photosynthèse (voir section I.4.8.1). Ce paramètre n'existe pas dans la littérature puisque l'équation dans laquelle il intervient a été spécialement conçue pour ces travaux. Pour la culture de blé, ce paramètre a été déterminé grâce aux données de plusieurs sites Européen de mesure de flux de CO₂ (réseau ICOS). En revanche pour la culture de maïs seules les données de Lamasquère, où du maïs est cultivé à peu près une année sur deux, ont été utilisées. Des données d'autres sites ICOS ont toutefois été collectées mais toutes les données

nécessaires à l'estimation du paramètre ELUEb (LAI, rayonnement diffus/direct, température, etc.) n'ont pas encore été obtenues. Dès que ces données seront disponibles, ce paramètre sera ajusté en fonction.

A partir de la formule de la GPP [eq. I-1] on peut en déduire la ELUE :

$$ELUE = \frac{GPP}{R_g * \varepsilon_c * fAPAR * f_T(T_a) * sR10} \quad \text{I-12}$$

Une fois la ELUE estimée à partir des données terrain, le paramètre ELUEb peut être estimé grâce à une relation exponentielle. Un filtre a été appliqué sur les données correspondantes à la période de sénescence car au cours de cette période la plante n'est pas à 100% de ses capacités photosynthétiques. Pour exprimer la ELUE en fonction du ratio rayonnement diffus sur rayonnement direct, nous avons utilisé le PPFD (pour '*photosynthetic photon flux density*') et le PPFDd (diffus), tous deux mesurés in situ avec un capteur BF4 (DeltaT, Cambridge, UK).

La Figure I-22 présente les valeurs de ELUE estimées à partir des mesures in situ ainsi que l'équation exponentielle permettant de déduire ELUEb. La valeur déterminée pour le maïs est de 1.23.

6.2. Définition du ratio '*root-to-shoot*'

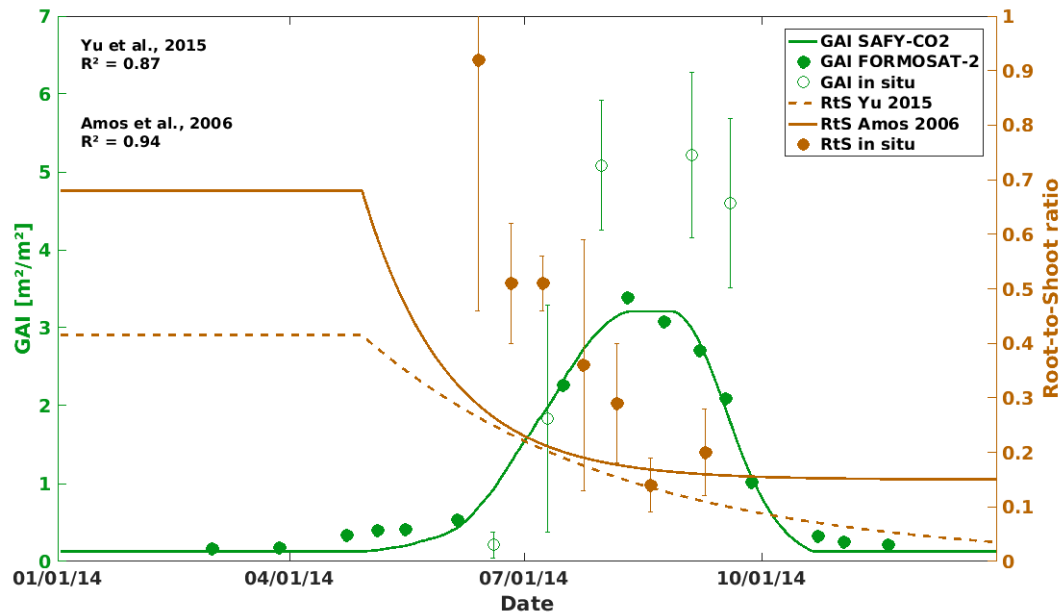


Figure I-23 : Evolution temporelle 1) du GAI – simulé par SAFY-CO₂ (trait vert), issu des données satellites (point vert plein) et des données in situ destructives (cercle vert) – et 2) du ratio biomasse aérienne sur biomasse racinaire – dérivé de Amos and Walter (2006) (trait marron), dérivé de Yu et al., 2015 (trait pointillé marron) et observé (données in situ, point marron).

Le formalisme utilisé jusqu'ici pour séparer la biomasse totale en parties aériennes et racinaires a été défini pour la culture de blé à partir de Baret et al., (1992). Il a donc fallu trouver une autre équation pour estimer ce ratio, noté RtS, pour le maïs. Il nous est impossible de déterminer une équation à partir de mesures terrains puisque, pour cela, il faudrait un jeu de données conséquent de biomasses aériennes et racinaires sur maïs, que nous n'avons pas. Des recherches bibliographiques ont permis de trouver 2 équations de RtS pour maïs (Amos et Walters, 2006; Yu et al., 2015). La Figure I-23 présente la

dynamique de végétation du maïs en 2014 ainsi que le RtS déduits des 2 études suscitées et de quelques mesures in situ de biomasses aériennes et racinaires issues de la thèse d'Enguerrand Burel (2018) sur le site de Lamasquère.

La formulation de Amos et Walters (2006) a été retenue car elle offrait une meilleure corrélation avec les observations (issues des méta-analyses). Aussi, la comparaison des RtS estimés à partir de Amos et Walter (2006) et des données in-situ offre des performances satisfaisantes ($R^2 = 0.94$). Il a donc été décidé de conserver cette dernière dans le modèle [eq. I-13].

$$RtS = 0.15 + 0.53 * \exp^{-0.03 * DAS} \quad \text{I-13}$$

Où DAS représente le nombre de jour après le semis ('day after sowing').

6.3. Identification d'un problème concernant les données de flux sur maïs

Malgré les inversions forcées sur la biomasse et les flux de CO₂, le modèle n'est pas parvenu à représenter correctement ces variables. Quand la biomasse était bien estimée par le modèle, les flux de CO₂ étaient surestimés. Inversement, quand les flux étaient correctement estimés, la biomasse était sous-estimée. Plusieurs tests ont été réalisés afin de corriger ces divergences. Le paramètre de surface spécifique foliaire (SLA pour '*specific leaf area*') a été modifié comme cela avait été fait dans Battude et al., (2016). Cette modification permet de représenter l'épaississement des feuilles et correspond au moment où l'assimilation surpasse la translocation. Cette modification n'a pas suffi à corriger les divergences entre modèle et observations. Ensuite le RtS et les paramètres de respiration ont été modifiés afin que le modèle produise plus de biomasse pour des flux de CO₂ identiques. Aucun de ces tests n'a permis d'obtenir des sorties de modèle correspondantes aux observations, tout en restant réaliste d'un point de vue agronomique et physiologique.

Suite à cette batterie de tests, il a été conclu qu'un problème pouvait exister au niveau des mesures de flux de CO₂. Cette hypothèse a été renforcée par l'analyse du dispositif de mesure. Ainsi, au moment de l'installation de la tour à flux en 2004, le constructeur de l'analyseur de gaz (LICOR-7500, LiCor, Lincoln, NE, USA, permettant l'estimation des flux de CO₂ et d'eau) indiquait qu'une distance minimale de 1,5 m entre le haut de la canopée et le capteur devait être respectée. Ultérieurement (*i.e.* en 2013), une recommandation préconisait une distance de 2m. Or cet instrument a été initialement installé à Lamasquère à une hauteur de 3.6 m, et la hauteur maximale de la végétation sur toutes les années culturales en maïs jusqu'en 2015 était comprise entre 2.42 et 2.99 m. La distance minimale de 2 m au développement maximal du maïs n'a donc jamais été respectée. Il est donc possible que les flux soit correctement acquis en début de saison (lorsque la végétation est encore basse), et que la mesure soit détériorée le reste de la saison. La méthode des fluctuations turbulentes, comme son nom l'indique, mesure des flux turbulents souvent représentés par des tourbillons ('*eddies*' en anglais). Lorsque le capteur est trop près de la canopée, les plus grands tourbillons ne sont plus mesurés et une partie de l'information est perdue.

Afin de vérifier ces hypothèses, les valeurs de biomasse du blé et du maïs ont été estimées à partir des flux de CO₂ mesurés au niveau de la tour. En soustrayant la respiration hétérotrophe (estimé à partir de la température du sol, [eq. I-9]) à la NEE, on obtient directement la NPP. Puis, en divisant la NPP par le contenu en carbone de la plante, on obtient la biomasse totale sèche. Par ailleurs, on dispose également de données de biomasses aériennes destructives. Théoriquement, la biomasse (totale) dérivée des flux de CO₂ devrait être supérieure à la biomasse (aérienne) mesurée. Sur la Figure I-24, les 2

graphes de gauche correspondent aux données acquises sur blé, tandis que les graphes de droite correspondent aux données acquises sur maïs. On constate effectivement que pour la culture de maïs, les premières mesures de biomasses destructives (pendant les 50 jours suivant la levée) sont cohérentes avec les valeurs de biomasse dérivées des flux (*i.e.* légèrement inférieures car les données destructives correspondent aux parties aériennes seulement). En revanche, une fois le maïs développé, on remarque un décrochage qui indique un problème sur la mesure des flux, et renforce l'hypothèse d'une distance canopée/capteur trop faible.

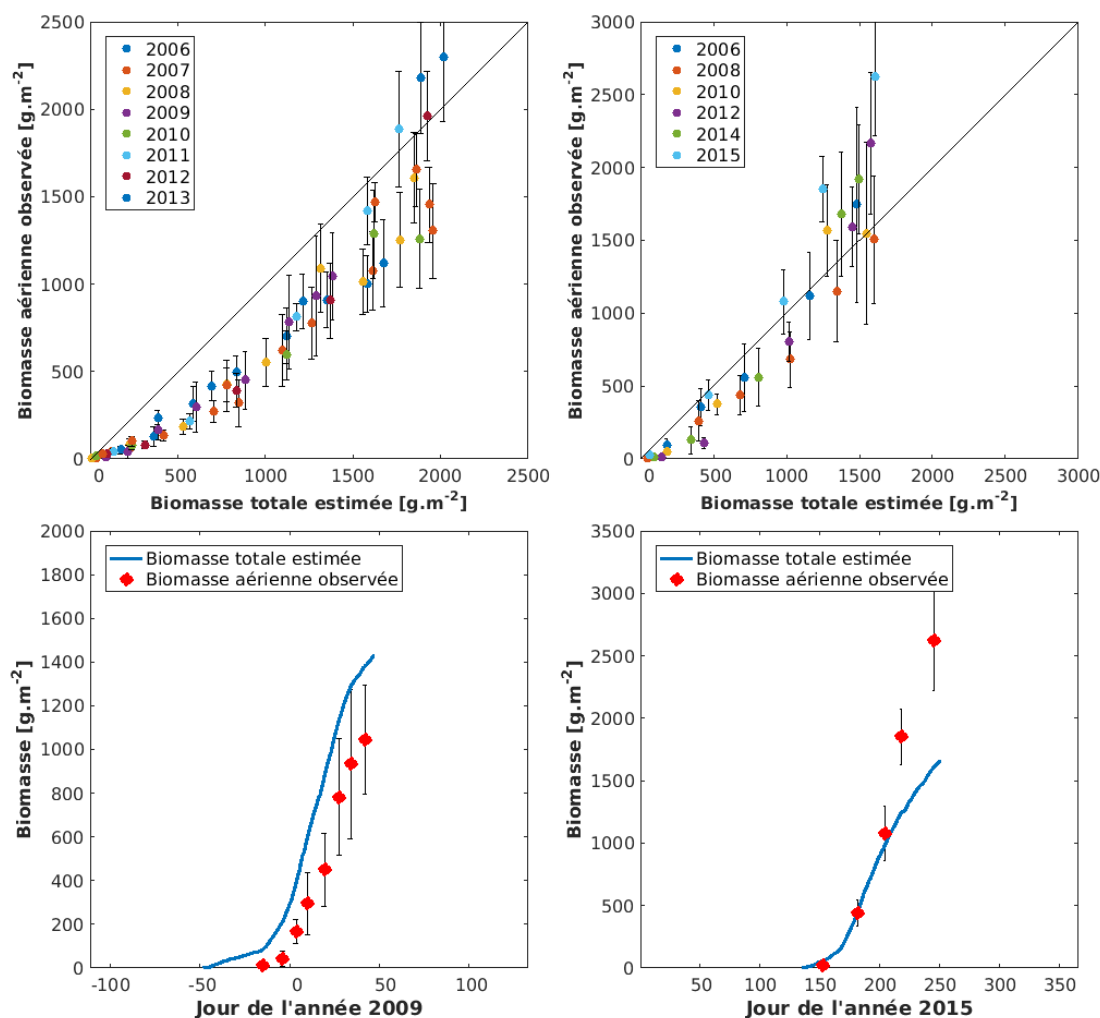


Figure I-24 : Haut : Scatter plots de la biomasse totale estimée à partir des flux de CO₂ en abscisses et de la biomasse aérienne obtenue par mesures destructives en ordonnées. Bas : Biomasse totale dérivée des flux de CO₂ en trait bleu et biomasses aériennes destructives avec incertitudes. Les 2 graphes de gauche concernent la culture de blé et les 2 graphes de droite concernent la culture de maïs.

Ces résultats indiquent que la validation des simulations pour la culture de maïs ne pourra pas être réalisée à partir des mesures de flux. En revanche, il a tout de même été décidé de valider une première étape de paramétrisation pour la culture de maïs (en attendant de pouvoir disposer de données de flux plus récentes ou sur d'autres sites) mais seulement à partir des données de GAI, de rendement et de biomasse destructive. La section suivante présente ces travaux.

6.4. Validation de la culture de maïs

Il a été remarqué lors de la calibration de la culture de blé, une forte sensibilité du modèle au paramètre ELUEa. À cause des compensations entre paramètres du modèle, il est possible d'obtenir des dynamiques de GAI comparables pour des valeurs de ELUEa très différentes. Ce problème d'équifinalité avait déjà été constaté dans la version initiale du modèle (Duchemin et al., 2008a). Or le paramètre ELUEa (qui définit la ELUE) impacte la GPP au premier ordre. Une variation de ce paramètre entraîne une modification significative de la GPP et donc de la biomasse. Il est donc primordial de borner ce paramètre correctement, afin de réduire la dispersion dans les sorties du modèle.

Afin de déterminer les bornes de ELUEa, le modèle a été inversé sur le GAI ainsi que sur la biomasse, tout en laissant de la liberté au paramètre ELUEa (borné sur l'intervalle [1 – 2.5]). La méthode utilisée (simplex contraint (Lagarias et al., 1998)) cherche à minimiser une fonction coût, par modification des valeurs des paramètres à optimiser. Cette méthode itérative offre l'avantage de pouvoir résoudre rapidement des problèmes d'optimisation linéaire à plus de trois variables. L'inconvénient est qu'elle peut aboutir à des minimums locaux, et par conséquent échouer à trouver le minimum global. Pour pallier à ce problème, le simplex est lancé une trentaine de fois, en choisissant des points de départ de manière aléatoire (contraints par les valeurs maximum et minimum de chaque paramètre à optimiser) à chaque optimisation.

Trente inversions ont donc été lancées sur le GAI satellite et la biomasse, pour les 5 années culturales de maïs. Les résultats de ces inversions sont présentés sur la Figure I-25. Sans surprise le GAI et la biomasse sont très bien représentés par le modèle (puisque ces deux variables sont prises en comptes dans la fonction coût). La distribution de ELUEa, issue des inversions sur les 5 années culturales de maïs est aussi représentée Figure I-25, en considérant la meilleure optimisation (de chaque année) ou les 10 meilleures optimisations (sur 30). Cette distribution nous permet de définir les bornes de la ELUEa pour le maïs à [1.6 – 1.9] gC.MJ⁻¹. Ces bornes restreintes devraient permettre de limiter la dispersion dans les sorties et ainsi de pallier aux problèmes d'équifinalité du modèle.

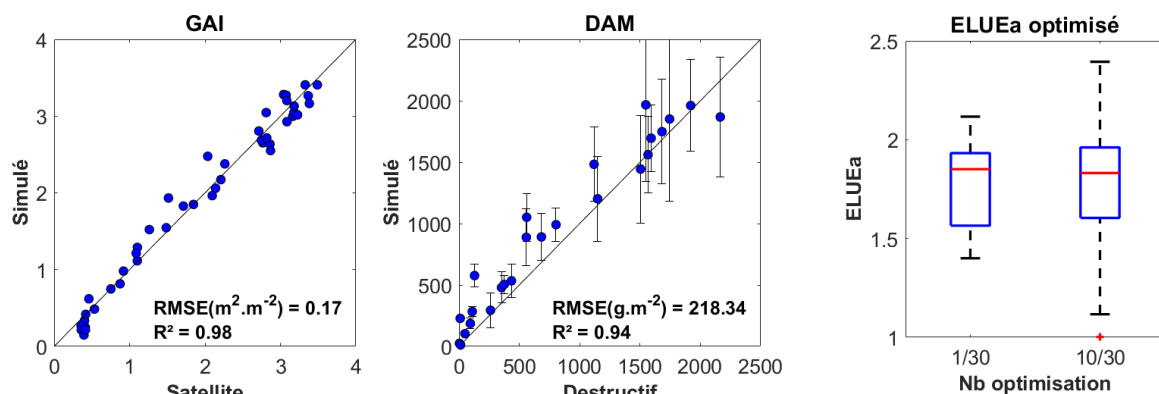


Figure I-25 : Résultats d'inversion de SAFY-CO₂ sur le GAI satellite et sur les biomasses in-situ pour les années en maïs à FR-Lam. Scatterplot du GAI (gauche), de la biomasse (centre) et distribution du paramètre optimisé ELUEa issu de la meilleure optimisation et des 10 premières optimisations (sur 30).

L'étape suivante a consisté à valider ces nouvelles bornes en s'appuyant sur des données de biomasses et de rendement spatialisées. Voir section 4.3 pour le détail de ces mesures.

Le modèle a donc été appliqué sur 14 ESU (6 en 2014 et 8 en 2015), situées sur différentes parcelles dans la zone de l'OSR, avec les nouvelles bornes de ELUEa. La Figure I-26 présente les comparaisons entre les biomasses aériennes et les rendements estimés par le modèle face aux observations. Seules les mesures faites en 2014 disposent d'une incertitude. Le modèle a reproduit les

biomasses et les rendements avec précision ($rRMSE = 21$ et 22% pour les biomasses et les rendements, respectivement). On notera ici que le modèle n'est pas parvenu à reproduire les plus faibles biomasses (et rendement) qu'il surestime, et les plus fortes biomasses, qu'il sous-estime. La sous-estimation des fortes valeurs de biomasse a déjà été observée sur la culture de blé. En effet, les plus fortes valeurs de biomasses finales de blé étaient mal reproduites par le modèle, ce biais s'expliquait principalement par la saturation du signal satellite pour les fortes valeurs de GAI. Ainsi, au-delà d'un $GAI > 3.5 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, les couverts très développés sont mal représentés par le modèle. Concernant les plus faibles valeurs de biomasse, la surestimation du modèle est attribuée à son comportement général qui ne prend pas en compte certains facteurs. Les développements faibles sont souvent dus à des problèmes de croissance, liés à un ravageur, à des événements météorologiques extrêmes ou encore à des maladies. Ces facteurs ne sont pas pris en compte dans notre approche et ne peuvent donc pas être représentés. Ceci peut expliquer la surestimation des productions par le modèle pour de faibles développements bien qu'il soit ici difficile d'affirmer que c'est le cas.

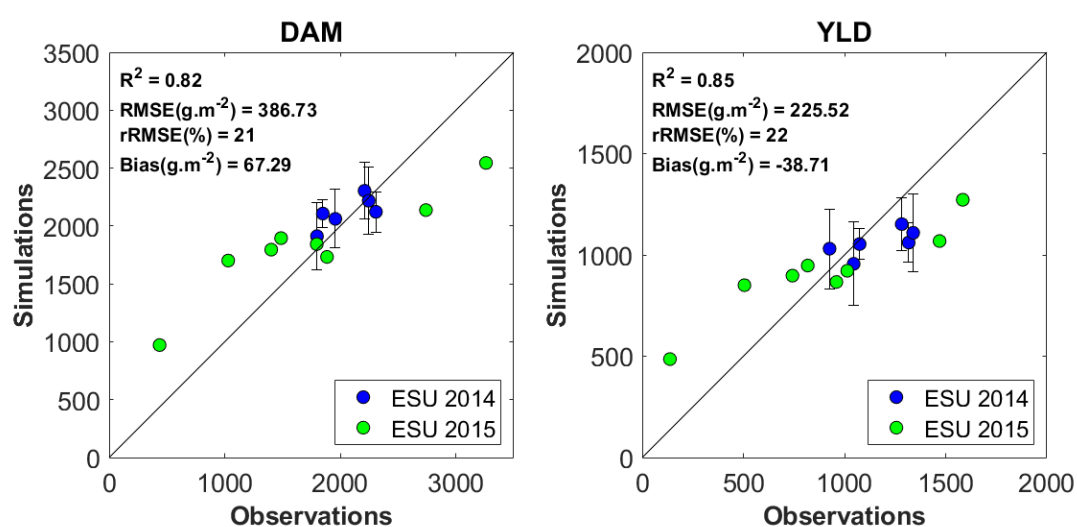


Figure I-26 : Biomasse aérienne (gauche) et rendement (droite) de maïs estimés par SAFY-CO₂ face aux observations acquises sur 14 ESUs (6 en 2014 et 8 en 2015).

Cette validation limitée à des données de biomasse et de rendement permet toutefois de proposer un premier jeu de paramètres pour la culture de maïs (voir Tableau I-9). L'objectif premier de SAFY-CO₂ étant d'estimer les bilans de C sur des parcelles agricoles ainsi que leurs composantes, des travaux de validation sur flux de CO₂ (idéalement en multisites) seront donc nécessaires. Ce travail pourra s'appuyer sur les données du réseau d'observation ICOS dont certaines ont commencé à être collectées pendant la thèse.

Une fois les données de flux de CO₂ exploitables, il faudra en premier lieu redéfinir le paramètre ELUEb. En effet, il a été calibré à l'aide de données de flux considérées comme partiellement erronées, et uniquement sur le site de Lamasquère. Il faudra ensuite valider la nouvelle paramétrisation sur un large jeu de donnée de biomasse, de rendement et de flux de CO₂. Ce travail sera réalisé en 2021 dans le cadre des projets Naturellement Popcorn (<https://www.popcorn.fr/actualites/consortium-sur-le-projet-naturellement-popcorn>) et Soil Carbon Farming.

Tableau I-9 : Paramètres du modèle SAFY-CO₂ spécifiques à la culture de maïs. Les bornes des paramètres à optimiser sont indiquées ainsi que les sources des paramètres fixes.

Description	Notation	Unité	Valeur / Bornes	Méthode	Source
Climatic efficiency	e_c	-	0.48	Literature	Varlet-Grancher (1982)
Light-interception coefficient	K_{EXT}	-	0.63	Literature	Claverie (2012)
Minimal temperature for growth	T_{min}	°C	8	Literature	Ritchie (1991)
Maximal temperature for growth	T_{max}	°C	45	Literature	Ritchie (1991)
Optimal temperature for growth	T_{opt}	°C	30	Literature	Ritchie (1991)
Polynomial degree	b	-	2	Literature	Duchemin (2008)
Corrective factor over GPP during senescence	C_s	-	1	In situ data	-
Effective light-use efficiency parameter A	$ELUE_a$	$gC.MJ^{-1}$	[1.6-1.9]	Calibration	-
Effective light-use efficiency parameter B	$ELUE_b$	-	1.23	In situ data	In situ data – FR-Lam
Maintenance respiration parameter: Q_{10}	Q_{10}	-	2	Literature	Amthor (2000)
Maintenance respiration parameter: R_{10}	R_{10}	gC/g_{DM}	0.0015	literature	Yang (2004)
Growth respiration conversion efficiency parameter	Y_G	-	0.75	Literature	Johnson (1983)
Root fraction parameters	$f_1 - f_2$	-	0.15 / 0.53	Literature	Amos (2006)
Carbon content coefficient	C_{veg}	gC/g_{veg}	0.46	Literature	Béziat (2009)
Harvest index	HI	-	0.5	Literature	Cabelguenne (1999)
Heterotrophic respiration parameter: R_{href}	R_{href}	$gC.m^{-2}.d^{-1}$	0.34	Literature	Suleau (2011)
Heterotrophic respiration parameter: Q_{10}	Q_{10}	-	2.3	Literature	Suleau (2011)
Conversion factor of T_a into T_s	t	-	1.07	In situ data	-
Specific leaf area	SLA	$m^2.g^{-1}$	[0.001 – 0.04]	Calibration	-
Partition-to-leaf function parameter A	Pl_A	-	[0.01-0.5]	Calibration	-
Partition-to-leaf function parameter B	Pl_B	-	[0.0001-0.01]	Calibration	-
Sum of temperature for senescence	Sen_A	°C	[800-1600]	Calibration	-
Rate of senescence	Sen_B	°C.day ⁻¹	[10 ³ -3.10 ⁴]	Calibration	-
Day of plant emergence	D_0	day	[1 ^{er} Mai-20 Juil]	Calibration	-

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ Un problème d'acquisition concernant les flux de CO₂ a empêché une validation complète de la culture de maïs.
- ♣ Une paramétrisation basée sur des données de la littérature et des mesures effectuées sur le site de Lamasquère est tout de même proposée. Elle a été partiellement validée grâce à des données de biomasses et de rendements en multisites.
- ♣ Une validation reste à réaliser sur des flux de CO₂ pour pouvoir introduire le maïs dans les rotations de culture et pouvoir simuler les bilans associés.

7. Extension à d'autres cultures : cas du tournesol

De la même manière que pour la culture maïs, le choix de paramétrer/valider la culture de tournesol a été réalisé de manière pragmatique. Au niveau national, c'est la culture de colza qui est cultivée en majorité après le blé et le maïs, avec 16.1% des surfaces occupées en moyenne sur la période 2014-2018 (d'après les données Agreste grandes cultures. Surfaces 2019) suivi de la culture de tournesol avec 6.4% des surfaces. En revanche, le tournesol est une culture très présente dans notre zone d'étude. Le tournesol représentait en effet 34 et 31% des surfaces en grandes cultures pour la Haute-Garonne et le Gers, respectivement, en 2019 tandis que le colza représentait seulement 7 et 5% respectivement. De plus, la rotation blé/tournesol (ou tournesol/blé) est la rotation la plus observée dans la zone d'étude. Enfin, le tournesol fait aussi partie des cultures ayant déjà été simulées avec SAFY (Claverie et al., 2012a).

Les paramètres propres au tournesol ont été dérivés de la littérature, et certains formalismes ont dû être modifiés. Les prochaines parties détaillent ces adaptations à la culture, et une validation est ensuite proposée. Ce travail a donné lieu à la rédaction d'un proceeding, ainsi qu'une présentation au M2GARSS (<https://2020.m2garss.org>).

7.1. Calibration du paramètre ELUEb

Aucune donnée autre que celles acquises sur le site d'Auradé n'a pu être utilisée pour l'estimation du paramètre ELUEb. En effet, des données de GPP, de rayonnement diffus, direct, de GAI, de température etc. sont nécessaires à l'estimation, mais difficilement accessibles sur d'autres sites. En outre, parmi les 2 années culturales de tournesol à Auradé, une seule a pu être utilisée pour l'estimation de ce paramètre, un problème étant survenu sur le capteur de rayonnement diffus en 2016.

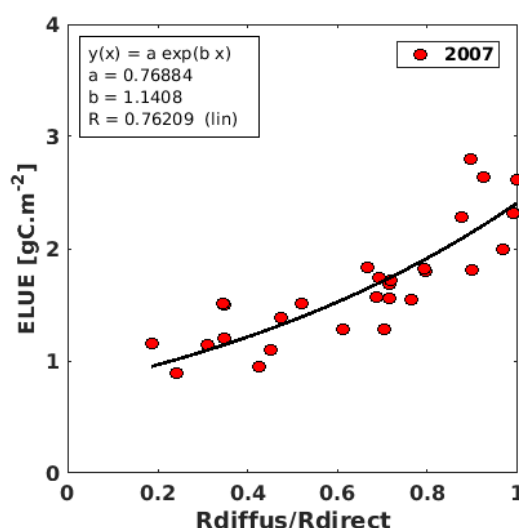


Figure I-27 : ELUE estimée à partir des données météorologiques et de GPP acquises à Auradé en 2007 en fonction du ratio rayonnement diffus sur rayonnement direct. Les paramètres de la régression sont indiqués dans l'encadré de gauche.

La Figure I-27 présente la ELUE déduite des mesures in situ réalisées à Auradé au cours de

l'année 2007. La valeur retenue pour le paramètre ELUEb est de 1.14. Un filtre a été appliqué sur les valeurs de GAI inférieures à $0.5 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ car des valeurs aberrantes de ELUE ($>8 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$) étaient observées pour les faibles GAI. Comme le nombre de points utilisé pour réaliser cette régression est limité et que cette analyse est cantonnée à un seul site, il sera nécessaire de réaliser une étude plus poussée en multisites et sur plusieurs années de mesures.

7.2. Définition du ratio '*root-to-shoot*'

La recherche d'un formalisme pour définir le RtS du tournesol n'a pas été facile. En effet, les recherches bibliographiques n'ont pas été fructueuses et aucune autre formulation n'a pu être directement introduite dans le modèle. Il a donc été décidé de repartir de la formulation de Baret et al., (1992), initialement utilisée pour le blé, et de l'adapter au cas du tournesol. N'ayant aucune donnée spécifique à nos sites pour adapter cette formulation, les données de l'étude de Ma et al., (2017) ont été utilisées. Dans cette étude les auteurs ont mesuré la biomasse aérienne et racinaire à plusieurs moments de la croissance du tournesol, permettant de calculer le RtS à trois dates au cours de la saison et sous différentes concentrations d'azote et de salinité. La Figure I-28 présente la dynamique de végétation du tournesol à Auradé en 2007 simulée par SAFY-CO₂. Les données de l'étude de Ma et al., (2017) y sont également représentées, ainsi que le RtS adapté de Baret et al., (1992). Comme pour le paramètre ELUEb, le RtS pourra être défini de manière plus précise une fois des données de biomasse aérienne et racinaire disponibles, ou encore en s'appuyant sur les sorties de simulation d'autres modèles agronomiques (*i.e.* STICS).

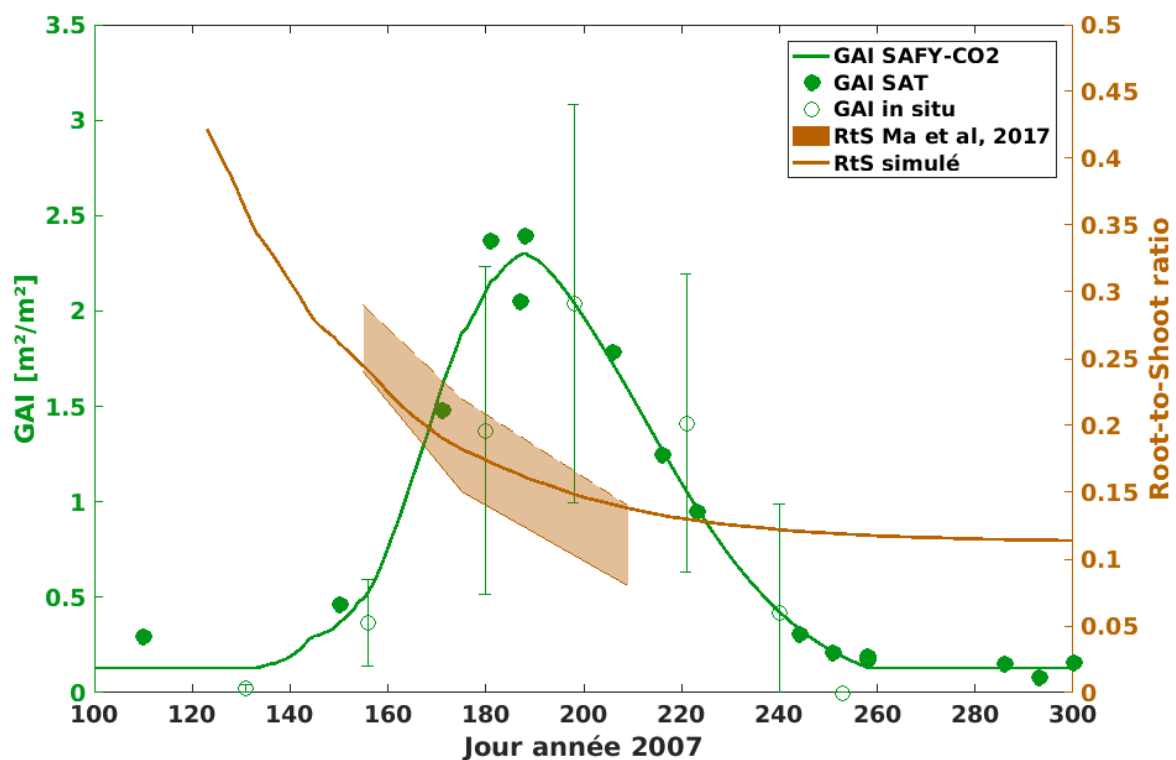


Figure I-28 : Evolution temporelle 1) du GAI – simulé par SAFY-CO₂ (trait vert), issu des données satellite (point vert plein) et des données destructives (cercle vert) – et 2) du ratio biomasse aérienne sur biomasse racinaire – issus de Ma et al., 2017 (ombrage marron) et simulé (trait marron) -.

7.3. Validation de la culture de tournesol

Afin de valider la paramétrisation définie pour la culture de tournesol, le modèle a été appliqué sur les deux années culturales de tournesol disponibles à Auradé. Il a ensuite été validé sur le GAI, la biomasse ainsi que les flux de CO₂. Les données utilisées ici sont détaillées section 4. Les prochaines sections se concentrent sur la validation du modèle.

7.3.1. Estimations du GAI et de la biomasse

La Figure II-29 présente la comparaison entre le GAI et la biomasse simulés par SAFY-CO₂ et les observations. Les valeurs de GAI observées sont dérivées des satellites FORMOSAT-2 et SPOT2/4/5. Les observations de biomasse sont des mesures destructives réalisées sur la parcelle d'Auradé (voir section 4.1). Dans l'ensemble, les GAI et les biomasses simulés concordent bien avec les observations. Sur l'année 2007, le GAI est estimé avec peu d'erreur (rRMSE = 8.6%), une très bonne corrélation ($R^2 = 0.97$) et presque pas de biais (0.003 m².m⁻²). Le GAI est également très bien estimé sur l'année 2016 (rRMSE = 2.4%, $R^2 = 0.9997$, biais = 0.013 m².m⁻²). Ces statistiques montrent que le modèle interpole le GAI satellite avec précision, comme cela a pu être montré dans de précédentes études (Duchemin et al., 2015a; Fieuzal et al., 2011a). Le modèle estime aussi la biomasse avec une grande précision, avec des coefficients de détermination de 0.99 et 0.97, et des rRMSE 12.3% et 20.0%, pour les années 2007 et 2016 respectivement. Ces performances sont similaires à une assimilation combinée de signaux satellites optique et radar dans le modèle (Fieuzal et al., 2017).

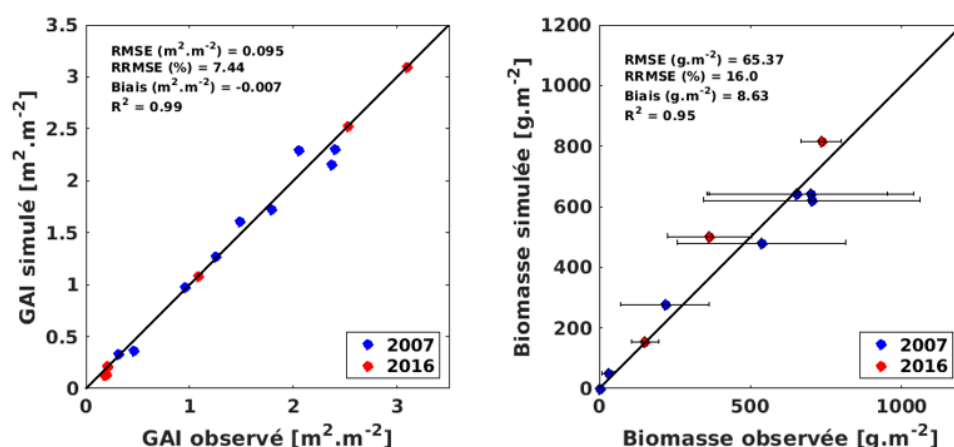


Figure I-29 : Scatter plot entre GAI (gauche) et biomasse (droite) observé et simulé avec SAFY-CO₂. Les observations de GAI sont dérivées des mesures satellites, tandis que les biomasses observées sont obtenues par mesures destructives sur le site d'Auradé.

Les deux années culturales de tournesol ont été marquées par de faibles biomasses qui s'expliquent par un été froid en 2007, accompagné de faibles précipitations en juillet. En 2016, le mois de juillet a été peu lumineux, tandis que le mois suivant a été très sec par rapport aux normales. Ces conditions climatiques ne sont pas favorables à une forte photosynthèse. La biomasse simulée en 2016 est surestimée de 9.4%, erreur qui pourrait provenir de la surestimation du GAI satellite. En effet, cette année-là, le GAI destructif maximum était de 1.6 m².m⁻² tandis que le GAI satellite maximum était de 3.6 m².m⁻². Cet écart peut aussi être expliqué par la forte hétérogénéité de développement spécifique à la culture de tournesol, qui rend la mesure destructive peu représentative de la parcelle entière.

7.3.2. Validation des flux de CO₂

Les performances obtenues sur le flux net de CO₂ et ses composantes sont résumées dans le Tableau I-10. Comme il n'y a pas de photosynthèse simulée avant l'émergence et après la récolte, seule la période de végétation est considérée pour le calcul des performances sur la GPP. Pour la R_{ECO} et la NEE, toute la période de simulation est considérée.

Tableau I-10 : Performances statistiques associées à la comparaison entre composantes du flux net de CO₂ simulées et observées pour les années culturales 2007 et 2016 de tournesol à Auradé.

	GPP	R_{eco}	NEE
Nb de données	214	672	731
R²	0.90	0.86	0.87
RMSE (gC.m⁻².d⁻¹)	1.61	0.85	0.81

En plus des statistiques, les évolutions temporelles de flux net de CO₂ et de ses composantes sont représentées (Fig. I-30), de manière à analyser les périodes de divergences entre simulation et observation.

Le modèle a reproduit la dynamique de GPP avec une bonne précision ($R^2 = 0.90$) et peu d'erreur (RMSE = 1.61 gC.m⁻².d⁻¹) sur les deux années de simulation. La GPP simulée est légèrement sous-estimée, en particulier pendant la période de sénescence. À la fin de la saison culturale 2007, on observe deux pics de GPP (Fig. I-30) qui sont dus à des périodes de forts rayonnements et à de fortes températures qui n'ont pas été correctement reproduites par le modèle. En 2016, le GAI satellite indique une sénescence précoce par rapport au GAI in situ, ce qui entraîne une sous-estimation de la GPP sur cette période. Néanmoins, la dynamique de GPP est correctement reproduite par le modèle malgré les différences observées entre GAI satellite et in situ (dus aux hétérogénéités de développement comme évoqué précédemment).

La simulation de la R_{ECO} montre des performances légèrement moins bonnes en termes de dynamique ($R^2 = 0.86$) qui s'expliquent par la représentation très simple de la respiration hétérotrophe dans le modèle (formalisme seulement basé sur la température du sol). En effet, bon nombre de phénomènes ne sont pas pris en compte dans notre approche, comme l'effet du contenu en eau du sol ou du contenu en matière organique. De la même manière que pour la GPP, la R_{ECO} est sous-estimée par le modèle à la fin de la période de végétation (Fig. I-30) à cause de la sous-estimation de la respiration autotrophe (dépendante de la GPP) sur cette période. L'erreur associée à l'estimation de la R_{ECO} reste néanmoins faible (RMSE = 0.85 gC.m⁻².d⁻¹) malgré la représentation simple de la respiration hétérotrophe.

La dynamique journalière de la NEE est correctement reproduite par le modèle en termes de corrélation ($R^2 = 0.87$) et d'erreur (RMSE = 0.81 gC.m⁻².d⁻¹). Les principales sources d'erreur dans l'estimation de la NEE proviennent de i) la représentation simple de la respiration hétérotrophe qui ne permet pas une estimation précise des flux pendant les phases de sol nu et de ii) la sous-estimation de la GPP à la fin de la période de végétation en 2007 qui entraîne une sous-estimation de la NEE. Néanmoins, bien qu'aucun stress hydrique ne soit simulé par cette version du modèle, les performances du modèle dans l'estimation des flux de CO₂ sont très bonnes.

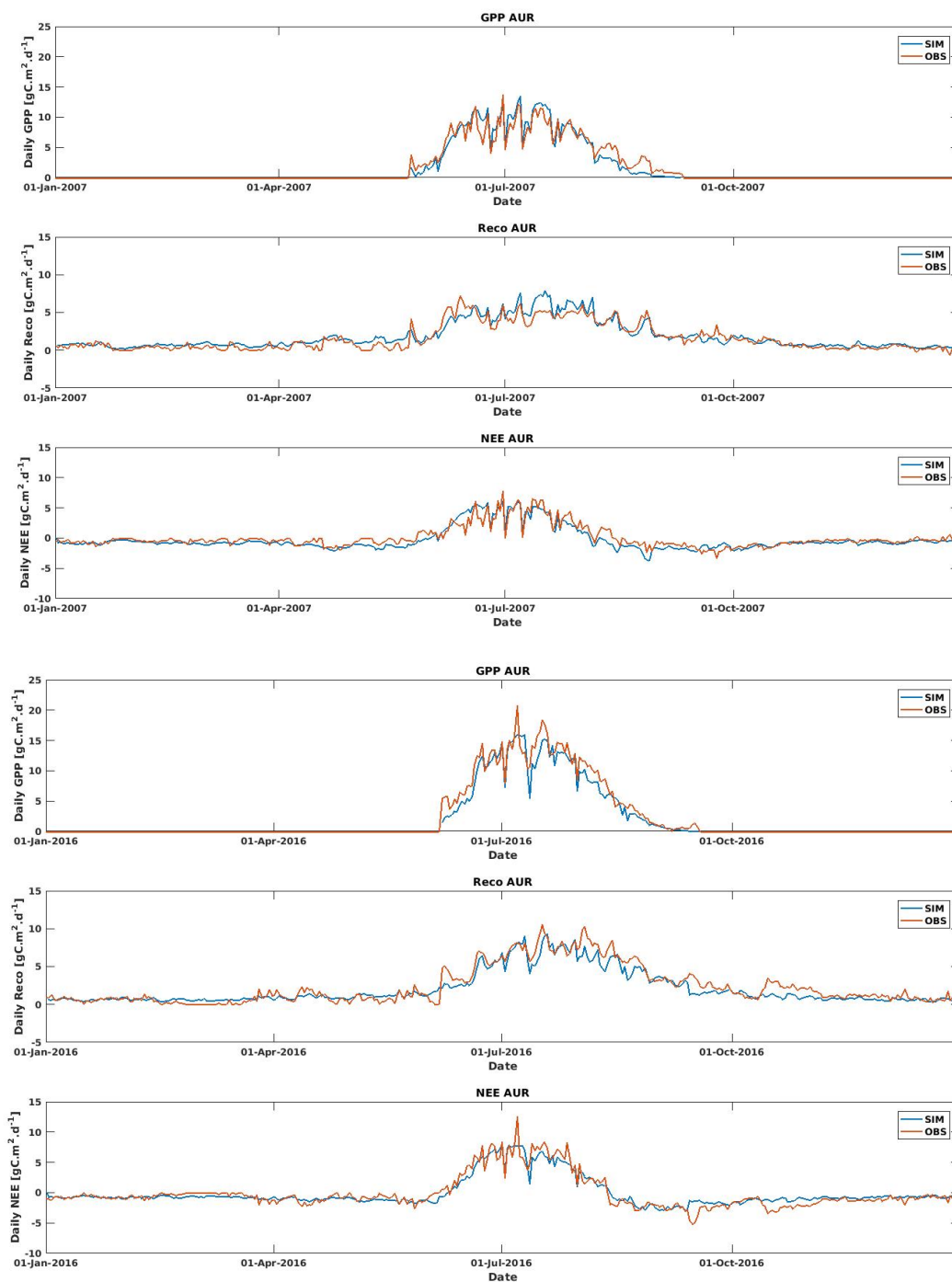


Figure I-30 : Evolutions temporelles des observations (rouge) et des simulations (bleu) de GPP (haut), de ReCO (milieu) et de NEE (bas) pour les années culturales 2007 et 2016 de tournesol à Auradé.

7.3.3. Paramétrisation du tournesol

La validation précédente a permis de déterminer un jeu de paramètre pour la culture de tournesol. Ce jeu de paramètres est présenté dans le Tableau I-11.

Tableau I-11 : Paramètres du modèle SAFY-CO₂ spécifiques à la culture de tournesol. Les bornes des paramètres à optimiser sont indiquées ainsi que les sources des paramètres fixes.

Description	Notation	Unité	Valeur / Bornes	Méthode	Source
Climatic efficiency	e_c	-	0.48	Literature	Varlet-Grancher (1982)
Light-interception coefficient	K_{EXT}	-	0.8	Literature	Flénet (1996) Steer (1996)
Minimal temperature for growth	T_{min}	°C	8	Literature	STICS
Maximal temperature for growth	T_{max}	°C	42	Literature	STICS
Optimal temperature for growth	T_{opt}	°C	25	Literature	STICS
Polynomial degree	b	-	2	Literature	Duchemin (2008)
Corrective factor over GPP during senescence	C_s	-	1	In situ data	-
Effective light-use efficiency parameter A	$ELUE_a$	$gC.MJ^{-1}$	[0.75-0.95]	Calibration	-
Effective light-use efficiency parameter B	$ELUE_b$	-	1.14	In situ data	In situ data – FR-Lam
Maintenance respiration parameter: Q_{10}	Q_{10}	-	2	Literature	Amthor (2000)
Maintenance respiration parameter: R_{10}	R_{10}	gC/g_{DM}	0.0036	literature	Yang (2004)
Growth respiration conversion efficiency parameter	Y_G	-	0.76	Literature	Johnson (1983)
Root fraction parameters	$f_0 - f_{inf} - c$	-	0.3 / 0.1 / 1.5	Literature	Baret (1992) - Ma (2017)
Carbon content coefficient	C_{veg}	gC/g_{veg}	0.46	Literature	Béziat (2009)
Harvest index	HI	-	0.29	Literature	Cabelguenne (1999)
Heterotrophic respiration parameter: R_{href}	R_{href}	$gC.m^{-2}.d^{-1}$	0.34	Literature	Suleau (2011)
Heterotrophic respiration parameter: Q_{10}	Q_{10}	-	2.3	Literature	Suleau (2011)
Conversion factor of T_a into T_s	t	-	1.07	In situ data	-
Specific leaf area	SLA	$m^2.g^{-1}$	[0.001 – 0.04]	Calibration	-
Partition-to-leaf function parameter A	Pl_A	-	[0.01-0.5]	Calibration	-
Partition-to-leaf function parameter B	Pl_B	-	[0.0001-0.01]	Calibration	-
Sum of temperature for senescence	Sen_A	°C	[200-1800]	Calibration	-
Rate of senescence	Sen_B	°C.day ⁻¹	[10 ³ -3.10 ⁴]	Calibration	-
Day of plant emergence	D_0	day	[4 Avril-20 Juil]	Calibration	-

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♠ La culture de tournesol a été introduite dans le modèle SAFY-CO₂ et validée sur des données de biomasse et de flux de CO₂ acquises sur le site d'Auradé.
- ♠ Certains paramètres nécessiteraient une calibration plus robuste (sur la base de données acquises durant plusieurs années culturales, et sur différents sites) car peu de données étaient disponibles jusqu'à présent.
- ♠ Comme le tournesol est une culture fréquemment soumise au stress hydrique, le couplage de SAFY-CO₂ avec un module de bilan hydrique devra être testé.
- ♠ Avec trois grandes espèces paramétrées, le modèle pourra être utilisé pour simuler des rotations de culture et ainsi pouvoir quantifier le bilan de C de certaines rotations

8. Conclusion

Dans cette section du manuscrit, le modèle SAFY-CO₂ a été appliqué avec succès à la culture de blé. Le modèle a été capable de reproduire avec précision les biomasses, rendements et flux de CO₂ (GPP, R_{ECO} et NEE). Comme des données concernant l'export des pailles ainsi que l'application d'engrais organique (à Lamasquère) étaient disponibles, des bilans de carbones ont pu être estimés par cette approche. Il a notamment été montré que le modèle était capable d'estimer les bilans annuels de C sur parcelles agricoles en blé pour des années climatiques contrastées avec une précision de 77 gC.m⁻².an⁻¹.

Concernant la culture de tournesol, elle a également été simulée avec succès par SAFY-CO₂. Le modèle a montré de bonnes performances dans l'estimation des biomasses et des flux de CO₂. Toutefois, des analyses supplémentaires devront être réalisées afin de rendre la paramétrisation plus robuste/générique. En effet, le paramètre ELUEb a été calibré avec un nombre très limité d'observation sur le même site où les validations ont été réalisées. Enfin, le formalisme RtS pourrait également être défini avec plus de données ou avec un formalisme différent et validé pour cette culture. Cette paramétrisation a pu être appliquée pour une analyse des performances du modèle à simuler des biomasses et rendements spatialisés. Cette étude sera présentée dans le chapitre suivant.

Les mesures de flux de CO₂ acquises à Lamasquère sur maïs n'ont pas pu être exploitées pour valider le modèle sur cette culture. En revanche, des données de biomasses et de GAI ont été utilisées et ont permis d'aboutir à une paramétrisation qui a été validée sur des données spatialisées de biomasses et de rendements. La culture de maïs a néanmoins besoin de validations supplémentaires, moyennant des flux de CO₂ mesurés sur d'autres sites et d'autres années. Le paramètre ELUEb aura aussi besoin d'être recalibré car sa valeur actuelle a été obtenue avec les données de CO₂ qui sont considérées comme partiellement erronées.

La paramétrisation du modèle pour la culture de colza faisait partie des objectifs initiaux de la

thèse. En effet, avec les trois cultures suscitées, elles représentent les quatre les plus cultivées en France. Les problèmes observés sur les flux de CO₂ acquis sur maïs ont également été constatés sur une des années de mesure sur colza à Auradé. La paramétrisation de cette culture a donc été repoussée. Néanmoins, un grand jeu de données est désormais disponible (grâce au projet Colza Digital et via d'autres sites de flux en Europe) et permettra une validation rapide de cette culture.

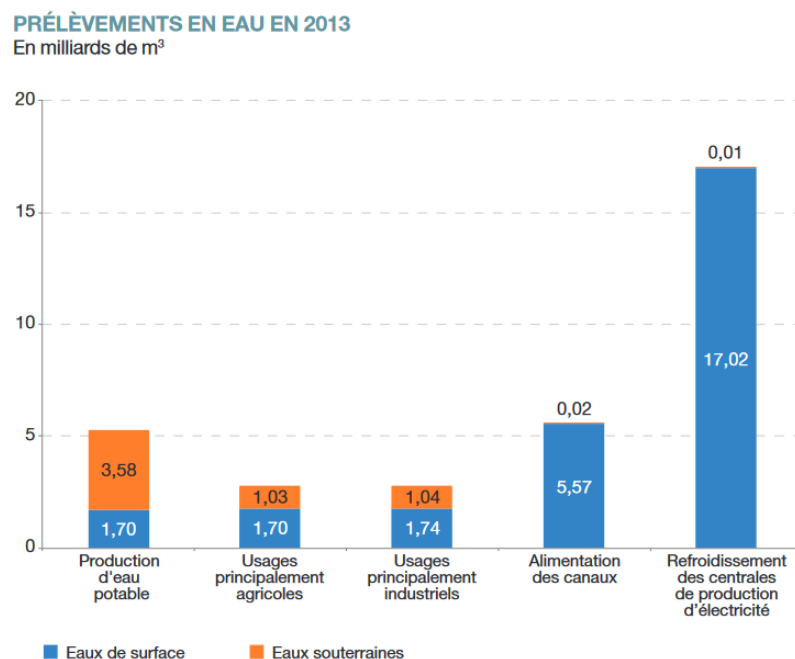
Enfin, l'étude réalisée sur la culture de blé a permis de mettre en exergue l'importance de la prise en compte des repousses/adventices pour une estimation précise des bilans de carbone. Actuellement les repousses sont simulées avec une paramétrisation générique, sans distinguer la nature de la végétation présente (*i.e.* repousse, CI, adventices). Un travail devra être mené pour affiner cette paramétrisation en fonction de leur nature.

Chapitre II

Chapitre II : Intégration d'un module de bilan hydrique à SAFY-CO₂

1. Pourquoi simuler les composantes du bilan d'eau

L'estimation des flux d'eau sur les parcelles agricoles et sur de grands territoires a un intérêt à la fois sociétal et environnemental. En 2013, la France a prélevé environ 33.5 milliards de m³ d'eau (Aillery et al., 2018), essentiellement en surface au niveau des lacs et des rivières (83%) mais également sous terre. L'essentiel de cette eau est destiné aux centrales nucléaires et sert à les refroidir (Fig. II-1). La quasi-totalité de cette eau 'de refroidissement', comme celle utilisée pour le maintien des canaux navigables, est restituée au milieu naturel. Les prélèvements d'eau potable, ainsi que ceux liés à l'usage agricole et industriel représentent 11 milliards de m³ en 2013. Le secteur agricole consomme à lui seul 2.7 milliards de m³ dont 37% proviennent des nappes phréatiques. Notons ici que les secteurs agricoles et industriels prélèvent chacun la même quantité d'eau.



Champ : France métropolitaine.

Source : Agence française de la biodiversité, Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE). Traitements : SDES, 2016

Figure II-1 : Prélèvement d'eau en France en 2013 par secteur. Exprimé en milliard de m³

Sur les 2.7 milliards de m³, 80% sont utilisés pour l'irrigation, le reste servant à nettoyer les machines agricoles, les bâtiments et à abreuver le bétail. Pourtant, seulement 6% de la surface agricole utile est irriguée (Le service de l'observation et des statistiques (SOeS), 2017). En 2013, l'irrigation représentait donc en moyenne 1700 m³.ha⁻¹ sur les surfaces irriguées. Néanmoins, l'irrigation est très

contrastée entre régions ; certaines n'irriguent pas du tout (région de la Lorraine ou département du Doubs), tandis que onze départements consomment plus de la moitié de l'eau douce utilisée par l'agriculture (Gers, Bouches-Du-Rhône, Landes, Gironde, Loiret, etc.). Le Sud-Ouest de la France est une zone fortement consommatrice d'eau (Fig. II-2).

Concernant la disponibilité de cette ressource, l'augmentation globale des températures, entraînant des épisodes de sécheresse estivale répétés, tend à la raréfier. Ces épisodes de fortes chaleurs et de faibles précipitations, qui sont amenés à s'accroître à l'avenir selon les modèles climatiques (Brisson and Levrault, 2010) imposent au monde agricole de s'adapter rapidement. L'été 2020, notamment, a été marqué par de fortes chaleurs et de faibles précipitations entraînant d'importantes restrictions sur la consommation en eau. Au 15 Septembre 2020, ce n'était pas moins de 77 départements qui étaient soumis à une restriction (au-delà de la vigilance) et 179 arrêtés étaient en cours (<http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr>).

Dans le même temps, des tensions concernant la gestion de la ressource en eau sont déjà observables sur le territoire, notamment concernant les nouvelles retenues d'eau opposant agriculteurs et associations environnementales. Ces tensions risquent de s'exacerber dans l'avenir et vont forcer le milieu agricole à s'adapter à cette nouvelle situation (Delgoutet, 2014).

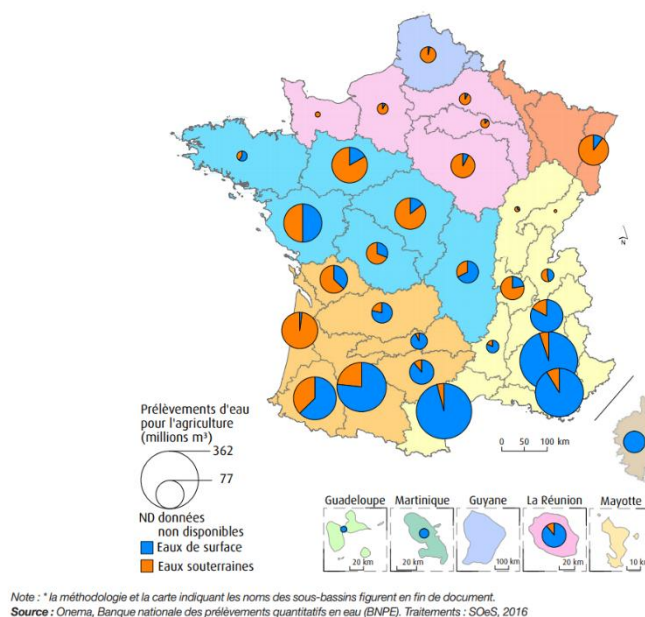


Figure II-2 : Prélèvements d'eau en France en 2013 par sous-bassins hydrographiques. Exprimé en million de m³.

Dans ce contexte, l'estimation spatialisée des composantes du bilan d'eau en agriculture via des modèles agronomiques, et donc de la consommation en eau des cultures, permettrait de mieux gérer cette ressource notamment via le calcul d'indicateurs d'efficacité de l'utilisation de l'eau (Tallec et al., 2013). En outre, un autre intérêt à intégrer la simulation des composantes du bilan d'eau dans l'approche de simulation présentée dans le chapitre précédent, est que cela pourrait nous permettre d'améliorer les estimations de biomasse, de rendement, de flux de CO₂ et donc les bilans de C. En effet, le stress hydrique, qui peut être plus ou moins marqué en fonction des cultures et des conditions météorologiques, impacte directement les flux de CO₂ (fermeture stomatique). Pour prendre en compte ces effets, il est communément admis qu'il est nécessaire de simuler l'évolution des stocks d'eau dans le sol, eux même pilotés par les flux d'entrée et de sortie (précipitation, drainage, évaporation, transpiration et flux

diffusifs). Cela nécessite donc de représenter les formalismes régissant ces flux et d'avoir des informations sur les capacités de rétention d'eau du sol.

L'ajout d'un module de bilan hydrique au sein de SAFY-CO₂ a donné naissance au modèle SAFYE-CO₂. Il peut être vu comme le couplage entre SAFY-CO₂ (Pique et al., 2020a) et la composante bilan hydrique du modèle SAFY-WB (Duchemin et al., 2015a) qui est adaptée de la méthode FAO-56 (Allen et al., 1998). Le module de bilan hydrique est tout d'abord détaillé dans la section suivante, puis le modèle est ensuite appliqué sur la parcelle d'Auradé et au niveau régional.

2. La simulation des flux d'eau

2.1. Généralités concernant la méthode FAO-56

Le module de bilan hydrique qui a été introduit dans SAFY-CO₂ est donc adapté du modèle FAO-56 proposé par la FAO (Allen et al., 1998). Ce modèle prend en compte la demande évaporative de l'atmosphère via l'évapotranspiration de référence (ET_0). ET_0 correspond, selon la FAO, au « *taux d'évapotranspiration d'un tapis gazonné vert de hauteur uniforme comprise entre 8 et 15 cm, en pleine croissance, ombrageant totalement le sol et ne manquant pas d'eau* ». À partir de ET_0 et d'un coefficient cultural K_c (Fig. II-3), il est alors possible d'estimer l'évapotranspiration d'une culture sous conditions standards (ET_c), c'est-à-dire sans aucun stress hydrique. Comme ces conditions sont rarement rencontrées dans la nature, la FAO propose le calcul d'une évapotranspiration ajustée (ET_{cadj}) via un coefficient de stress hydrique K_s , permettant de prendre en compte le stress hydrique subi par la plante. Le module hydrique de SAFYE-CO₂ est basé sur cette approche de calcul de ET_{cadj} .

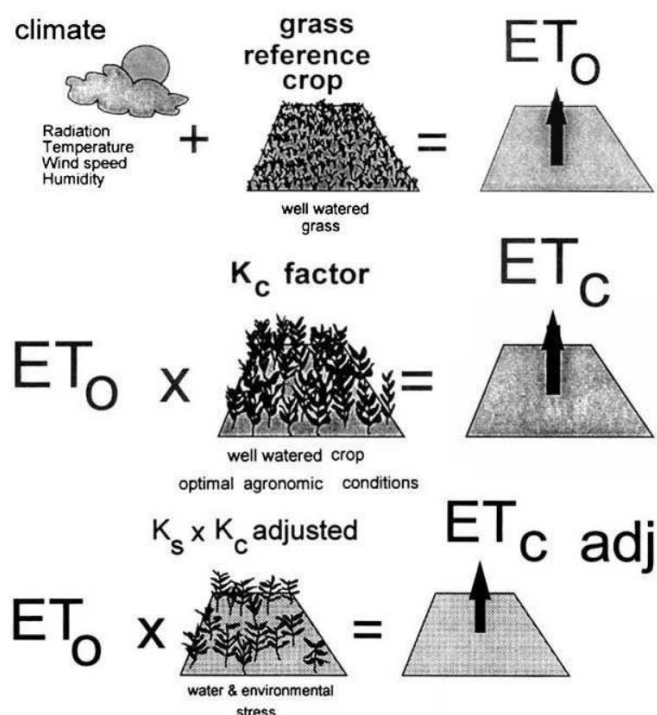


Figure II-3 : Evapotranspiration de référence ET_0 , évapotranspiration des cultures en condition optimale de ressource en eau du sol (ET_c) et en condition de stress hydrique (ET_{cadj}). Extrait de Allen et al., (1998).

2.2. Description du module de bilan hydrique

Le module de bilan hydrique simule au pas de temps journalier le contenu en eau du sol, ainsi que les flux d'évaporation et de transpiration. Dans cette approche, le sol est divisé en deux ou trois couches horizontales. Une couche de surface d'épaisseur constante, dite « couche évaporative » qui est concernée par l'évaporation et le prélèvement d'eau par les plantes pour leur transpiration. Une couche intermédiaire, qui existe seulement en présence de végétation, d'épaisseur variable en fonction de la croissance racinaire, dite « couche racinaire » dans laquelle les plantes puisent de l'eau pour la transpiration. Une couche profonde d'épaisseur constante qui ne contribue ni à l'évaporation ni à la transpiration.

Pour chacune de ces trois couches, il est possible de définir son contenu en eau maximal (accessible par la plante) à l'aide des paramètres de capacité au champ (θ_{FC} , pour '*field capacity*', exprimé en $m^3.m^{-3}$) et de point de flétrissement (θ_{WP} , pour '*wilting point*', exprimé en $m^3.m^{-3}$). θ_{FC} , défini comme la teneur maximale en eau disponible, correspond à l'humidité du sol après drainage par gravité. θ_{WP} , est défini comme l'humidité en dessous de laquelle la plante ne peut plus extraire l'eau du sol, autrement dit, quand les forces de rétention de l'eau par le sol deviennent supérieures aux forces de succion de la plante. La différence entre ces deux paramètres ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) donne la réserve utile (RU) qui est donc l'eau disponible pour la transpiration de la plante.

À partir de ces paramètres de sol, on peut définir le contenu en eau maximum (TWC pour '*total water content*') pour les trois couches (évaporative : '*evap*', racinaire : '*root*' et profonde : '*deep*'). Les équations [Eq. II-1 à II-3] sont établies à partir des θ_{FC} , θ_{WP} et des épaisseurs Z respectives de ces trois couches.

$$TWC_{evap} = (\theta_{FC_{evap}} - \theta_{WP_{evap}}) * Z_{evap} \quad \text{II-1}$$

$$TWC_{root} = (\theta_{FC_{root}} - \theta_{WP_{root}}) * Z_{root} \quad \text{II-2}$$

$$TWC_{deep} = (\theta_{FC_{deep}} - \theta_{WP_{deep}}) * Z_{deep} \quad \text{II-3}$$

Le contenu en eau de la couche évaporative (AWC_{evap} pour '*actual water content*') est mis à jour quotidiennement [Eq. II-4 et II-5], en fonction du contenu en eau de la veille, de l'eau apportée par les précipitations et/ou par l'irrigation (PE), de l'évaporation (E) et de l'eau prélevée par la plante dans cet horizon pour la transpiration (T). Comme 2 couches sont concernées par la transpiration, le partage de prélèvement entre ces dernières se fait grâce à une fonction (ftr) dépendante du contenu relatif de la couche évaporative par rapport à celui de ces deux couches.

$$AWC_{evap}(i) = AWC_{evap}(i-1) + PE(i) - E(i) - T(i) * ftr(i) \quad \text{II-4}$$

$$ftr(i) = \frac{AWC_{evap}(i-1)}{AWC_{evap}(i-1) + AWC_{root}(i-1)} \quad \text{II-5}$$

Les flux diffusifs ne sont pas pris en compte dans le calcul du contenu en eau du sol car il a été observé dans de précédentes études que ce terme n'apportait pas plus de précision aux estimations de l'ETR.

La quantité d'eau arrivant au sol (PE) est calculée [Eq. II-6] en fonction de l'eau apportée par les précipitations (P) et/ou l'irrigation (I), ainsi qu'en fonction de l'eau interceptée (Interc) par la végétation. En effet, avant d'atteindre le sol, l'eau peut s'évaporer. L'eau interceptée va alors dépendre [Eq. II-7] de la couverture de végétation au sol (F_{COVER}).

$$PE(i) = \max\{P(i) + I(i) - Interc(i), 0\} \quad \text{II-6}$$

$$Interc(i) = \min\{(P(i) + I(i)) * F_{COVER}, ET_0\} \quad \text{II-7}$$

La variable F_{COVER} est calculée quotidiennement [Eq. II-8] en fonction du GAI et de deux coefficients spécifiques à la culture considérée, K_{COV} et E_{COV} .

$$F_{COVER}(i) = K_{COV} * (1 - \exp(-E_{COV} * GAI(i))) \quad \text{II-8}$$

La fonction d'estimation de l'évaporation du sol a été modifiée par rapport aux anciennes versions du modèle (SAFY-WB ; Battude et al., 2017, Duchemin et al., 2015a). Elle est décrite plus en détail dans la section suivante.

La transpiration est définie selon la méthode FAO-56 [Eq. II-9] et dépend de ET_0 , du coefficient cultural K_{CB} (CB pour 'crop basal') et d'un coefficient de stress (K_S).

$$T(i) = K_{CB} * K_S(i) * ET_0(i) \quad \text{II-9}$$

Le coefficient K_{CB} est défini [Eq. II-10] à partir du GAI et de deux paramètres, K_{CBmax} et E_{TRP} .

$$K_{CB}(i) = K_{CBmax} * (1 - \exp(-E_{TRP} * GAI(i))) \quad \text{II-10}$$

K_S est défini [Eq. II-11] en fonction de l'humidité relative (H_R) des couches évaporative et racinaire, et d'un paramètre H_{CRIT} , spécifique à chaque culture et définissant l'humidité à partir de laquelle un stress apparaît.

$$K_S(i) = \min\left\{1 - \frac{HRS(i-1) - H_{CRIT}}{H_{CRIT}}\right\} \quad \text{II-11}$$

$$HRS(i-1) = \max\{H_{Revap}(i-1), H_{Rroot}(i-1)\} \quad \text{II-12}$$

$$H_{R_x} = \frac{AWC_x}{TWC_x} \quad \text{II-13}$$

Le contenu de la couche racinaire (AWC_{root}) est calculé [Eq. II-14] en fonction du contenu en eau de la veille, de l'eau excédentaire de la couche supérieure (Pe pour 'percolation', Eq. II-15), et de l'eau extraite par transpiration.

$$AWC_{root}(i) = AWC_{root}(i-1) + Pe_{evap}(i) - T(i) * (1 - ftr(i)) \quad \text{II-14}$$

$$Pe_x(i) = \max\{TWC_x(i) - AWC_x(i), 0\} \quad \text{II-15}$$

Enfin le contenu en eau de la couche profonde (AWC_{deep}) est simplement estimé [Eq. II-16] à partir du contenu de la veille, et de l'eau excédentaire de la couche supérieure (i.e. racinaire ou évaporative en fonction de la présence ou non de végétation).

$$AWC_{deep}(i) = AWC_{deep}(i - 1) + Pe_{root}(i) \quad \text{II-16}$$

2.3. Nouvelle formulation de l'évaporation

D'après la méthode FAO-56, l'évaporation est définie comme un produit de l' ET_0 par une fonction de stress liée à l'eau disponible dans le sol [Eq. II-17]. Cette fonction de stress, qui approxime la fonction bilinéaire de Allen et al., (1998) dépend de l'humidité relative de la couche évaporative et d'un coefficient de stress β .

$$Evap = (1 - F_{COVER}) * ET_0 * \left(1 - (1 - H_{Revap})^\beta\right) \quad \text{II-17}$$

Il a été remarqué que cette fonction ne représentait pas correctement l'évaporation pendant les périodes de sol nu (où $F_{COVER} = 0$). Ce constat qui avait déjà été établi par Soares et al. (1988a) s'explique aisément par la définition de l' ET_0 (voir section II-2.1), qui ne représente pas l'évaporation d'un sol nu mais l'évapotranspiration d'une surface couverte de gazon. Afin de corriger cette équation pour les périodes de sol nu (ex. entre deux cultures), le rapport de l'évapotranspiration mesurée (ETR_{MES}), sur les deux sites flux (Auradé et Lamasquère), sur l' ET_0 a été calculé en fonction de l'humidité du sol pour différentes valeurs d' ET_0 . Il a été remarqué que i) l' ETR_{MES} était parfois supérieure à l' ET_0 et que ii) l' ETR_{MES} était dépendante de l' ET_0 . Le premier point s'explique par la différence d'évaporation entre une surface en gazon et un sol nu, qui a été corrigée par un facteur K_S équivalent à 1.2. La seconde observation peut s'expliquer par le fait que lorsque la demande évaporative est forte, les premiers centimètres de sol vont sécher rapidement et vont créer une 'barrière' aux futures remontées capillaires. Le sol aura donc plus de mal à répondre à la demande évaporative de l'atmosphère quand cette dernière sera forte. Pour prendre en compte ce phénomène, la pente α de la fonction linéaire interpolant le rapport ETR_{MES}/ET_0 en fonction de l'humidité relative de la couche évaporative a été calculée pour différentes valeurs de ET_0 et pour chaque site instrumenté (Auradé et Lamasquère) en ayant corrigé l'ETR par le facteur K_S . Cette même pente, qui théoriquement devrait être égale à 1, a été recalculée pour les deux sites en pondérant la valeur de la pente α par le nombre d'observations. La Figure II-4 résume ces résultats. Ce travail m'a permis de définir une nouvelle équation de l'évaporation [Eq. II-18].

$$Evap = (1 - F_{COVER}) * K_S * (Ev_A * ET_0 + Ev_B) * ET_0 * \left(\frac{SM - \theta_{WP_evap}}{\theta_{FC_evap} - \theta_{WP_evap}}\right) \quad \text{II-18}$$

Afin de s'assurer de l'apport de cette nouvelle équation dans l'estimation de l'évaporation, cette dernière a été appliquée aux sites instrumentés. La Figure II-5 présente les cumuls d'évaporation dérivés des observations, ceux estimés à partir de l'équation de la FAO [Eq. II-17], et avec la nouvelle équation [Eq. II-18], ainsi que la comparaison entre observations journalières d'ETR et les valeurs obtenues avec les deux formalismes. La nouvelle équation offre des résultats légèrement meilleurs que l'équation de la FAO. L'erreur obtenue sur les données de Lamasquère passe de 0.54 mm.j⁻¹ à 0.49 mm.j⁻¹, et de 0.52 mm.j⁻¹ à 0.44 mm.j⁻¹ à Auradé. Notons également qu'une légère amélioration de la corrélation est constatée. La nouvelle équation de l'évaporation est donc conservée pour la suite de ce travail. L'équation de la FAO est toutefois conservée dans le modèle et peut être choisie par l'utilisateur.

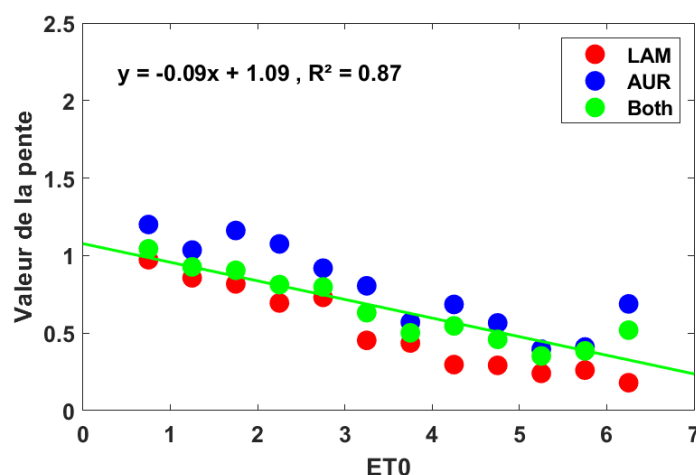


Figure II-4 : Valeur de la pente α en fonction de ET_0 . α correspond au coefficient directeur de la fonction affine interpolant le rapport ETR/ET_0 en fonction de l'humidité relative du sol.

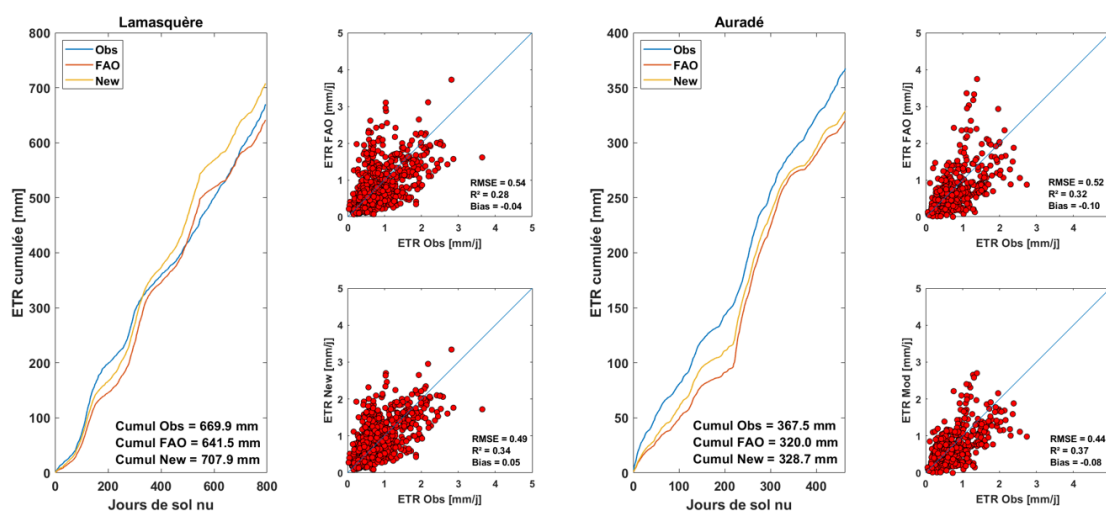


Figure II-5 : Evapotranspiration cumulée estimée à partir des mesures (en bleu), de l'équation de la FAO (Eq. II-17, en rouge) et de la nouvelle équation d'évaporation (New – Eq. II-18, en orange) sur les périodes de sol nu et scatter plots entre ETR observée et estimée à partir des deux équations suscitées pour les sites de Lamasquère (à gauche) et Auradé (à droite).

Suite à l'ajout de ce module de bilan hydrique dans SAFY-CO₂, une étude a été réalisée sur la culture de tournesol. Le nouveau modèle, SAFYE-CO₂, a été évalué sur le site flux d'Auradé et de manière spatialisée grâce à un jeu de données de biomasses et de rendements acquis sur 2 années dans la zone de l'OSR. Elle a donné lieu à une publication en 2020 dans la revue Remote Sensing. Cet article est présenté ci-après.

3. Résumé de l'article en Français

L'augmentation des besoins alimentaires mondiaux dans le contexte de changements climatiques requiert une compréhension précise du fonctionnement des terres agricoles et de leur impact sur les cycles biogéochimiques. Or, bien que les échanges gazeux entre les surfaces agricoles et l'atmosphère soient mesurables sur le terrain, ils sont difficilement quantifiables à l'échelle de la parcelle et sur de

grands territoires à cause de l'hétérogénéité des paysages et des pratiques culturales. Pourtant, évaluer précisément les bilans de carbone et d'eau des parcelles agricoles est essentiel pour promouvoir des pratiques agronomiques durables, et réduire la demande en eau et l'impact climatique des cultures, tout en maintenant des rendements suffisants. À partir de ce constat nous avons développé un modèle de culture, SAFYE-CO₂, qui assimile des produits satellites à hautes résolutions spatiale et temporelle (HRST) pour estimer au pas de temps journalier la biomasse, les flux d'eau et de CO₂, le rendement et le bilan de carbone des cultures à l'échelle parcellaire sur de grands territoires. Cette approche de modélisation a été évaluée pour la culture de tournesol grâce à deux jeux de données de terrain. Dans un premier temps, les sorties du modèle ont été comparées à deux années culturales de mesures acquises sur le site instrumenté ICOS (*'integrated carbon observation system'*) d'Auradé dans le sud-ouest de la France. Le modèle a simulé précisément les flux net de CO₂ (RMSE = 0.97 gC.m⁻².d⁻¹ et R² = 0.83) et d'eau (RMSE = 0.68 mm.d⁻¹ et R² = 0.79). Les performances du modèle ont ensuite été évaluées grâce à des données de biomasse et de rendement collectées sur 80 parcelles situées dans le sud-ouest de la France. Le modèle a été capable d'estimer les dynamiques de biomasse ainsi que les rendements avec précision (RMSE respectivement de 66 et 54 g.m⁻²). Afin d'étudier le potentiel d'application de cette méthode à grande échelle, et sachant que les propriétés de sol sont un facteur important en entrée du modèle, une analyse de sensibilité à deux produits sols existants (GlobalSoilMap et SoilGrid) a été réalisée. Nos résultats montrent que ces produits ne sont pas suffisamment précis pour pouvoir être utilisés à une échelle parcellaire en entrée du modèle, qui nécessite des informations plus précises sur les capacités de rétention d'eau du sol nécessaire à l'estimation des flux d'eau. De plus, nous affirmons que dans notre approche, aucun stress hydrique n'a besoin d'être considéré pour le calcul de la photosynthèse, puisque ce stress est déjà pris en compte implicitement via l'information satellite qui permet de décrire la dynamique et l'intensité de développement de la végétation via le GAI. Cette étude devrait être considérée comme une première étape pour combler le vide qui existe concernant l'estimation des composantes des bilans de carbone à l'échelle parcellaire sur de grands territoire, et pour estimer précisément l'effet de certaines pratiques agricoles, comme les cultures intermédiaires, sur les bilans de carbone et d'eau.

4. Combining high-resolution remote sensing products with a crop model to estimate carbon and water budget components: Application to sunflower (published in Remote Sensing)

Gaétan Pique^{1,2,*}, Rémy Fieuzal¹, Philippe Debaeke³, Ahmad Al Bitar¹ and Tiphaine Tallec¹, Eric Ceschia^{1,4}

¹ CESBIO, Université de Toulouse, CNES/CNRS/INRAE/IRD/UPS, Toulouse, France; fieuzalr@cesbio.cnes.fr (R.F.), albitara@cesbio.cnes.fr (A.A.B.), tallett@cesbio.cnes.fr (T.T.)

² Agence De l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie (ADEME), Angers Cedex 1, France;

³ INRAE, UMR 1248 AGIR, Castanet-Tolosan, France; philippe.debaeke@inra.fr

⁴ INRAE, USC 1439 CESBIO, Toulouse, France; ceschia@cesbio.cnes.fr

* Correspondence: piqueg@cesbio.cnes.fr

4.1. Abstract

The global increase in food demand in the context of climate change requires a clear understanding of cropland function and of its impact on biogeochemical cycles. However, although gas exchange between croplands and the atmosphere is measurable in the field, it is difficult to quantify at the plot scale over relatively large areas because of the heterogeneous character of landscapes and differences in crop management. However, assessing accurate carbon and water budgets over croplands is essential to promote sustainable agronomic practices and reduce the water demand and the climatic impacts of croplands while maintaining sufficient yields.

From this perspective, we developed a crop model, SAFYE-CO₂, that assimilates high-spatial-and-temporal-resolution (HSTR) remote sensing products to estimate daily crop biomass, water and CO₂ fluxes, annual yields and carbon budgets at the parcel level over large areas. This modeling approach was evaluated for sunflower against two in situ datasets. First, the model's output was compared to data acquired during two cropping seasons at the Auradé ICOS instrumented site in southwestern France. The model accurately simulated the daily net CO₂ flux (RMSE = 0.97 gC.m⁻².d⁻¹ and R² = 0.83) and water flux (RMSE = 0.68 mm.d⁻¹ and R² = 0.79). The model's performance was then evaluated against biomass and yield data collected from 80 plots located in southwestern France. The model was able to satisfactorily estimate biomass dynamics and yield (RMSE = 66 and 54 g.m⁻², respectively). To investigate the potential application of the proposed approach at a large-scale, given that soil properties are important factors affecting the model, a sensitivity analysis of two existing soil products (GlobalSoilMap and SoilGrids) was carried out. Our results show that these products are not sufficiently accurate for inclusion as inputs to the model, which requires more accurate information on soil water retention capacity to assess water fluxes. Additionally, we argue that no water stress should be considered in the crop growth computation since this stress is already present because of remote sensing information in the proposed approach

This study should be considered a first step to fulfill the existing gap in quantifying carbon budgets at the plot scale over large areas and to accurately estimate the effects of management practices such as the use of cover crops or specific crop rotations on cropland C and water budgets.

Keywords: crop modeling; carbon budget; water budget; remote sensing; soil properties

4.2. Introduction

Sunflower (*Helianthus annuus* L.) was introduced by Spaniards in Europe during the sixteenth century as an ornamental plant species before its oil started to be used for food during the nineteenth century. Currently, sunflower is cultivated on more than the 5 continents, with Ukraine and Russia being the largest producers, followed by the EU-28. In France, sunflower crops cover 590,000 ha, with an annual production of 1.36 M tonnes, resulting in an average yield of 2.3 t.ha⁻¹ (source: FAO, <http://www.fao.org/faostat/en>, 10-year average between 2007 and 2016). In France, this oilseed crop species is grown mainly in the central-western (Nouvelle Aquitaine) and southwestern (Occitanie) regions. Sunflower is a summer crop; it is mainly grown under rainfed conditions and has a low water-use (Tallec et al., 2013a). In southwestern France, the temperate, Mediterranean-like climate (dry and warm summers) results in sunflower crops being subjected to frequent and severe water stress conditions that impact crop productivity at both field and landscape/regional scales. These variations should be quantified to better manage croplands. Moreover, in this context, accurate estimation of yield, carbon (C) and water budgets at the field level over large areas remains challenging. The heterogeneous character of landscape in terms of climatic and soil conditions as well as the diversity of agricultural practices make the upscaling of agronomic models difficult. Thus, a precise understanding of the cropland C budget is needed, as well as agronomic indicators (*e.g.* water-use efficiency) useful for monitoring crop species such as sunflower.

Crop models were first used for research purposes (de Witt and Brouwer, 1970; G. F. Arkin et al., 1976) in the early 1970s. During the 1980s, they became more diversified and complex to meet management needs and to support field-scale decision making ((G. G. Wilkerson et al., 1983b), (D. P. Swaney et al., 1983) and farming applications (McKinion et al., 1989)). Today, a considerable number of crop models exist. They can be classified into 3 groups:

C-driven models, or what we call the “de Wit school” crop growth simulation models (Bouman et al., 1996a), are based on the assimilation of C by photosynthetic parts of the plant, such as the SUCROS ((van Laar, 1992)) or GECROS ((Yin, 2005)) models. These models, on the basis of their hierarchical architecture, are complex, require numerous parameters, and are difficult to calibrate; thus, they are difficult to upscale to large areas.

Water-driven models are based on a predetermined relation between crop growth rate and transpiration according to water productivity parameters. Compared to that of the previous class, the approach of this class results in models whose structure is less complex, leading to fewer parameters. Among the most representative ones are the AquaCrop (Steduto et al., 2009b) or AqYield (Constantin et al., 2015) models.

Radiation-driven models, which have been constructed on the basis of (Monteith and Moss, 1977b) approach, convert intercepted or absorbed solar radiation into aboveground or total biomass via a radiation-use efficiency parameter, significantly reducing the number of photosynthetic parameters needed. Most crop models are radiation driven, including the CERES (Jones et al., 1986b), EPIC (J. R. Williams et al., 1989b), STICS (Brisson et al., 2003a), SAFY (Duchemin et al., 2008b) and SAFY-WB (Duchemin et al., 2015b) models.

The model presented in the current study belongs to both the first and third groups. Indeed, it evolved from i) the SAFY-WB model (Duchemin et al., 2015b), which belongs to the third group and

allows the simulation of biomass production, yield and water fluxes and budget, and from ii) the SAFY-CO₂ model (Pique et al., 2020a), which calculates biomass production as the difference between plant assimilation and respiration.

Regarding sunflower, crop growth models are either generic, with a set of parameters specific to sunflower (AquaCrop, CropSyst (Stöckle et al., 2003b), EPIC, STICS or WOFOST (Diepen et al., 1989b)) or specific to sunflower (OilCrop-SUN, (Villalobos et al., 1996); SUNFLO, (Casadebaig et al., 2011b)).

To reduce the number of model parameters and to increase the robustness of the models upon upscaling, several remote sensing data assimilation approaches for crop models have been developed. The benefits of using HSTR satellite products in crop models have already been demonstrated in several studies (Battude et al., 2016b; Pique et al., 2020a; Sibley et al., 2014; Sus et al., 2013; Wu et al., 2012). These approaches are either based on establishing relations between remote sensing products and crop productivity (Running et al., 2000) or on calibrating the model's parameters (Cicek et al., 2010; Panda et al., 2010; Shanahan et al., 2001). Such approaches have already been applied to sunflower crops for biomass estimation (Claverie et al., 2012b; Ferrant et al., 2014). Those studies showed that accounting for the spatial heterogeneity in sunflower development is crucial for the accurate estimation of crop dynamics; nevertheless, these models are not able to estimate cropland C budgets. In this context, we propose a newly-developed agro-meteorological model, the Simple Algorithm For Yield, Evapotranspiration and CO₂ fluxes estimates (SAFYE-CO₂), that assimilates HSTR products, and we validate the model for use in sunflower. Adapted from models developed by (Pique et al., 2020a) and [17], this model allows us to simulate cropland growth, yield and CO₂ and water fluxes at a large scale because it requires little input data (*e.g.* little to no crop management data).

Initially, the Simple Algorithm For Yield estimates (SAFY) model was developed to estimate crop biomass and production and was first validated for use in winter wheat (Duchemin et al., 2008a), followed by sunflower and maize (Claverie et al., 2012a; Battude et al., 2016a). Those studies demonstrated the benefits of assimilating the HSTR green area index (GAI) derived from optical remote sensing satellite data for crop monitoring by calibrating several phenological parameters as well as light-use efficiency. Later, this model was coupled with a water module based on the FAO-56 approach (Allen et al., 1998) to estimate cropland evaporation (Ev) and transpiration (TR) and thus water stress and water needs. This resulted in the SAFY-WB (water balance) model, which was validated for use in wheat (Duchemin et al., 2015a) and maize (Battude et al., 2017a). More recently, Pique *et al.* (Pique et al., 2020a) showed the benefit of using HSTR GAI products for assessing the components of the C budget over winter wheat crops by adapting the SAFY model to a C module, which led to a new model called SAFY-CO₂. In line with these studies, a new model, coupling the SAFY-CO₂ model with the same water module as that in the SAFY-WB model, has been constructed and is evaluated here. The new model is called the SAFYE-CO₂ model [E stands for evapotranspiration (ETR)], which aims to assess daily biomass production and CO₂ and water fluxes, as well as annual yields and the C and water budget over croplands. The development and validation of the SAFYE-CO₂ model for sunflower was driven by the following perspectives: i) simulation of the water flux and of the soil water provides an opportunity to estimate the effects of water stress on crop growth, which could improve biomass and CO₂ flux estimates for summer crops (*e.g.* sunflower), and ii) SAFY-CO₂ has already been validated for use in winter wheat (Pique et al., 2020a), and validation for use in sunflower would allow us to simulate C and water budgets for sunflower-winter wheat crop rotations, which are very common in southwestern France.

In terms of upscaling the model over large areas and simulating the effects of water stress on crop production and C budgets, the objective of this study is twofold: i) to analyze whether a coupled remote

sensing/modeling approach such as that involving SAFYE-CO₂ is able to accurately reproduce sunflower function, *i.e.* biomass, yield and CO₂ and water fluxes, at the ground-atmosphere interface and ii) to evaluate the impact of current soil map products on the simulation accuracy as well as the additive value of coupling SAFY-CO₂ with a water module to improve sunflower simulation.

In the following sections, the materials and methods are described. Afterward, the results section starts with a validation of the SAFYE-CO₂ model against biomass, yield, and CO₂ and water flux measurements at the Auradé integrated carbon observation system (ICOS) instrumented site. A sensitivity analysis of the model to the soil parameters is then performed. Finally, SAFYE-CO₂ is validated via biomass and yield data collected from more than 80 fields during five years, covering a wide range of soil and climatic conditions. Maps of the components of the C budget over a cropping season are then presented. The study ends with a discussion on the benefits and limitations of our approach, raising issues concerning the assessment of accurate C and water budgets at the plot scale over large areas and discussing potential improvements for simulating those variables.

4.3. Materials

The proposed study used a large amount of data from several sources to calibrate, validate and upscale our model. In addition to meteorological inputs and soil property data needed for the model, high-resolution remote sensing data were required for calibration. The validation of the model is based on CO₂ and water flux measurements, biomass production and yield. The last two originated either from destructive measurements carried out at the FR-Aur site (see section II-4.3.2.2) or from surveys carried out in 2013, 2014 and 2015 (Champolivier et al., 2019). The following sections present these data as well as the study area.

4.3.1. Study area

The study area is located in southwestern France and encompasses 4 administrative departments (Haute-Garonne, Gers, Aude and Ariège, see Figure II-6). It is part of the Regional Spatial Observatory – Southwest [OSR-SO, <https://osr.cesbio.cnrs.fr/>] located near Toulouse and includes the instrumented ICOS agricultural site of Auradé (FR-Aur). The region is characterized by a temperate and Mediterranean-like climate, with dry and warm summers (see Table II-1). The Garonne River flows across the study area from south to north and has shaped the topography into terraces and hill landscapes that resulted from the erosion of old terraces. This has led to heterogeneous soils called "boulbènes" (silty soil on terraces) and "terrefort" (clayey-limestone soils on hills), characterized by contrasting textures (especially with respect to the clay content) and with variations in depth within each type of soil.

According to the 2015 French Land Parcel Identification System (LPIS, or the Registre Parcellaire Graphique in French), agricultural activity represents 66% of the study area (focus in Figure 1), which includes forests, grasslands, orchards, etc. Sunflower crops constituted 19.1% of the agricultural area.

In the region, sunflower is usually sown between April and May and is harvested between the end of August and September. The climatic conditions during the crop cycle of sunflower are characterized by high radiation and strong evaporative demand, while low and erratic rainfall occurs in the summer (Table 1). The selected study area is very seldom irrigated, like elsewhere in France (<5% of the sunflower area; (Champolivier, 2011)). Owing to its deep root system, its thick and hairy epidermis and its adaptive capability (through a reduction of the photosynthetic rates), sunflower is moderately

sensitive to water deficit. However, hydric stress occurring before pre-flowering can lead to early senescence, ultimately causing losses in yield and oil content.

4.3.2. Flux site and experimental instrumentation

Since 2005, the FR-Aur site (Figure II-6) has been highly instrumented for the continuous collection of micrometeorological, meteorological, soil and vegetation data (see (Béziat et al., 2009a) for more details) in the context of the OSR-SO. FR-Aur is also part of the European Research Infrastructure Consortium ICOS [<https://www.icos-cp.eu/>], which is a European network documenting long-term greenhouse gas concentrations in the atmosphere and greenhouse gas exchange between the surface and the atmosphere in several ecosystems under different pedoclimatic conditions (crops, grasslands, forests, etc.). The plot area is 23.5 ha and is highly heterogeneous because of the topography (17.3 m height difference), which results in different soil depths (from 100 cm to more than 200 cm) and thus different crop yield potentials. The FR-Aur field belongs to a conventional grain farm where only mineral fertilization is applied. The plot is characterized by a rapeseed/winter wheat/sunflower/winter wheat rainfed rotation. Sunflower was grown during the 2006-2007 and 2015-2016 cropping seasons (see Table II-1 for sowing and harvest dates). Hereafter, the crop years will be abbreviated by “CY” followed by the harvest year (e.g. CY-07 for the 2006-2007 crop season).

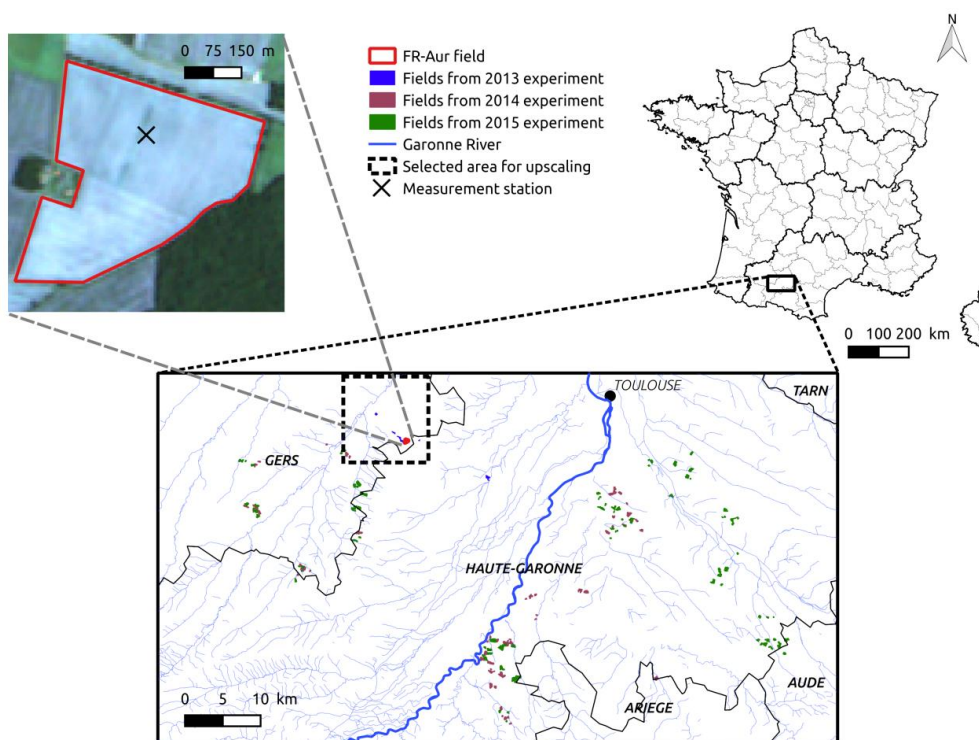


Figure II-6 : Top left: Fr-Aur field and the location of the measurement station; Top-right: Location of the study area in France; Bottom: Location of the fields in which biomass and yield data were collected in 2013, 2014 and 2015, as well as the selected area for the model’s upscaling (see section 4.3.3).

4.3.2.1. Meteorological data

The SAFYE-CO₂ model requires meteorological data as the main input, while vegetation remote sensing was used to constrain the modeled dynamics. Specifically, air temperature (T_{AIR}) at 2 m, incoming global radiation (R_G), rain and reference ETR (ET_0) were needed. These variables are provided either from *in situ* measurements acquired at the FR-Aur site for local validation or from SAFRAN reanalysis data (Durand et al., 1993a) for the spatial analysis.

At FR-Aur, meteorological data are recorded every 30 minutes and averaged on a daily basis (see (Béziat et al., 2009a) for more details). These data were used to calculate the ET_0 using the Penman-Monteith formula (Allen et al., 1998).

Table II-1 : Sowing and harvest dates of sunflower cultivated at FR-Aur and climatic variables averaged from the 15th of April to the 15th of September for all crop years.

Cropping year	Sowing	Harvest	Mean Temperature [°C]	Mean Radiation [MJ.m ⁻²]	Cumulative precipitation [mm]
2007	10th of April	20th of September	18.0	19.3	339
2013	-	-	17.3	20.1	364
2014	-	-	17.6	19.8	178
2015	-	-	19.0	20.2	275
2016	20th of April	23th of September	18.1	20.8	294
Average 2007-2016	-	-	18.2	20.3	267

The SAFRAN meteorological data were used as inputs to simulate the sunflower experiments of 2013, 2014 and 2015. SAFRAN reanalysis data are provided over a grid of 8 x 8 km² over France. In this study, the climatic data were estimated for each field using a bilinear interpolation of the 4 closest grid points.

The climatic conditions of all simulated years are summarized in Table II-1. Each variable is averaged from the 15th of April to the 15th of September, corresponding to the average sunflower growing season in the region. The crop cycles of CY-07 and CY-16 were quite similar, although 2016 was slightly hotter and sunnier than 2007 (Table II-1), leading to slightly higher biomass production in 2016. In 2013 and 2014, the growing seasons were colder compared to the season during 2015. The 2013 growing season (CY-13) was the wettest, and the CY-14 growing season was the driest. Note for the sake of clarity, that only sowing and harvest dates of CY-07 and CY-16 are indicated in Table II-1. Indeed, more than one field was simulated the others CY (respectively 9, 21 and 49 for CY-13, CY-14 and CY-15), thus the sowing and harvest dates vary by plot which explained the empty cases of Table 1.

4.3.2.2. Biomass and yield data

Destructive measurements were made at FR-Aur to characterize the sunflower dry aboveground mass (DAM) dynamics during CY-07 and CY-16 (see Table II-2). In CY-07, 30 plants were collected monthly inside the flux tower footprint area distributed on either side of the eddy covariance tower towards the prevailing winds. The DAM was obtained by drying samples in an oven at 65°C for 48 h. The total DAM produced (before harvest) was measured by cutting plants from a 24 m² area and measuring them. The grain yield (YLD) was provided by the farmers for CY-07, and the grains were separated from the heads and weighed to obtain yield for CY-16.

Extensive field campaigns were conducted in 2013, 2014 and 2015 to collect biomass and yield data across the study area (Figure II-6). In 2013, 9 ESUs (20 x 20 m²) corresponding to 8 different fields were monitored during the growing season. For each ESU and at 4 times during crop development (the last sampling was performed just before harvest), 5 samples of aboveground vegetation consisting of 10 adjacent plants were collected (except for the first date, when only 3 plants were collected), oven dried at 50°C for 48 h and then weighed. DAM was calculated by dividing the total biomass by the area sampled, calculated as the product of the interrow width and the length of the sampling area. On the last

sampling date, the grains were separated from the heads and weighed to calculate the yield.

Table II-2 : Dataset of DAM and yield as well as their measurement scale.

Year	Number of fields monitored	Dry Aboveground Mass	Final Yield	Workable final yield	CO ₂ and H ₂ O fluxes	Scale
2007	FR-Aur	7	1	1	Yes	Field/ESU*
2013	9	36	9	9	No	ESU
2014	70	-	36	21	No	Field
2015	116	-	79	49	No	Field
2016	FR-Aur	3	1	1	Yes	ESU

*Elementary Sampling Units

In 2014 and 2015, yield data were collected for more than 70 and 116 fields, respectively. They were provided by the farmers, and because some of the yield values were averaged over several fields, only yield data corresponding to one field were considered (see Table II-2). Two or three visits were made to each field in the 2014 and 2015 campaigns to characterize the crop growth status (*e.g.* canopy heterogeneity, presence of weeds, pest and disease pressure). From those observations, we defined quality scores, and low-quality data were discarded. These data corresponded to fields where i) vegetation-free areas larger than 2 m² were observed and ii) weeds covered more than 50% of the field. After discarding all these data (115), we kept data for 70 fields for the model evaluation (Table II-2). None of the fields monitored in 2013, 2014 and 2015 were irrigated.

4.3.2.3. Flux data

Turbulent fluxes of CO₂, water vapor (ETR and latent heat), sensible heat, and momentum were measured continuously using the eddy covariance method (Aubinet et al., 2012a; Baldocchi, 2003a; Moncrieff et al., 1997a) by the combination of an open-path fast infrared gas analyzer (LI-7500, LI-COR) and a 3D sonic anemometer (CSAT3, Campbell Scientific). The flux tower was installed near the center of the field (see Figure II-6). EdiRe software (Clement, 1999) was used to calculate the ETR and net CO₂ fluxes (see (Béziat et al., 2009a) and (Pique et al., 2020a) for details). Flux filtering, quality controls, and gap filling procedures were performed in accordance with the CarboEurope-IP recommendations (<http://www.carboeurope.org/>).

The net ecosystem exchange (NEE) of CO₂ was partitioned into gross primary productivity (GPP) and ecosystem respiration (R_{ECO}) according to the methods proposed by (Reichstein et al., 2005) and adapted for croplands by (Béziat et al., 2009a). During the period when bare soil was exposed (deduced from field observations), the GPP was set to 0, while the R_{ECO} was set equal to the NEE.

4.3.2.4. Soil data

To run the SAFYE-CO₂ model, data on the soil moisture at field capacity (θ_{FC}) and the permanent wilting point (θ_{WP}) are needed for each considered field to estimate the daily soil available water content (AWC). This information can be derived either from *in situ* sampling and laboratory analysis or can be inferred from soil texture products by applying pedotransfer functions (PTFs). In this study, we used both methodologies: data from *in situ* soil sampling at FR-Aur and data from the global soil databases GlobalSoilMap (GSM, Román Dobarco et al., 2019) and SoilGrids (SG, Hengl et al., 2017) at both FR-Aur and at the other 78 fields. These soil products were used to estimate the θ_{FC} , θ_{WP} and soil depth for all the considered fields in this study, including those at FR-Aur. The global soil databases provide the fraction of sand, clay and silt at a 90 m (GSM) or 250 m (SG) resolution as well as the soil depth. SG is

based on machine learning and remote sensing data, while GSM uses a data-mining technique and a bottom-up approach (Minasny and McBratney, 2010).

Table II-3 : Soil characteristics derived from in situ measurements and GlobalSoilMap and SoilGrids data at FR-Aur corresponding to 3 layers simulated by the model.

Source of data	Field Capacity [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]			Wilting Point [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]			Available Water Capacity [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]			Soil Depth [cm]
	Surface layer	Root layer	Deep layer	Surface layer	Root layer	Deep layer	Surface layer	Root layer	Deep layer	-
In situ	0.31	0.39	0.39	0.13	0.19	0.19	0.18	0.2	0.2	[100-200]
GSM	0.29	0.3	0.29	0.18	0.17	0.16	0.11	0.13	0.13	159
SoilGrids	0.34	0.33	0.33	0.25	0.21	0.21	0.09	0.12	0.12	188

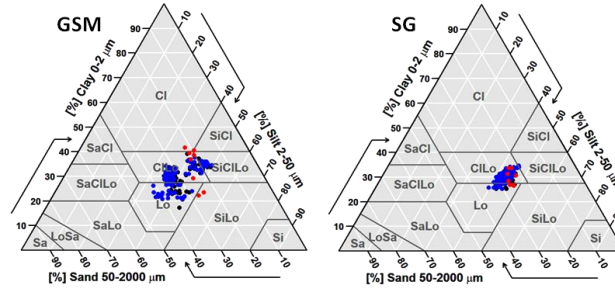


Figure II-7 : Soil type distribution derived from GlobalSoilMap (left) and SoilGrids (right) products based on the USDA classification system. The red, black and blue circles respectively correspond to fields in the 2013, 2014 and 2015 seasons.

We used the PTFs proposed by (Mercedes Román Dobarco et al., 2019) (eqs. 9-10) to calculate the volumetric soil moisture at field capacity (θ_{FC}) and at permanent wilting point (θ_{WP}). The estimations of the θ_{FC} , θ_{WP} and soil depth for FR-Aur using *in situ* samples, SG and GSM products are summarized in Table II-3 for the 3 soil layers considered in the proposed modeling approach (see section II-4.4.1).

The soil types of all the fields monitored in 2013, 2014 and 2015 were characterized based on the textures derived from the GSM and SG products (for the top 30 cm of the soil) and considering the United States Department of Agriculture (USDA) classification system (see Figure II-7). Considering all monitored fields, the GSM products suggest that 64% of the soils are clay loams, 23% are loams, 11% are silty clay loams, and the remaining soils vary between clay, silty clay and silty loams. Compared with the GSM products, the SG products suggest less heterogeneity among the soil types and classify 87% of the soils as clay loams, 12% as loams and less than 1% as silty clay loams.

4.3.3. Satellite data and products

4.3.3.1. Multisatellite optical images

Liu et al., (2010) and Lobell et al., (2003) highlighted the usefulness of assimilating HSTR satellite products into crop models, as it increased the accuracy in reproducing crop dynamics and/or reduced the number of model parameters. Thus, the accuracy of our approach is partly determined by the availability of remote sensing images. Indeed, to successfully calibrate some of the model parameters (see section II-4.4.2), a certain number of images at key dates had to be available. An extensive set of HSTR products derived from several sensors was thus used in this study. The main characteristics in terms of spatial resolution, temporal sampling and spectral bandwidth of each sensor are detailed in Table II-4, and the number of images (all in all, 147) from each sensor is shown in Figure II-8. For the purpose of the study, a temporal series of remote sensing products, averaged at plot scale, are needed.

Products of different spatial (from 8 to 30 m) and temporal (from 1 to 16 days) scales are thus used in order to get the most complete time series (Fig. II-8).

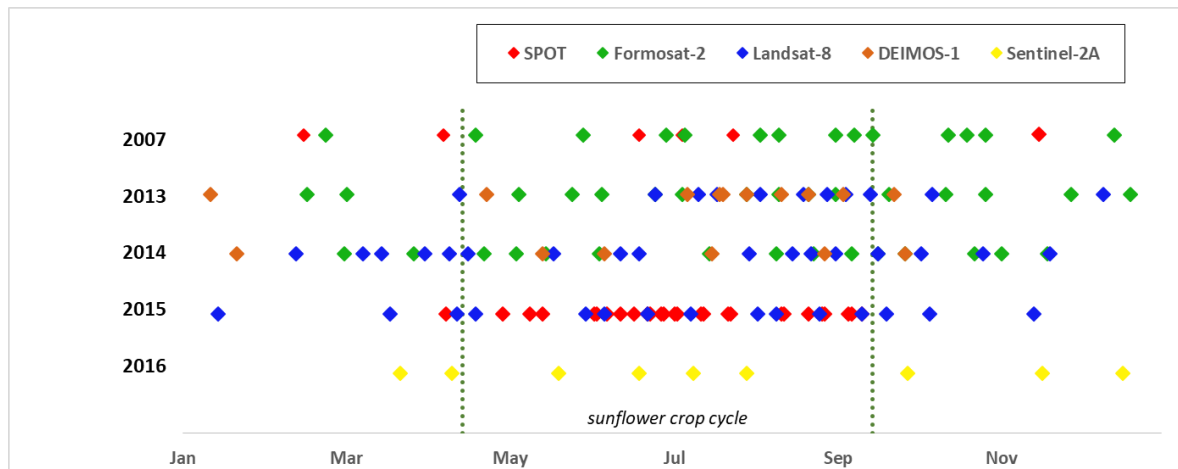


Figure II-8 : Timeline of images for each year of study and each sensor.

Table II- 4 : Main characteristics of the satellite sensors used in this study and the bands used to derive the GAI.

	SPOT	Formosat-2	DEIMOS-1	Landsat-8	Sentinel-2A
Spatial resolution	20 m (SPOT2-4) 10 m (SPOT5)	8 m	22 m	30 m	10 m
Revisit frequency	Between 1 and 3 days	1 day	Between 3 and 4 days	16 days	5 days
Footprint	60 km*60 km	24 km*24 km	Up to 625 km	(170 km*) 185 km	290 km
Wavelength (μm)	Green: [0.5-0.59]; Red: [0.61-0.68]; NIR: [0.79-0.89]; SWIR: [1.53-1.75]	Green: [0.52-0.6]; Red: [0.63-0.69]; NIR: [0.79-0.9]	Green: [0.52-0.6]; Red: [0.63-0.69]; NIR: [0.77-0.9]	Green: [0.53-0.59]; Red: [0.64-0.67]; NIR: [0.85-0.88]; SWIR1: [1.57-1.65]; SWIR2: [2.11-2.29]	Green: [0.54-0.58]; Red: [0.65-0.68]; VRE1: [0.7-0.71]; VRE2: [0.73-0.75]; VRE3: [0.77-0.79]; NIR: [0.72-0.95]; Narrow NIR: [0.85-0.87]; SWIR1: [1.57-1.66]; SWIR2: [2.11-2.29]
Viewing angle	Constant	Constant	Variable	Constant	Constant

(Battude et al., 2016a) showed that the advantages in terms of time sampling of using GAI estimates from multiple sensors outweigh the drawbacks in terms of sensor measurement mismatch. In their study, the authors compared the normalized difference vegetation index (NDVI) of different sensors and showed that, during the growing season ($NDVI > 0.2$) and over various crops (sunflower, maize, wheat, etc.), linear relationships [R values between 0.97 and 0.99 and relative root mean square error (rRMSE) values between 5.3 and 10.9%] exist between pairs of sensors [including DEIMOS-1, Formosat-2, Landsat-8, and SPOT4 (Take5) (Hagolle et al., 2015)]. The KALIDEOS processing chain [<http://kalideos.cnes.fr>] for atmospheric, radiometric and geometric corrections was used to derive surface reflectance values from the satellite data. The mean geometric correction accuracy was close to 0.2 pixels (LaFrance, 2012), which is satisfactory considering the area of the studied fields.

4.3.3.2. From image reflectance to GAI estimates

The remotely sensed GAI estimates were derived from surface reflectance values using the Biophysical Variables Neural NETwork (BV-NNET) tool (Baret et al., 2007a). BV-NNET is a trained

artificial neural network based on the inversion of the radiative transfer model PROSAIL (Jacquemoud et al., 2009b). The GAI estimates take into account the spectral and directional information of each sensor, which are of paramount importance when working with multiple satellites. The GAI value estimated by BV-NNET is an “effective GAI”, which does not consider the clumping effect and could lead to underestimation compared to that of the “true GAI”, mainly for high GAI values (Demarez et al., 2008a). For each simulated field, the mean GAI was calculated taking into account all the pixels of the considered plot after the application of an offset of 10 m to avoid edge effects.

4.4. Methods

4.4.1. The SAFYE-CO₂ model

The SAFYE-CO₂ model was constructed by coupling the SAFY-CO₂ model (Pique et al., 2020a) with the water module of the SAFY-WB model (Duchemin et al., 2015a) that has been adapted from the FAO-56 method (Allen et al., 1998). SAFY-CO₂ is a parsimonious agro-meteorological model running on a daily basis. It is driven by T_{AIR} and R_G as meteorological inputs. It simulates crop dynamics (GAI), crop production (DAM, YLD), CO₂ fluxes (GPP, R_{ECO} and NEE), and the annual net ecosystem C budget (NECB). Coupling with the water module, which can easily be added or removed, is needed to estimate crop TR and soil Ev and thus soil water content (SWC). From those data, soil water stress and plant water needs can be calculated. Adding this module requires two additional meteorological inputs, rain and ET_0 .

Since all equations involved in the SAFYE-CO₂ model have already been described in detailed in other studies (SAFY, (Duchemin et al., 2008a); SAFY-WB, (Duchemin et al., 2015b); SAFY-CO₂, (Pique et al., 2020a)), we will summarize here the main methods and the interactions between the water module and the SAFY-CO₂ model. All related parameters discussed in this section are summarized in Table II-5.

In the SAFYE-CO₂ model, GPP is first estimated as a function of the R_G , a climatic efficiency (ε_C), the absorbed photosynthetically active radiation (APAR) calculating from the GAI and the light-interception coefficient (K_{EXT}), a function of the light-use efficiency taking into account the fraction of the diffuse radiation ($ELUE_A$ and $ELUE_B$; see (Pique et al., 2020a)), and a function accounting for the decrease in canopy photosynthesis capacity during senescence (sR_{10}). The daily estimates of GPP are modulated by i) a thermal stress function defined by three cardinal temperatures limiting crop growth (T_{MIN} , T_{MAX} , T_{OPT}) and ii) a water stress function (WtS_V , see below). Net primary productivity (NPP) is estimated as the difference between the GPP and autotrophic respiration (R_A). R_A is estimated by the methods proposed by (McCree, 1974), which separates R_A into two components: maintenance respiration (R_M) and growth respiration (R_{GR}). R_M is computed as a function of the NPP of the previous day, a “Q₁₀-type” R_M equation (Van’t Hoff, 1898) (with two crop-specific parameters: Q_{10} and R_{10}), and the sR_{10} coefficient. R_{GR} is estimated considering the daily amount of biomass produced and using a R_{GR} coefficient parameter (Y_G) as proposed by (Amthor, 1989) and later improved by (Choudhury, 2000). Heterotrophic respiration (R_H) is estimated from a simple Q₁₀ first-order exponential equation (Q_{10_H}) and a reference respiration parameter (R_{HREF}).

CO₂ fixed by the vegetation is converted into dry biomass via a plant C parameter (C_{VEG}) and partitioned between aboveground (DAM) and belowground parts according to the methods proposed by (Baret et al., 1992). This process depends on three parameters (f_0 , f_∞ and c) that were adapted for sunflower crops based on data from (Ma et al., 2017a).

Like for SAFY, the daily increase in the GAI is estimated from the daily increase in DAM, the specific leaf area (SLA), and partition-to-leaf function (Pl_A and Pl_B). The decrease in the GAI starting with senescence is estimated based on a threshold from the growing degree days (starting from crop emergence as detected by the remote sensing data), from the senescence parameter (SEN_A) and from the rate of senescence (SEN_B). The final yield is simply deduced from the maximum value of DAM multiplied by a harvest index (HI). The set of equations used to describe the previous methods are detailed in the study by (Pique et al., 2020a).

In SAFY-CO₂, the soil is a single layer whose characteristics (parameters) are used to calculate R_H . In the water module of SAFYE-CO₂, the soil is divided into 3 layers: a surface layer of constant depth (D_{EVAP}), subject to Ev and TR; a root layer, subject to TR only, that increases in depth during the growing season at a rate (V_R) that tracks crop growth and limited by a maximum root depth (D_{ROOTS}); and a constant depth (D) deep layer. The last one is used to initialize the water content of the root layer during root growth and to control for the effects of percolation and drainage. The soil module is detailed in the paper of (Duchemin et al., 2015a). The soil AWC is essentially updated daily, taking into account rain (inputs), Ev and TR simulated based on the FAO-56 methods (Allen et al., 1998). The AWC is defined by the water fluxes (input and output) and the total water capacity (TWC) (*i.e.* $TWC = \theta_{FC} - \theta_{WP}$). TR depends on a maximal TR coefficient ($K_{cb_{MAX}}$), a reduction coefficient (K_{TRP}), a critical relative humidity parameter (D_{fe}), the GAI, and the maximum relative filling rate between the surface and root layer.

The water module also computes two water stress functions, one that drives Ev (WtS_E , eq. II-19, considering the AWC of the surface layer) and another that drives the growth of vegetation (WtS_V , eq. II-20, considering the surface and root layers) through GPP estimation. These functions represent the main link between the vegetation and the soil module and are defined as follows:

$$WtS_E = \left(\frac{SM - \theta_{WP}}{\theta_{FC} - \theta_{WP}} \right) \quad \text{II-19}$$

$$WtS_V = \min \left\{ 1 - \frac{RH_{TOT} - D_{fe}}{D_{fe}}, 1 \right\} \quad \text{II-20}$$

$$RH_{TOT} = \max \{ RH_{evap}, RH_{root} \} \quad \text{II-21}$$

where $SM [m^3.m^{-3}]$ is the SWC of the surface layer and where $\theta_{FC} [m^3.m^{-3}]$ and $\theta_{WP} [m^3.m^{-3}]$ are the water content at field capacity and at the permanent wilting point, respectively. D_{fe} is the critical relative filling rate for water stress, and RH_{evap} and RH_{root} are the relative humidity of the surface and root layers, respectively.

In the present study, the calculation of Ev was modified from that of (Duchemin et al., 2015a) according to the methods of (Soares et al., 1988a) because differences were observed between simulated and observed ETR during bare soil periods and because of the dependence of Ev on ET_0 . The reason is that FAO-56 method for estimating Ev was developed to reproduce homogeneous grass stands, whereas the soil is often completely bare during the fallow period. Additionally, (Soares et al., 1988a) asserted that, in addition to being ET_0 dependent, Ev depends on the hydraulic state of the soil surface layer. When ET_0 is high, the first several centimeters of the soil rapidly become dry, slowing the capillary rise of the remaining water. A new equation for estimating Ev was thus adopted :

$$Ev = K_{BS} * (Ev_A * ET_0 + Ev_B) * ET_0 * (1 - F_{cover}) * WtS_E \quad \text{II-22}$$

where ET_0 [mm.d⁻¹] is the reference evapotranspiration, K_{BS} [-] is a correction coefficient for bare soil, Ev_A [1/(mm.d⁻¹)] and Ev_B [-] are the evapotranspiration coefficients, and F_{COVER} is the vegetation cover fraction. F_{COVER} is estimated from the maximal vegetation fraction cover (K_{COV}), an exponential coefficient (E_{COV}) and the GAI. F_{COVER} can be derived from remote sensing and thus drives the model, but previous quantitative experiments did not show significant enhancement of the outputs; thus, we calculated it here, from the GAI and two parameters (see Table II-5).

The water module is impacted by the vegetation module through the calculation of F_{COVER} (which considers the GAI), and in turn, the vegetation module is impacted by the water module through the water stress function (WtS_V).

4.4.2. Model parameters

In addition to requiring meteorological data, the SAFYE-CO₂ model requires crop-specific parameters. These parameters came from several sources. Most of them could be obtained from the literature, some could be estimated via *in situ* measurements, and the rest were obtained from calibration (see Table II-5). The model could run using literature and *in situ* parameters only, but when the last category of parameters is not constrained by remote sensing, the model cannot cope with changing conditions in the fields, which renders the outputs inaccurate. The calibration procedure based on the satellite-derived GAI allows optimization of the phenological parameters and the A parameter of the light-use efficiency function. Once these parameters are calibrated, the outputs are representative of the GAI extraction area (*e.g.* pixels, fields, farms). To calculate the plot-scale C budget, data supplied by farmers, concerning the amount of C imported into fields as organic amendments are eventually needed.

4.4.3. Model parametrization and calibration

The calibration procedure incorporating remotely sensed GAI was detailed in the report by (Pique et al., 2020a). Six phenological parameters (Pl_A , Pl_B , SEN_A , SEN_B , SLA , D_0) as well as the A parameter of the light-use efficiency (see Table II-5) were calibrated during this process for each field and each year independently to that the simulated GAI matched the remotely sensed GAI. This procedure allows the model to accurately reproduce crop growth. This inversion process is adapted from the Nelder-Mead simplex method (Lagarias et al., 1998), in which a priori values and minimum/maximum boundaries are set for each retrieved parameter. A quadratic difference cost function—root mean square error (RMSE)—is minimized using the adapted simplex between the remotely sensed GAI and the simulated GAI. For minimization, a global approach based on 30 different a priori samples is used to avoid local minima while preventing unnecessary runs. Once completed, the inversion process results in a set of parameters allowing accurate reproduction of the remotely sensed GAI while avoiding biomass estimates as well as water and CO₂ flux estimates (see section II-4.4.1).

Table II- 5 : List of the SAFYE-CO2 model parameters for sunflower, values or a priori intervals of the parameters, method for setting them, and relevant sources.

Model	Name	Notation	Unit	Value	Method	Source
SAFY model	Climatic efficiency	E_C	-	0.48	Literature	Varlet grancher 1982
	Light interception coefficient	K_{EXT}	-	0.8	Literature	Flénet 96/Steer 96
	Minimal temperature for growth	T_{MIN}	°C	8	Literature	STICS
	Maximal temperature for growth	T_{MAX}	°C	42	Literature	STICS
	Optimal temperature for growth	T_{OPT}	°C	25	Literature	STICS
	Polynomial degree of thermal stress function	β	-	2	Literature	Duchemin 2008
	Harvest index	HI	-	0.29	Literature	Andrade 1995
	Specific leaf area	SLA	$m^2 \cdot g^{-1}$	$[10^{-3} - 4 \cdot 10^{-2}]$	Calibration	-
	Partition-to-leaf function parameter A	Pl_A	-	$[0.01 - 0.5]$	Calibration	-
	Partition-to-leaf function parameter B	Pl_B	-	$[10^{-4} - 10^{-2}]$	Calibration	-
Water module	Sum of temperature for senescence	SEN_A	°C	$[200 - 1800]$	Calibration	-
	Rate of senescence	SEN_B	$^{\circ}C \cdot d^{-1}$	$[10^2 - 3 \cdot 10^4]$	Calibration	-
	Day of plant emergence	Emerg	day	$[100 - 200]$	Calibration	-
	Depth of evaporative layer	D_{EVAP}	m	0.1	Literature	FAO-56 Allen 1998
	Maximum depth of the root system	D_{ROOTS}	m	1.4	Literature	Stone 2001
	Soil depth	D	m	-	Soil Data	-
	Humidity at field capacity	θ_{FC}	$m^3 \cdot m^{-3}$	-	Soil Data	-
	Humidity at the permanent wilting point	θ_{WP}	$m^3 \cdot m^{-3}$	-	Soil Data	-
	Root mean growth rate	V_R	$m \cdot ^{\circ}C^{-1}$	0.0025	Literature	STICS
	Evaporation coefficient A	Ev_A	mm^{-1}	0.09	Measurements	In situ ETR measurements
Carbon module	Evaporation coefficient B	Ev_B	-	1.09	Measurements	In situ ETR measurements
	Evaporation coefficient C	K_{BS}	-	1.2	Measurements	In situ ETR measurements
	Maximal transpiration coefficient	$K_{cb_{MAX}}$	-	1	Literature	FAO-56 Allen 98
	Critical humidity parameter	D_{fe}	-	0.41	Literature	Casadebaig 2008
	Maximal vegetation fraction cover	K_{COV}	-	0.92	Measurements	ICOS site data
	Fraction cover exponential coefficient	E_{COV}	-	0.62	Measurements	ICOS site data
	Transpiration reduction coefficient	K_{TRP}	1.01	Measure	Measurements	In situ ETR measurements
	Effective light-use efficiency parameter A	$ELUE_A$	$gC \cdot MJ^{-1}$	$[0.75 - 0.95]$	Calibration	-
	Effective light-use efficiency parameter B	$ELUE_B$	-	1.14	Measurements	In-situ measurments
	Q_{10} maintenance respiration parameter	Q_{10}	-	2	Literature	Amthor 2000
Carbon module	Reference maintenance respiration at 10°C	R_{10}	$gC \cdot g_{DOM}^{-1}$	0.0036	Literature	Szaniawski (1982)
	Growth respiration conversion efficiency parameter	Y_G	-	0.76	Literature	Szaniawski (1982)
	Root fraction parameters	$f_0 - f_{\infty} - C$	-	0.3 / 0.1 / 1.5	Literature	Baret 1992/Ma 2017
	Carbon content coefficient	C_{VEG}	$gC \cdot g_{VEG}^{-1}$	0.46	Literature	Béziat 2009
	Reference heterotrophic respiration at 0°C	R_{HREF}	$gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$	0.34	Literature	Suleau 2011
	Q_{10} heterotrophic respiration parameter	Q_{10_H}	-	2.3	Literature	Suleau 2011
	Conversion factor of Tair in Tsoil	t	-	1.07	Measurements	ICOS site data

4.4.4. Model validation and sensitivity analysis

The validation strategy adopted in this study is summarized in Figure II-9. It relies on several types of datasets. First, we evaluated the ability of SAFYE-CO₂ to simulate crop growth and development [leaf area index (LAI) and DAM], final production (YLD) and CO₂ (GPP, R_{ECO} and NEE) and water (Ev, TR) fluxes. To accomplish this, the model was run for the two crop seasons of sunflower at the FR-Aur site (CY-07 and CY-16) using *in situ* (IS) meteorological data. Additionally, *in situ* measurements were used to estimate θ_{FC} and θ_{WP} and the soil depth. These results are presented in section II-4.5.1.

For upscaling of the model, the impact of the soil products (GSM and SG were used to estimate θ_{FC} , θ_{WP} and soil depth) on the model's performance must be evaluated. For this purpose, the SAFYE-CO₂ model was run on the same two crop years at FR-Aur using the GSM or the SG products to estimate soil water retention parameters. The outputs were compared with those obtained with *in situ* measurements instead of soil products. Additionally, the results obtained with SAFYE-CO₂ were compared to those from the original SAFY-CO₂ version to assess whether the coupling of SAFY-CO₂ with the water module improves the model's outputs or not; section II-4.5.2.1 describes those results. Finally, the SAFY-CO₂ and SAFYE-CO₂ models were used to simulate DAM and YLD over a large area. In addition to the two crop years at FR-Aur, the fields from the 2013, 2014 and 2015 campaigns were simulated, and *in situ* measurements of DAM and YLD were used for validation. *In situ*

meteorological variables were used to simulate the crop years at FR-Aur, while data from SAFRAN were used to simulate the other fields/crop years. The findings related to this exercise are described in section II-4.5.2.2. All simulations were performed from 15 November to 14 November of the following year, usually representing one cropping season in the area of study.

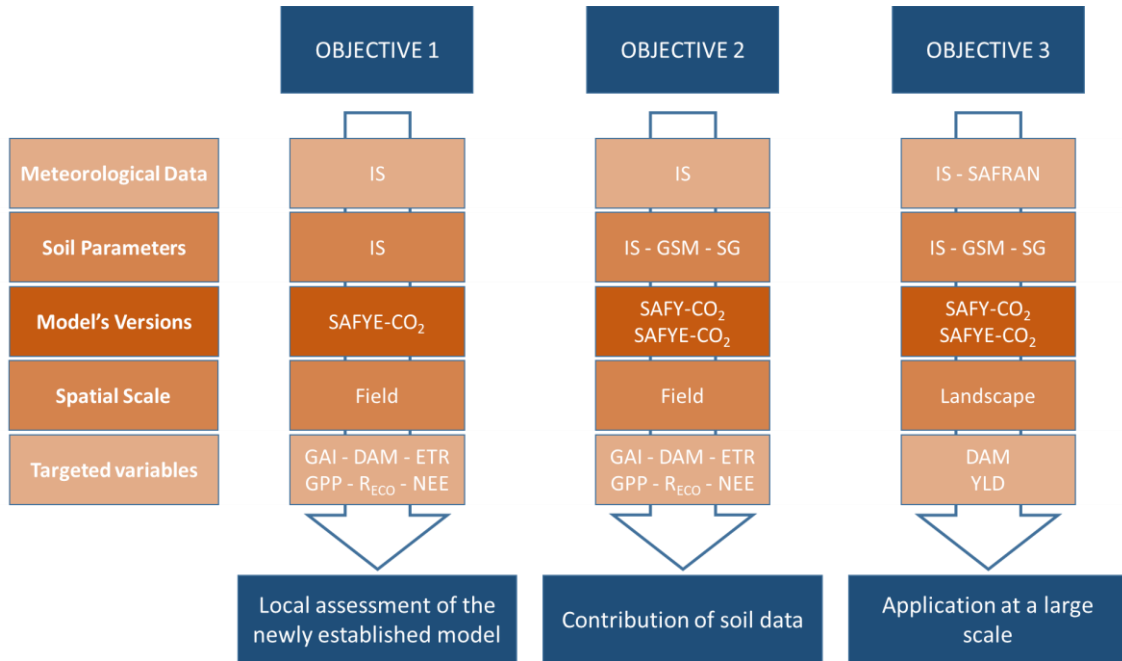


Figure II-9 : Summary of the validation strategy in terms of upscaling the SAFY-CO₂ and SAFYE-CO₂ models. IS is in situ, GSM is GlobalSoilMap and SG is SoilGrids.

4.5. Results

4.5.1. Local assessment of the model's performances

The SAFYE-CO₂ model was first tested against the *in situ* data of the FR-Aur site. Figure II-10 presents the correlation between the simulated and observed GAI, DAM and CO₂ (GPP, R_{ECO} and NEE) and water (ETR) fluxes for the two crop years of sunflower. Only data corresponding to the crop cycle (*i.e.* from emergence to harvest) were included to compute the GPP statistics, while the entire simulation period was considered to compute the model performances when estimating the other flux variables.

Since the model is calibrated by minimizing the quadratic difference between simulated and remotely sensed GAI, the estimation of GAI is used to verify that the inversion procedure is correctly performed rather than used to validate the modeled GAI. Consequently, the statistical results related to the GAI estimation are very good ($R^2 = 0.99$, RMSE = 0.099 m².m⁻² and rRMSE = 6.9 %), indicating that the sunflower's GAI dynamics are accurately reproduced by the model. The DAM is also robustly estimated in terms of correlation ($R^2 = 0.96$) and error (RMSE = 66 g.m⁻² and rRMSE = 16.2 %) data, and the yield (only 2 values at FR-Aur) is also estimated with a low error (RMSE = 53.8 g.m⁻²). Accurate estimation of biomass, and thus yield, is a prerequisite for assessing NECB with high precision. CO₂ fluxes are correctly simulated, although compared with CY-07 CO₂ fluxes, CY-16 CO₂ fluxes are estimated with lower accuracy due to the lack of satellite images throughout the agricultural season. Indeed, for CY-16, only 4 images were available during sunflower development (it was the beginning of Sentinel's mission). In particular, no images were available from 30 July to 28 September (see Figure II-8), leading to a senescence period that was poorly documented by the remotely sensed GAI and a

model-simulated senescence stage that was too early. The poor representation of the senescence phase in 2016 led to an underestimation of GPP and R_{ECO} . This period is easily identifiable on the scatter plots (Figure II-10 C-D) and corresponds to the green points underestimated by the model. Indeed, the mean bias of the simulated GPP and R_{ECO} are higher for CY-16 (respectively -2.21 and -0.69 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) than for CY-07 (respectively -0.11 and -0.16 $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) as well as the slopes associated to these data (respectively 0.75 and 0.65 for CY-07 and 1.22 and 1.00 for CY-16). Nevertheless, when enough images are available to describe the crop dynamics (notably key dates such as those corresponding to emergence, maximum vegetation, start of senescence, harvest), the crop production as well as the CO_2 and water fluxes are estimated with acceptable accuracy (see (Pique et al., 2020a)).

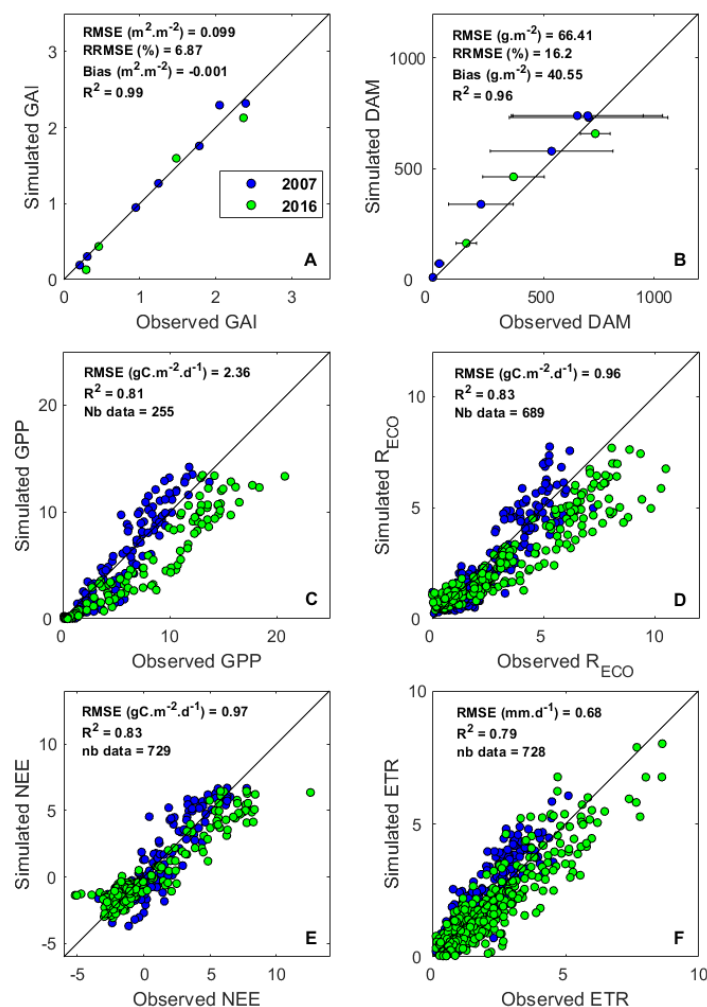


Figure II-10 : Scatter plots of the observed and simulated GAI (A), DAM (B), GPP (C), R_{ECO} (D), NEE (E) and ETR (F) for the two crop years of sunflower at FR-Aur and mean statistic over the 2 crop years.

GPP and R_{ECO} are estimated with relatively low errors (RMSE of $2.36 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ and $0.96 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ respectively and rRMSE of 39.5 and 40.9 % respectively) and good correlations (R^2 of 0.81 and 0.83, respectively).

In the proposed approach, the errors associated with GPP and R_{ECO} compensate for each other when estimating NEE (which is calculated from the difference between the two variables). This resulted in an accurate estimation of the NEE (RMSE of $0.97 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ and R^2 of 0.83) despite the lack of images during the 2016 senescence phase.

The model is also able to reproduce the ETR (Ev+TR) dynamics of the two crop years with good accuracy (RMSE of 0.6 mm.d⁻¹, rRMSE = 40 % and R² of 0.79). For the CO₂ fluxes, the ETR is underestimated by the model for CY-16 during the senescence period, which led to a decrease in TR before the end of the observed crop cycle (Figure II-10 F).

In the proposed approach, R_H depends only on the soil temperature, while it is known to be impacted by many other factors (*e.g.* AWC and soil organic C content). In their study, (Pique et al., 2020a) discussed taking into account AWC in the estimation of R_H. We thus estimated R_H according to the (Delogu, 2013-eq. III.5) that accounts for AWC. During the two simulated crop years at FR-Aur (data not shown), the temperature-dependent-only formulation performed better (RMSE = 0.5 gC.m⁻².d⁻¹ and R² = 0.36) than the combined temperature- and AWC-dependent equation (RMSE = 0.73 gC.m⁻².d⁻¹ and R² = 0.06), even when considering *in situ* AWC to estimate R_H (RMSE = 0.61 gC.m⁻².d⁻¹ and R² = 0.15). We therefore kept the first-order exponential equation that depends only on soil temperature for the rest of the study.

4.5.2. Large scale application

4.5.2.1. Impact of soil data and of coupling with the water module on model performance

The two sunflower crop years at FR-Aur were simulated with the SAFYE-CO₂ model using field capacity, the permanent wilting point and soil depth estimated from i) the *in situ* measurements, ii) the GSM products, and iii) the SG products. These two crop years were also simulated with iv) the SAFY-CO₂ model to evaluate the benefits of coupling with the water module compared to the previous version. The different evaluated configurations of the model are referred to as the following: i) SAFYE-CO₂^{IS}, ii) SAFYE-CO₂^{GSM}, iii) SAFYE-CO₂^{SG} and iv) SAFY-CO₂.

Figure II-11 summarizes the statistics (RMSE and R²) obtained when testing the different configurations of the model in simulating the target variables (GAI, DAM, GPP, R_{ECO}, NEE and ETR) for CY-07 and CY-16. There are no statistical data on ETR for SAFY-CO₂, as this version does not simulate water flux. The differences observed between the different tested configurations are mainly due to water stress. In addition to simulating water fluxes (Ev, TR), the water module impacts vegetation photosynthesis and growth through a water stress function (WtSv). Therefore, correctly estimating AWC is essential for accurate simulation of crop growth.

Regarding CY-07, the GAI and R_{ECO} are estimated with nearly the same accuracy for each model configuration. Concerning the GAI, the good performance of each model configuration indicates that all the configurations were able to accurately fit the remotely sensed GAI regardless of the soil data used. The errors in R_{ECO} are also similar between the different configurations for two reasons: i) the heterotrophic component of R_{ECO} is estimated in the same way for all versions, and ii) the autotrophic component, depending on the GPP, differs between versions only at the end of the crop cycle when water stress occurs. However, greater differences occur for the DAM, GPP, NEE and ETR estimates, where SAFYE-CO₂^{GSM} and SAFYE-CO₂^{SG} show low accuracy. This is due to the overestimation of the water stress at the end of the season, which in turn underestimates the water fluxes and GPP and thus the DAM. Indeed, TWC is underestimated for both SAFYE-CO₂^{GSM} and SAFYE-CO₂^{SG} during this period (see section II-4.3.2.4), leading to an underestimation of AWC, which induces stress at the end of the cropping season.

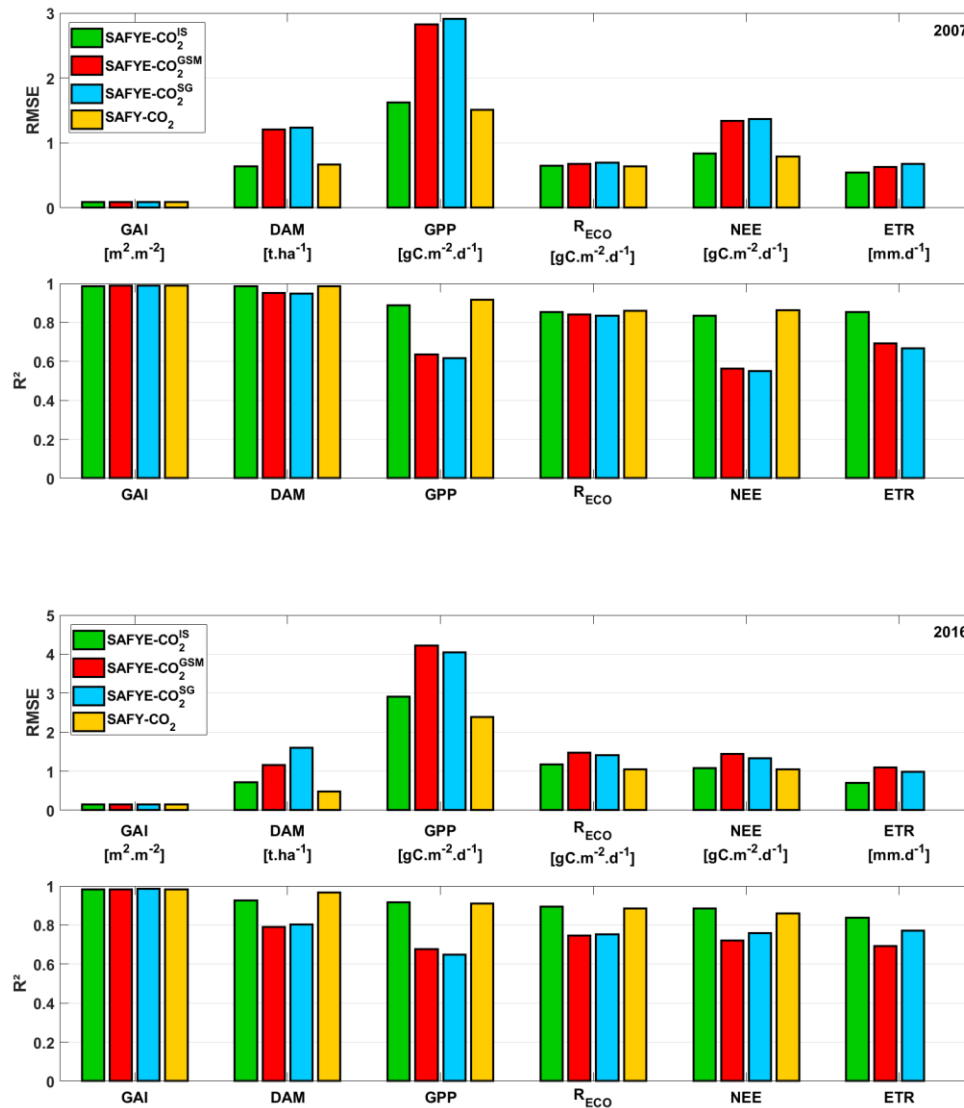


Figure II-11 : RMSE and R^2 values for the main model's output for CY-07 (a) and CY-16 (b) at FR-Aur via SAFY-CO₂ (orange bars) or SAFYE-CO₂ run with *in situ* soil data (SAFYE-CO₂^{IS}, green bars), GlobalSoilMap data (SAFYE-CO₂^{GSM}, red bars) and SoilGrids data (SAFYE-CO₂^{SG}, blue bars).

For CY-16, the same observation can be made concerning the estimations of the GAI. Each version is able to accurately reproduce GAI dynamics. However, SAFYE-CO₂^{IS} largely outperformed SAFYE-CO₂^{GSM} and SAFYE-CO₂^{SG} for all the other variables. SAFYE-CO₂^{SG} and SAFYE-CO₂^{GSM} show high errors when estimating GPP and ETR because, like CY-07, those versions largely overestimated water stress, inducing early senescence and thus an underestimation of the CO₂ and water fluxes.

Despite the observed water stress during both simulated years (at the end of the crop cycle), the best performances in estimating CO₂ fluxes were achieved by the SAFY-CO₂ model that did not simulate water stress, indicating that the water stress is already taken into account through the remotely sensed GAI. Additionally, the water module adds an additional level of complexity, while the performance of SAFY-CO₂ is already very high.

Figure II-12 shows the components of the NECB estimated with the different configurations of the model compared with observed values: the net annually cumulated CO₂ fluxes [net annual ecosystem productivity (NEP)], the C input as seeds (C_{INP}) and the C exported at harvest (C_{EXP}). Because of the poor estimates of TWC deduced from GSM and SG products, SAFYE-CO₂^{GSM} and SAFYE-CO₂^{SG} overestimate NEP and underestimate C_{EXP} for both simulated years. Both models' configurations overestimate water stress, especially at the end of the season when AWC is low, which leads to premature senescence and thus an early harvest. In the absence of vegetation, the only CO₂ flux is R_H (flux towards the atmosphere), so shortening of the crop cycle by the two model configurations leads to an overestimation of NEP. The same reason explains the underestimation of C_{EXP}. The more stressed the vegetation is, the lower the total biomass production and the yield are. On the other end, both SAFYE-CO₂^{IS} and SAFY-CO₂ were able to accurately reproduce the NECB for CY-07 (-4.3 and -10.8% for SAFYE-CO₂^{IS} and SAFY-CO₂, respectively) and for CY-16 (+15 and -6.2% for SAFYE-CO₂^{IS} and SAFY-CO₂, respectively), as both configurations were able to accurately simulate the components of the C budget.

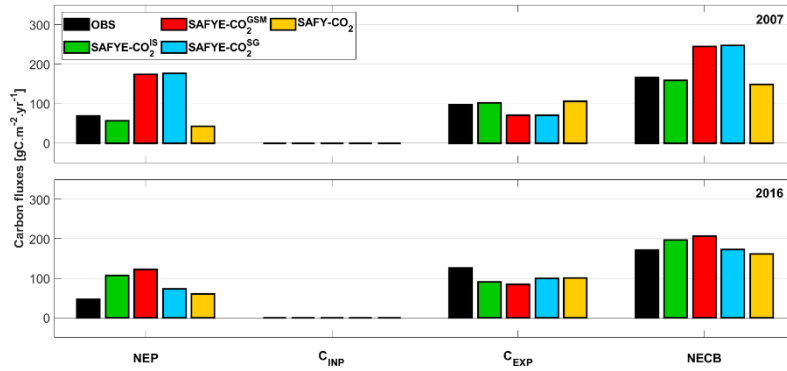


Figure II-12 : Components of the net ecosystem carbon budget for CY-07 (a) and CY-16 (b) at FR-Aur for the SAFYE-CO₂^{IS} (green bars), SAFYE-CO₂^{GSM} (red bars), SAFYE-CO₂^{SG} (blue bars) and SAFY-CO₂ (orange bars) models compared to observed value (black bars).

4.5.2.2. Biomass and yield estimates

Apart from the two sunflower crop years available at FR-Aur, the model was evaluated for DAM and YLD over numerous fields in 2013, 2014 and 2015 (see section II-4.3.2.2) to assess its ability to reproduce those variables under a variety of climatic, soil and management conditions. Since no soil *in situ* measurements were available at the plot scale in 2013, 2014 and 2015, the SAFYE-CO₂^{IS} configuration could not be tested.

Figure II-13 presents DAM and YLD simulated by SAFYE-CO₂^{GSM} (A-B), SAFYE-CO₂^{SG} (C-D) and SAFY-CO₂ (E-F). Although SAFYE-CO₂^{GSM} and SAFYE-CO₂^{SG} showed good overall performance at estimating DAM over the whole dataset (R² of 0.78 and 0.74, respectively; RMSE of 110 and 119 g.m⁻², respectively), these two models' configurations had difficulty accurately estimating the final DAM for the 2013 field campaign. This could be explained by water stress simulated at the end of the season, which slows down crop growth and thus underestimates final biomass. This inaccurate estimation of water stress was the result of poor estimation of the TWC. In the previous sections, TWC derived from GSM and SG were compared to the value derived from *in situ* measurements performed at FR-Aur (Table II-3). The values associated with the global soil databases were lower than those observed *in situ*, and only a few variations were observed in terms of texture (particularly for SG, Figure 2). The TWC distributions derived from GSM and SG for all the studied fields are presented in Figure II-14 and were compared to values derived from *in situ* measurements collected nearby (*i.e.* 45 fields

located in the northwestern part of the study area—experiment described by (Pique et al., 2020a)). The values of TWC derived from the global soil databases are low compared to those obtained from the previous studied fields, and very little spatial variation is present. The TWC derived from GSM ranges between 0.11 and 0.14 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, while the TWC derived from SG is even less variable—between 0.12 and 0.13 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$. Considering the *in situ* measurements, soils in the study area present more variation, with the TWC between 0.10 and 0.16 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$. These low and quite spatially constant TWC values derived from the global soil databases undoubtedly lead to an overestimation of water stress and thus to an underestimation of the final DAM. Nevertheless, SAFY-CO₂, which does not simulate water flux or water stress, better estimated DAM (R^2 of 0.91 and RMSE of 73 $\text{g}.\text{m}^{-2}$) and especially better reproduced the final highest DAM values (red dots in Figure 8 E), confirming that SAFYE-CO₂^{GSM} and SAFYE-CO₂^{SG} simulated too much water stress in 2013.

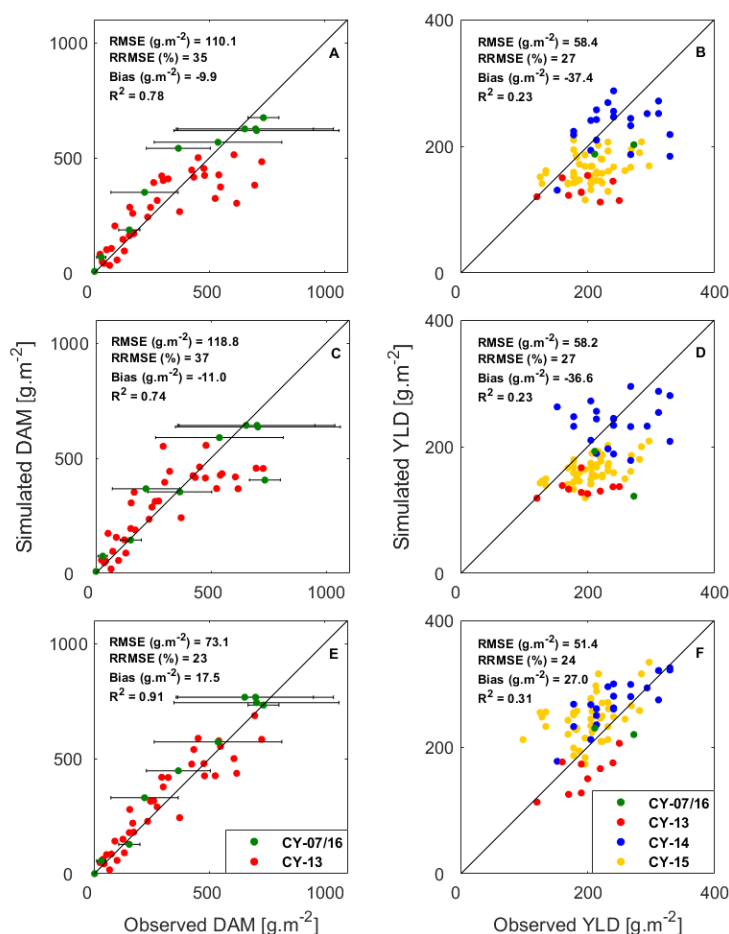


Figure II-13 : Scatter plots of simulated and observed DAM (left) and YLD (right) obtained with SAFYE-CO₂^{GSM} (A-B), SAFYE-CO₂^{SG} (C-D) and SAFY-CO₂ (E-F) model.

Regarding YLD estimates (Figure II-13 B-D-F), all versions have difficulty to reproduce the observed values accurately. This is possibly due to several factors. First, YLD is calculated from the maximum value of DAM using a constant HI. The HI of sunflower is known to vary with the length of the grain filling period and with temperature (Bange et al., 1998) but also with water stress (Gholinezhad et al., 2009); moreover, there is some additional variations due to crop variety (Debaeke et al., 2010). These factors are not yet accounted for in the proposed approach. Additionally, the observed yields were provided by the farmers, and may have by high uncertainty. Indeed, compared to the “true” yield, those data are subject to significant grain losses at harvest.

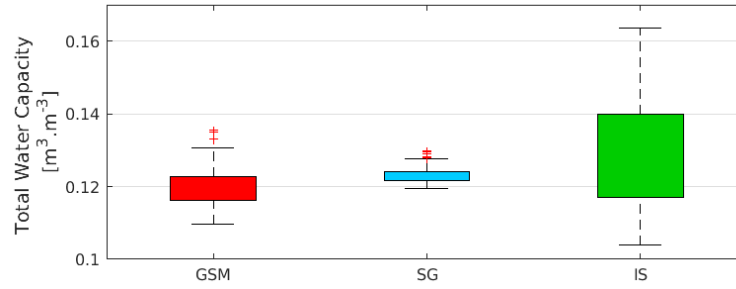


Figure II-14 : TWC of the fields simulated in this study derived from GSM and SG and of 45 fields within the study area estimated with *in situ* (IS) measurements.

4.5.3. C budget assessment at the landscape scale

Since the SAFYE-CO₂ model has difficulty reproducing sunflower growth if no accurate information on soil TWC is available (*i.e.* SAFYE-CO₂^{GSM} and SAFYE-CO₂^{SG}, which is the case at the landscape scale), the SAFY-CO₂ model was used to simulate the components of the C budget of CY-15 at the landscape scale (Figure II-15) for more than 200 fields (black dashed square in Figure II-6). Figure II-15 presents the corresponding NEP (A), C_{EXP} (B) and resulting NECB (C).

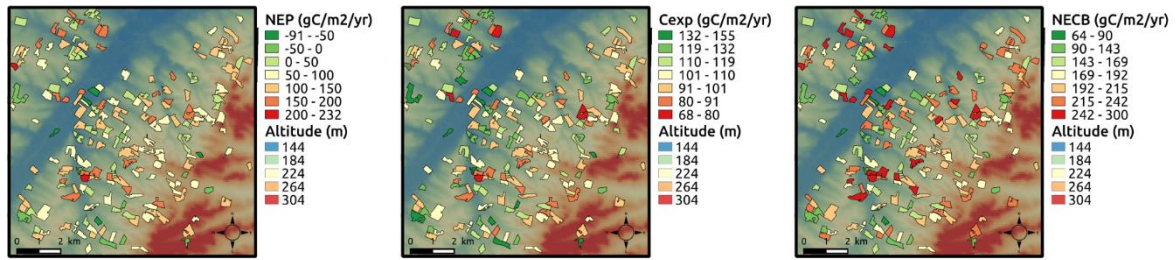


Figure II-15 : The annual carbon budget (NECB) and its component, NEP and Cexp, simulated for 200 fields with SAFY-CO₂ inside the study area for CY-15. Digital elevation model from *Shuttle Radar Topography Mission* is displayed in the background.

Considering all 200 fields, the simulated NEP is between -91 (sink) and 232 (source) gC.m⁻².yr⁻¹, while the amount of C exported at harvest is between 68 and 155 gC.m⁻².yr⁻¹. This results in a NECB between 64 and 300 gC.m⁻².yr⁻¹, which means that each simulated field behaves as a C source whose flux is towards the atmosphere. The topography seems to slightly affect sunflower development. This tendency can be seen in Figure II-15 A, plots where the C assimilation is higher (lowest NEP) are located mainly in plains and valleys. The same observation can be made for the C_{EXP} term, meaning that the highest yields are observed in plains or in the lowest parts of hillsides. However, high yields are also observed in hilly areas, and poor yields are also observed in plains. Concerning the NECB, the tendency is less clear as the C budget is conditioned by the NEP and the C_{EXP} term, whose signs may be opposite, with each favorably affected by good soil conditions (not short of water). Additionally, NEP can be affected by spontaneous regrowth events or weeds, increasing the CO₂ net assimilation, albeit with no effect on yield. Differences in the availability of water resources for crop management can also explain the spatial variability in the NECB and its components. All plots simulated here are sources of C because the length of the sunflower cycle is short, which leaves a long fallow period that releases C from R_H to the atmosphere. This observation is consistent with the results of a meta-analysis conducted for more than 15 flux crop sites in Europe by (Ceschia et al., 2010a).

4.6. Discussion

4.6.1. SAFYE-CO₂ overall performances

The SAFYE-CO₂ model for sunflower was validated in this study. Section 4.1 presents the results achieved with this approach using *in situ* soil measurements to calculate SWC parameters and soil depth. The performances for simulating the DAM and yield are within the range of those of other studies. As an example, (Todorovic et al., 2009a) compared the performances of three crop models (AquaCrop, CropSyst and WOFOST) for simulating aboveground biomass and yield of sunflower. Those authors showed that under rainfed conditions (similar to the conditions in the present study), the accuracy of the models ranged from 63 (WOFOST) to 204 (AquaCrop) g.m⁻², while SAFYE-CO₂ estimated DAM at FR-Aur with an error of 66 g.m⁻². Concerning yield, SAFYE-CO₂ (using *in situ* measurements to estimate the TWC) provided estimates with an accuracy (error of 54 g.m⁻²) similar to that shown by (Todorovic et al., 2009a), who reported errors ranging from 70 (AquaCrop) to 94 g.m⁻² (CropSyst). However, the performances for estimating yield with SAFYE-CO₂ should be taken with caution because of the small number of comparisons with field observations (only 2 corresponding to the Auradé site in 2007 and 2016), meaning that additional validation exercises are needed.

CO₂ fluxes are also robustly estimated by the SAFYE-CO₂ model and are within the range of other models. (Lehuger et al., 2010) evaluated the CERES-EGC model against CO₂ fluxes over several European flux sites, including FR-Aur. The model reproduced the net CO₂ fluxes over the growing period of CY-07 with an error of 30 gC.m⁻², while SAFYE-CO₂^{IS} (using *in situ* measurements for soil description) estimated NEP (throughout the whole cropping year) with an error of -12.1 gC.m⁻². Additionally, in 2016, despite the lack of satellite images covering the period of senescence at FR-Aur, the model provided accurate estimates of NEE (mainly because the errors in GPP and R_{ECO} compensate for each other). This accuracy in estimating CO₂ fluxes makes possible the realistic estimation of the NECB at the plot scale with the proposed approach. SAFYE-CO₂^{IS} was able to reproduce NECB with very good accuracy (relative errors of -4.3% and +15% for CY-07 and CY-16, respectively). SAFYE-CO₂^{IS} also performed well at estimating ETR. During the two simulated crop years at FR-Aur, the model reproduced ETR with a low error (RSME = 0.68 mm.d⁻¹), meaning that our approach can also be used to calculate annual water budgets for sunflower plots.

At the landscape scale, coupling with a soil water module tended to lower biomass and yield estimates. The poor estimates of TWC derived from soil products (GSM and SG) led to an underestimation of the final biomass and, thus, yield. In contrast, the biomass was accurately estimated by the SAFYE-CO₂ model ($R^2 = 0.91$ and RMSE = 73 g.m⁻²), and the estimations were within the range of those of models specific to sunflower: Using the OILCROP-SUN model, (Villalobos et al., 1996) estimated DAM with an error of 170 g.m⁻², while using the SUNFLO model, (Casadebaig et al., 2011a) simulated DAM with an error of 114 g.m⁻². In contrast, the yield was poorly estimated by SAFYE-CO₂ in terms of its correlation ($R^2 = 0.31$) but the error was still within the range or better than those other studies. The error achieved by SAFYE-CO₂ in estimating YLD was 51 g.m⁻², while errors with OILCROP-SUN and SUNFLO were 80 and 50 g.m⁻², respectively (in (Villalobos et al., 1996) and (Casadebaig et al., 2011a)). The poor results achieved for yield with SAFYE-CO₂ can be explained in part by differences in the HI between sunflower plots. Indeed, sunflower HI is known to change with genotype, management and environment ((Bange et al., 1998; Gholinezhad et al., 2009)) and depends on many factors that are not yet accounted for in the proposed approach. Accounting for varietal potentials (Debaeke et al., 2010) and for abiotic stress after flowering as in CropSyst (Stöckle et al., 2003b) is an avenue for improvement with our approach.

4.6.2. Prerequisite to compute water fluxes over wide area

Estimating water fluxes and thus water stress over croplands requires an accurate description of soil properties (θ_{FC} , θ_{WP} and soil depth). This need has been highlighted in the present study. Soil parameters were derived from *in situ* measurements when available or from soil texture products for upscaling. The two existing soil products tested in this study (GSM and SG) did not meet the needs for the expected accuracy. Indeed, we demonstrated (see section II-4.5.2) that the use of soil products led to an underestimation of the soil TWC, which in turn led to an overestimation of the water stress and an underestimation of the biomass and yield compared to the *in situ* data. However, this conclusion concerns only our study area, which is not representative of the spatial scale of GSM and SG products. Indeed, those products provide, among other things, soil texture and depth at a fine resolution (SG: 250 m; GSM: 90 m) all across the globe. As such, it would be difficult to expect those products to accurately describe differences in soil properties between plots over a small area of study. Additionally, taking water fluxes into account in our approach does not improve the estimation of biomass or CO₂ fluxes, even under water stressed conditions (see section II-4.5.2.2). Both sunflower crop years at FR-Aur experienced water stress (especially at the end of the season), and SAFY-CO₂ was still able to accurately reproduce the crop dynamics and production as well as the CO₂ flux, indicating that the plant stresses (*i.e.* water and nitrogen) were already correctly taken into account through the remotely sensed GAI. Vegetation stress slows down (or even stops) growth, which is observable through GAI. Therefore, we believe that coupling SAFY-CO₂ with a soil water module is useful for estimating ETR and water budgets or for assessing crop water-use efficiency (Tallec et al., 2013a) when safeguarding soil and water resources, but this coupling does not seem to improve the simulations of the annual C budget components. During the two sunflower crop years at FR-Aur, simulations were performed using SAFYE-CO₂, with no feedback of the SWC on GPP computation ($WtS_v = 1$, eq. II-20). The accuracy in estimating biomass and CO₂ flux was similar to that of SAFY-CO₂; thus, the accuracy was slightly better than that of simulations considering the water stress function. Concerning the estimation of water fluxes, the same accuracy was obtained with or without the consideration of effects of water stress on vegetation development. We thus argue that SAFYE-CO₂ should be used in a decoupled way between vegetation growth and SWC since information about water stress is already provided by the remotely sensed GAI. However, further analysis that includes additional water flux data and the simulation of other crop species should reveal whether the water module should be used systematically in a decoupled way, allowing us to estimate water fluxes in the absence of vegetation stress.

4.6.3. Limitations and potential improvements

In addition to simulating crop dynamics and production, our approach fills the gap in assessing the C and water budget simultaneously at the plot scale over large areas. Notably, to achieve this, information on both organic fertilization and eventually irrigation at the plot scale are needed. This information is not yet available at a landscape spatial scale, which can lead, for example, to great uncertainties in the C budget calculations in areas with livestock farming. However, this drawback could be compensated by the combination of our approach with the use of data in farm management information systems (FMIS). Additionally, the representation of R_H is quite simplistic in our approach and would require improvement. As shown in the present study and as discussed by (Pique et al., 2020a), this simple method allows for the accurate assessment of the annual C budget, but when considering relatively long time scales (*e.g.* crop rotation), the effects of other variables such as soil organic matter content or processes such as priming effects will have to be taken into account. For those reasons, the SAFYE-CO₂ model should be coupled with a soil organic matter model (*e.g.* AMG, (Saffih-Hdadi and Mary, 2008); RothC, (Coleman and Jenkinson, 1996a) in the future.

Another limitation of this approach concerns the availability of remote sensing images. To date, we used only optical data in this approach, which is thus limited in the case of cloudy sky conditions. Our method could even be inoperable if long periods of cloudy sky conditions occur during crop development. This constraint is partially mitigated because of the ongoing Sentinel missions that will provide high spatial (10 m) and temporal (5 days) resolution images all across the globe. Additionally, the assimilation of the C-band synthetic-aperture radar (SAR) from Sentinel-1 should be considered to lift this constraint, as shown in many studies (Ameline et al., 2018; Baup et al., 2019; R. Fieuzal et al., 2017a; Revill et al., 2013a). Finally, thermal-infrared remote sensing, which allows the estimation of vegetation water stress (Labbé et al., 2012a), could be considered to better constrain the model.

4.7. Conclusion

The newly established SAFYE-CO₂ model has been validated at local and landscape scales for sunflower crops against a wide range of *in situ* measurements. The model was able to accurately reproduce biomass, yield, CO₂ flux and ETR at the FR-Aur flux site when using *in situ* measurements of texture to deduce soil parameters (field capacity and permanent wilting point) and soil depth. For upscaling the model to the landscape scale, the sensitivity of the model to those soil parameters estimated from existing state-of-the-art soil databases (GlobalSoilMap and SoilGrids) was tested. Biomass, over a population of fields, was correctly estimated by SAFY-CO₂ but underestimated by SAFYE-CO₂. This is possibly due to the underestimation of the total soil water capacity derived from the soil products, which leads to overestimations of water stress. Moreover, the low heterogeneity and spatial variability of the derived soil parameters over the study area, compared to observed values, indicates that the current accuracy of soil products (GSM and SG) is not sufficient to provide an accurate description of TWC, especially for approaches developed at the field scale. Since SAFYE-CO₂ requires information about soil water capacity that is not yet available at the plot scale over wide areas with sufficient accuracy, in the case where only a C budget is needed, we suggest using SAFY-CO₂ for large-scale simulation, as the assimilation of frequent HSTR GAI data enables the indirect incorporation of the integrated impact of water stress. For the same reason, we argue that crop growth in SAFYE-CO₂ can be decoupled from soil water dynamics by omitting the water stress function to obtain water flux estimates as well as accurate CO₂ flux estimates. However, this approach needs further validation using other flux sites to ensure the robustness of the model for simulating various soil and climatic conditions and management practices.

♠ Ma contribution

J'ai réalisé cette étude de bout en bout. L'origine de ces travaux a été la conférence M2GARSS 2020 à Tunis (à distance car en Mars 2020 !) qui m'a permis de présenter mes avancées sur la culture de tournesol et de publier un article de conférence. Un des objectifs de ce travail était de coupler le modèle SAFY-CO₂ à un module de bilan hydrique permettant de simuler le stress hydrique, état fréquemment rencontré sur le tournesol et ses conséquences sur le fonctionnement et le développement de la végétation. J'ai donc réalisé ce couplage et validé cette approche localement. Ensuite, pour l'appliquer à grande échelle, j'ai récupéré les données de biomasse et de rendements acquises dans le cadre du projet CASDAR Tournesol, ainsi que des données sol issues des produits GSM et SG. J'ai réalisé toutes les simulations nécessaires à l'écriture du papier. J'ai ensuite écrit la totalité du papier et me suis également chargé de la réponse aux relecteurs.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ Le modèle SAFYE-CO₂ a été mis en place en couplant SAFY-CO₂ avec un modèle de bilan hydrique inspiré de la FAO-56, qui permet de simuler les flux d'eau verticaux (évapotranspiration, percolation) d'une parcelle agricole.
- ♣ La paramétrisation du modèle pour la culture de tournesol a été validée à une échelle locale puis régionale.
- ♣ Les produits cartographiques de sol actuels (GSM et SoilGrids) ne permettent pas une estimation précise du contenu en eau du sol. Ils ne peuvent donc pas être utilisés en entrée du modèle pour une application à la parcelle sur de larges territoires.
- ♣ Le rendement est actuellement déterminé avec un indice de récolte fixe qui offre des performances moyennes. Une modification du formalisme devrait permettre d'améliorer l'estimation des rendements.
- ♣ La simulation de la croissance de la plante devrait être découplée du contenu en eau du sol car le stress hydrique est déjà pris en compte indirectement via le GAI satellite.

5. Conclusion de l'article en français

Le modèle SAFYE-CO₂ nouvellement développé a été validé à l'échelle locale et à celle de la région pour la culture de tournesol, grâce à un large jeu de données terrain. Le modèle a été capable de reproduire avec précision la biomasse, le rendement, les flux de CO₂, ainsi que l'évapotranspiration sur le site expérimental d'Auradé en utilisant des mesures in situ de texture pour déduire les paramètres de sol (point de flétrissement et capacité au champ) et la profondeur de sol. Afin de spatialiser le modèle à l'échelle du paysage, la sensibilité du modèle à ces paramètres de sol, dérivés des produits sol existants (GlobalSoilMap et SoilGrids) a été testée. En considérant toutes les parcelles simulées, la biomasse a été correctement estimée par SAFY-CO₂ mais sous-estimée par SAFYE-CO₂. Ceci provient probablement de la sous-estimation des valeurs de réserves utiles dérivées des produits sols, qui entraîne une surestimation du stress hydrique. De plus, la faible hétérogénéité et variabilité spatiale des paramètres de sol dérivés des produits GSM et SG sur la zone d'étude, comparées aux observations, indiquent que la précision actuelle de ces produits sol n'est pas suffisante pour fournir une estimation précise du contenu en eau du sol, spécialement pour des approches spatialisées développées à l'échelle de la parcelle. SAFYE-CO₂ requiert une description précise de la réserve utile des sols, or cette information n'est pas encore disponible à l'échelle de la parcelle sur de grands territoires. Dans les cas où seul le bilan de carbone est estimé, nous suggérons donc d'utiliser SAFY-CO₂ pour les applications à grande échelle puisque l'assimilation de produits satellites permet de prendre indirectement en compte le stress hydrique. Pour les mêmes raisons, nous affirmons que la fonction simulant la photosynthèse de la culture dans SAFYE-CO₂ ne doit pas prendre en compte l'effet stress lié au contenu en eau du sol. Ainsi, nous avons désactivé la fonction de stress hydrique initialement introduite dans l'estimation de la photosynthèse, ce qui permet d'obtenir des estimations précises de flux de CO₂ et d'évapotranspiration. Toutefois, cette approche nécessite des validations plus approfondies à l'aide d'autres données de sites flux pour s'assurer de la robustesse du modèle et de sa capacité à reproduire des conditions pédoclimatiques et des pratiques agricoles contrastées.

6. Analyse supplémentaire : cas du blé

Le blé a été choisi comme culture à paramétrer en priorité dans SAFYE-CO₂ pour les mêmes raisons que celles évoquées concernant SAFY-CO₂ ; c'est la culture majoritairement cultivée dans la zone d'étude et plus largement sur tout le territoire français. De plus, de précédentes études s'étaient déjà intéressées à la simulation de l'évapotranspiration spatialisée pour cette culture (Battude et al., 2017a; Duchemin et al., 2015a). Une première validation des flux d'ETR simulés par le modèle, avec l'ancien et le nouveau formalisme d'évaporation, est présentée. Puis une comparaison des performances globales entre SAFY-CO₂ et SAFYE-CO₂ est présentée, et permet de trancher sur l'utilisation de ces modèles.

6.1. Validation des simulations de flux d'eau

Le Tableau II-6 présente les paramètres propres au module de bilan hydrique pour la culture de blé. Ces paramètres, comme ceux des autres cultures sont soit extraits de la littérature, soit issus de mesures. Les autres paramètres (phénologiques ou liés aux flux de CO₂) ainsi que les bornes des paramètres à optimiser restent les mêmes que ceux définis pour SAFY-CO₂.

Tableau II-6 : Paramètres pour la culture de blé associés au module de bilan hydrique et sources des données.

Description	Notation	Unité	Valeur	Méthode	Source
Profondeur couche évaporative	D _{EVAP}	m	0.1	Littérature	FAO-56 (Allen 1998)
Profondeur racinaire maximum	D _{ROOT}	m	1	Calibration	Rasmussen (2015, 2016)
Profondeur de sol	D	m	-	Calibration	In-situ ou cartes de sol
Humidité à la capacité au champ	θ _{FC}	-	-	Calibration	In-situ ou cartes de sol
Humidité au point de flétrissement	θ _{WP}	°C	-	Calibration	In-situ ou cartes de sol
Vitesse de croissance racinaire	V _R	°C.day ⁻¹	0.0072	Calibration	Veloso (2014)
Coefficient d'évaporation A	Ev _A	1/(mm.d ⁻¹)	0.09	Mesures	ICOS - FR-Aur & FR-Lam
Coefficient d'évaporation B	Ev _B	-	1.09	Mesures	ICOS - FR-Aur & FR-Lam
Correctif évaporation	K _{BS}	-	1.2	Mesures	ICOS - FR-Aur & FR-Lam
Coefficient de transpiration maximum	K _{cbMAX}	-	0.98	Calibration	Veloso (2014)
Paramètre d'humidité critique	D _{fe}	-	0.45	Littérature	FAO-56 (Allen 1998)
Fraction de couverture végétale maximum	K _{COV}	-	0.91	Mesures	Veloso (2014)
Coefficient exponentiel de la fraction de couverture	E _{COV}	-	0.31	Mesures	Veloso (2014)
Coefficient de réduction de transpiration	K _{TRP}	-	0.36	Calibration	Veloso (2014)

Une fois ces paramètres fixés, le modèle a été optimisé sur les 8 années de blé disponibles à Lamasquère et à Auradé, avec l'ancien formalisme simulant l'évaporation (celui défini par la méthode FAO-56) puis avec le nouveau formalisme décrit section II-2.3. Pour cet exercice, les épisodes de repousses (cultures intermédiaires, repousses, adventices) ont été filtrés car les flux de transpiration sur ces périodes ne sont pas simulés ; aucune paramétrisation de ces épisodes de repousses n'étant actuellement défini dans le module de bilan hydrique. L'ETR observée et simulée par ces deux méthodes est présentée Figure II-16. Le nouveau formalisme fournit des performances très légèrement supérieures à celles obtenues avec le formalisme FAO-56. En effet, l'erreur sur l'ensemble des points passe de 0.67 à 0.65 mm.j⁻¹ et le coefficient de détermination de 0.67 à 0.68. Même si cette amélioration n'est pas significative, on note toutefois que le nouveau formalisme permet de légèrement réduire la dispersion. En effet, on peut voir sur la Figure II-16 que les points sont plus centrés autour de la droite y=x. Ainsi, le biais moyen passe de -0.03 à 0.01 mm.

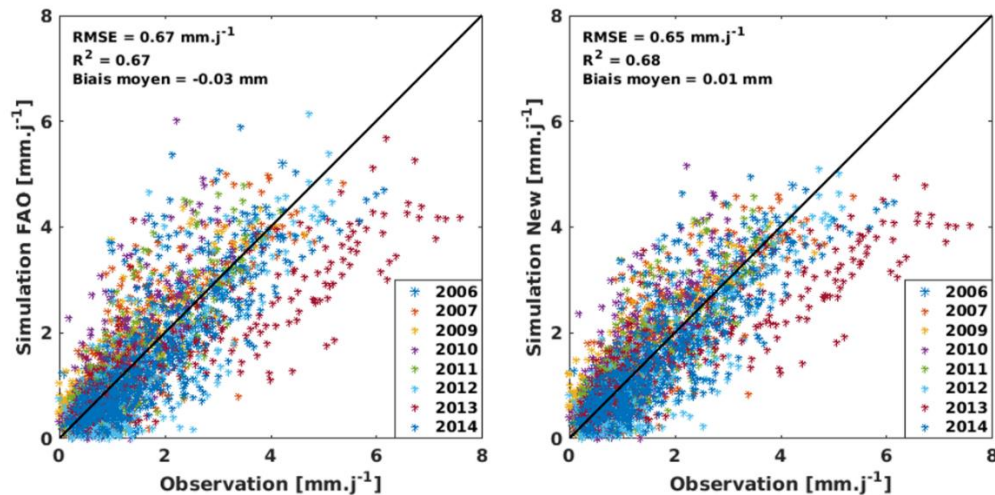


Figure II-16 : Comparaison entre ETR observée sur les sites flux d'Auradé et de Lamasquère et ETR simulée avec la méthode FAO (gauche) et avec la nouvelle équation de l'évaporation (droite) pour 8 années culturales de blé.

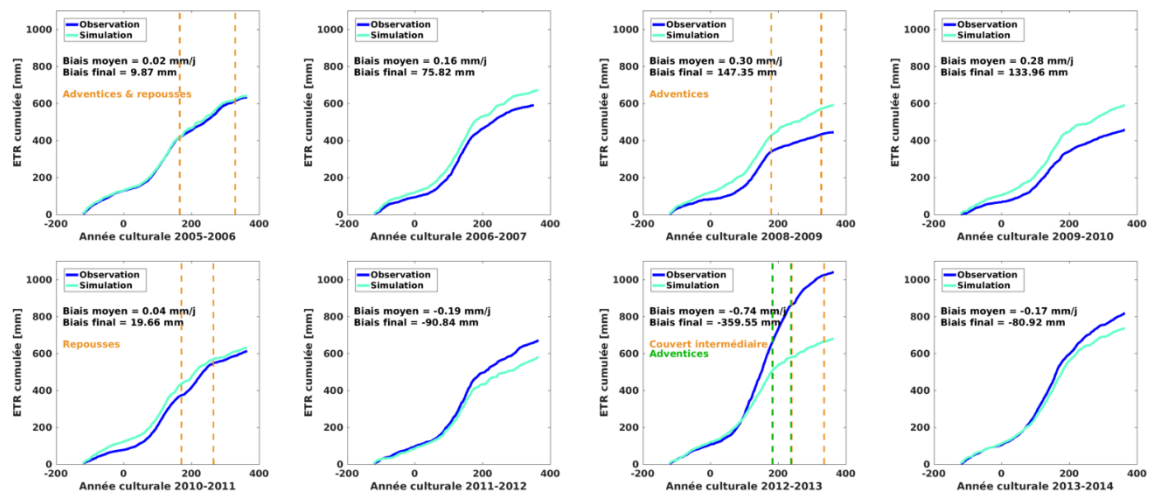


Figure II-17 : ETR cumulée estimée par SAFYE-CO2 avec la nouvelle formulation de l'évaporation (bleu clair) et observée (bleu foncé) pour 8 années culturales de blé à Auradé et Lamasquère.

Le nouveau formalisme définit pour l'évaporation, bien qu'il n'améliore pas significativement les sorties du modèle, est conservé pour la suite de l'analyse. L'ETR cumulée a été estimée pour chaque année de culture de blé à Auradé et à Lamasquère, séparément. La Figure II-17 présente l'ETR cumulée face aux observations. Le modèle reproduit correctement l'ETR, mais un décrochage est souvent observé après la récolte. En fin de saison culturale, l'erreur sur l'ETR cumulée est comprise entre 9.9 mm (pour l'année culturale 2005-2006) et -359.6 mm (pour 2012-2013). L'année 2012-2013 est particulièrement mal représentée pour deux raisons. Premièrement, des adventices se sont développées au sein de la parcelle au moment de la sénescence du blé. Elles ont contribué à l'ETR (via la transpiration) tandis que le modèle ne simulait qu'un blé en fin de saison, donc moins transpirant. Cet événement explique une partie de la sous-estimation des valeurs d'ETR simulées, par rapport aux observations. Ensuite, une culture intermédiaire a été introduite sur la parcelle, contribuant là aussi à augmenter grandement les flux d'eau via la transpiration, terme non simulé par le modèle sur cette période dans cet exercice. Concernant le décrochage post-récolte observé, on constate que même pour les années qui ne sont pas concernées par des événements de repousses, l'ETR simulée diverge de l'ETR

observée après la récolte du blé (~ jour n°200, soit le 19 Juillet). Sur le site d'Auradé, les pailles sont laissées au sol après la récolte. On peut donc supposer que l'état de surface va impacter les flux d'évaporation. Effectivement, des comportements particuliers de l' ETR_{MES} ont été observés lors des périodes de sol couvert avec des pailles, mais aucune tendance permettant de définir une équation spécifique à cet état de surface n'a été mise en évidence. Par ailleurs, même si des travaux sur la détection des résidus de culture par télédétection existent (Daughtry et al., 2006; Serbin et al., 2009; Zheng et al., 2012), aucune méthode opérationnelle ne permet aujourd'hui de les détecter. Le futur service Copernicus « *Cropland* » pourrait fournir cette information à l'avenir car il fournira une date de récolte et de travail du sol. Une fois cette information disponible à la parcelle sur de larges territoires, il faudra encore définir un formalisme spécifique à ces périodes avec résidus, avant de pouvoir améliorer les estimations d'évaporation.

6.2. Comparaison entre SAFY-CO₂ et SAFYE-CO₂

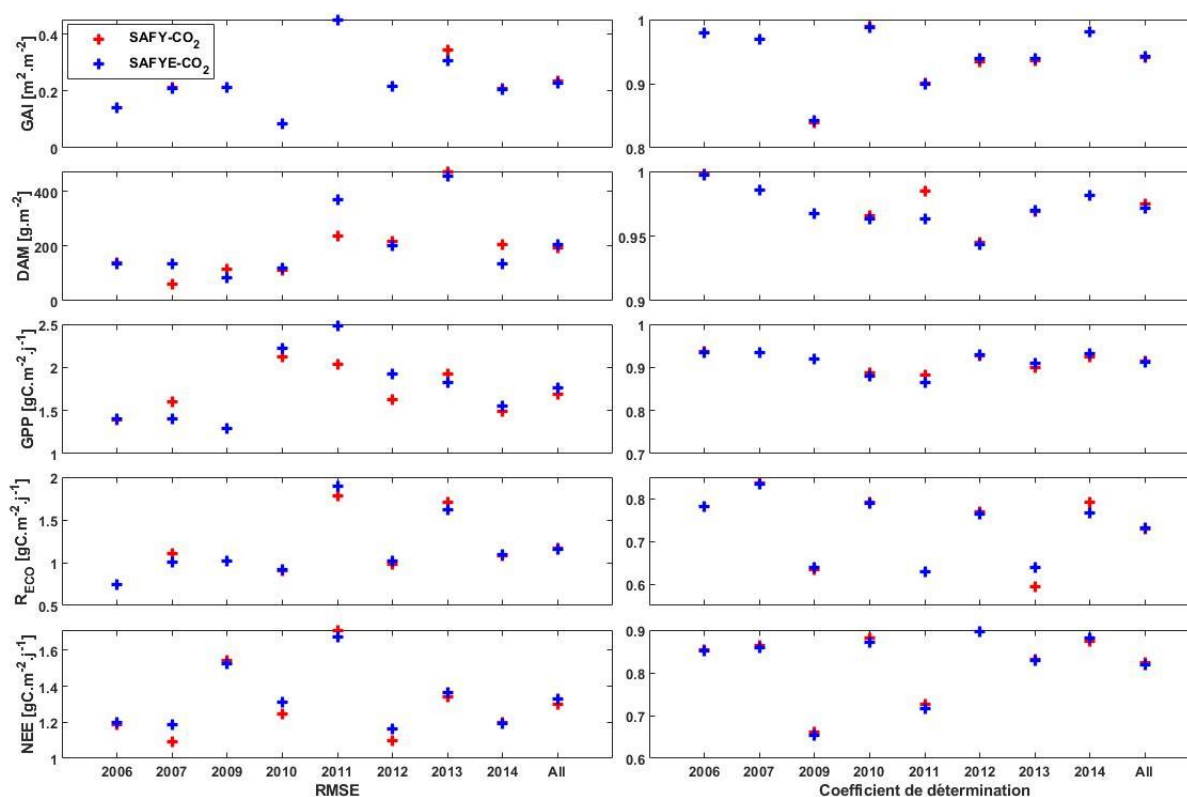


Figure II- 18 : RMSE (colonne de gauche) et R² (colonne de droite) obtenus sur le GAI, la biomasse (DAM), la photosynthèse (GPP), la respiration de l'écosystème (R_{ECO}) et l'échange net de CO₂ avec l'atmosphère (NEE) avec SAFY-CO₂ (rouge) et SAFYE-CO₂ (bleu).

Afin de comparer les performances des deux versions du modèle (avec ou sans module de bilan hydrique), l'erreur (RMSE) et la corrélation (R²) ont été calculées pour toutes les années culturales de blé, et pour les différents indicateurs estimés (Figure II-18). Dans l'ensemble les performances sont assez similaires, bien que SAFY-CO₂ semble en moyenne proposer des performances légèrement supérieures à SAFYE-CO₂ (dans la version où la fonction de stress hydrique est activée), notamment en termes d'erreur (voir cas 'All' sur Fig. II-18). Il est donc difficile de déterminer le modèle le plus performant dans l'estimation de telle ou telle variable. En revanche, SAFYE-CO₂ tend à détériorer les estimations lors des années culturales marquées par du stress hydrique (2005-2006, 2010-2011, 2011-2012, 2013-2014). Les années culturales de blé peuvent être concernées par un manque d'eau en fin de

saison, pourtant ces périodes sont déjà très bien simulées par SAFY-CO₂. La prise en compte du stress hydrique dans l'équation de calcul de la photosynthèse tend donc à détériorer, plus qu'à améliorer, les sorties du modèle sur ces périodes, notamment pour la GPP, qui est impactée au premier ordre par le manque d'eau (via la fonction de stress WtSv, cf Eq. II-20).

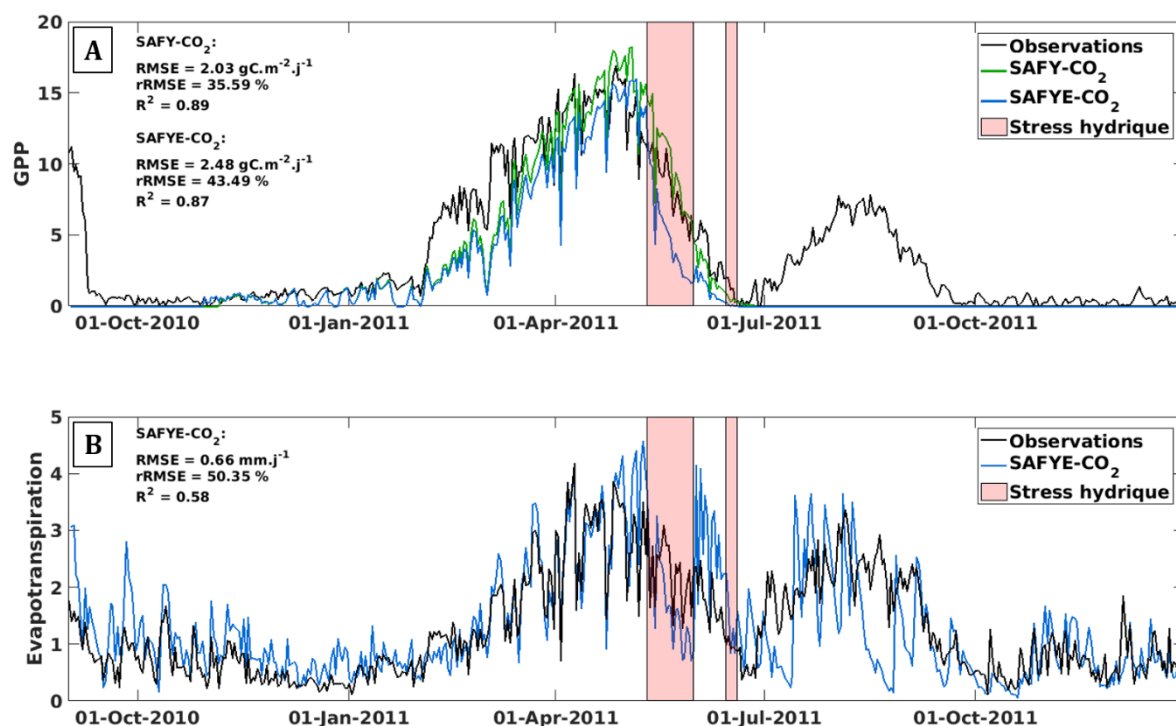


Figure II-19 : Haut : GPP estimée par SAFY-CO₂ (vert), par SAFYE-CO₂ (bleu) et observée (noir) à Lamasquère durant l'année culturale 2010-2011. Bas : ETR estimée par SAFYE-CO₂ (bleu) et observée (noir) sur le même site et la même année culturale. Les zones en rouge délimitent les périodes de stress simulées par le modèle.

Pour illustrer ce constat, la GPP de l'année culturale 2010-2011 simulée par les deux versions du modèle a été comparée aux mesures réalisées à Lamasquère (Figure II-19 A). Aussi, l'évapotranspiration observée et simulée par SAFYE-CO₂ sont comparées (Figure II-19 B). Les périodes délimitées en rouge correspondent aux périodes de stress hydrique simulées par le modèle. Ces périodes sont cohérentes avec les humidités du sol mesurées sur le site. En effet, l'humidité relative observée est inférieure au paramètre d'humidité critique (D_{fe}) en dessous duquel la plante est en stress hydrique, et voit donc ses capacités photosynthétiques limitées. Or la période de sénescence (du maximum de GPP à la récolte), marquée par ces 2 périodes de stress hydrique est déjà très bien simulée par SAFY-CO₂ (RMSE = 1.87 gC.m⁻².j⁻¹, R² = 0.95, biais moyen = 0.47 gC.m⁻².j⁻¹) notamment vers la fin de la période de sénescence. Une fois que le stress hydrique du sol est pris en compte dans le modèle, la GPP est sous-estimée, et les performances de SAFYE-CO₂ diminuent significativement (RMSE = 2.72 gC.m⁻².j⁻¹, R² = 0.82, biais moyen = -1.72 gC.m⁻².j⁻¹) par rapport à SAFY-CO₂. Ce constat laisse penser que l'effet du stress hydrique est déjà indirectement pris en compte via le GAI satellite. En effet, lorsque la végétation est stressée, elle va limiter sa croissance, voire perdre de ses capacités photosynthétiques, ce qui peut entraîner un jaunissement précoce de ses feuilles. Ces effets se répercutent directement sur le GAI et sont donc détectables par satellite. Parallèlement, l'ETR est correctement estimée sur les deux périodes de stress hydrique (Figure II-19 B) ce qui signifie que le modèle, s'il est renseigné avec des données sol précises (comme c'est le cas ici), simule correctement le manque d'eau dans le sol qui est répercuté sur

les flux d'évaporation et de transpiration ainsi que sur les flux de CO_2 . L'effet du stress hydrique semble donc déjà être pris en compte dans SAFY- CO_2 via l'information satellite et sans avoir recours à une fonction de stress. Nous pensons donc que SAFYE- CO_2 devrait être utilisé en découplant le contenu en eau du sol et les capacités photosynthétiques de la plante permettant ainsi une estimation des flux d'eau tout en estimant correctement la GPP.

Bien que le modèle simule le contenu en eau du sol, aucune comparaison de ces sorties du modèle avec des observations n'est présentée ici. Cette comparaison est rendue difficile par des questions de représentativité et de qualité de la mesure. En effet, les mesures d'humidité du sol, faites à différentes profondeurs (5, 10, 30 et 60 cm à Auradé et à 5, 10, 30 et 100 cm à Lamasquère), sont ponctuelles et toutes localisées autour du mât de mesure (situé au centre de la parcelle). Les humidités du sol estimées par le modèle sont, elles, représentatives de toute la parcelle et intégrées sur des horizons de sol ([0-10], [10-100] et [100-profondeur sol] cm pour la culture de blé). Il apparaît donc délicat de comparer ces deux valeurs d'humidité. Par ailleurs, la mesure d'humidité de sol est entachée de fortes incertitudes. Pour chaque profondeur (excepté la plus profonde), 3 capteurs mesurent l'humidité et permettent ainsi une estimation de l'écart type lié à la mesure qui peut s'avérer trop important pour utiliser ces données comme données de validation. Par exemple, sur l'année 2011 à Lamasquère, la déviation standard des mesures à 5 cm est comprise entre 58 et 62% de la mesure et entre 0 et 31% pour les mesures à 10 et 30 cm.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ Le modèle SAFYE- CO_2 a été appliqué à la culture de blé afin de simuler les flux d'eau et d'analyser une potentielle amélioration des simulations de biomasses et de flux de CO_2 par rapport à SAFY- CO_2 .
- ♣ La paramétrisation du module de bilan hydrique pour la culture de blé a été validée localement grâce aux données des sites d'Auradé et de Lamasquère.
- ♣ La nouvelle formulation de l'évaporation n'a pas apporté d'amélioration significative de l'évaporation mais est conservée pour le moment.
- ♣ La prise en compte du stress hydrique induit par le contenu en eau du sol n'améliore pas les sorties du modèle mais tend à détériorer les simulations en phases de stress hydrique, ce qui tend à démontrer que ce stress est déjà indirectement pris en compte via l'information satellite.

7. Conclusion

Le développement du modèle SAFYE- CO_2 , couplant le modèle SAFY- CO_2 avec un module de bilan hydrique inspiré de la méthode FAO-56 (Allen et al., 1998), a été motivé par deux raisons principales. La première étant évidemment la possibilité de simuler les flux d'eau en plus des composantes du bilan de C, et donc les besoins en eau des cultures dans un contexte de raréfaction de la ressource. La seconde concernait la perspective d'amélioration des simulations du modèle par la prise en compte du stress hydrique. Afin de l'évaluer, SAFYE- CO_2 a été appliqué à la culture de tournesol

dans un premier temps, car c'est une plante qui est régulièrement soumise à des conditions de stress hydrique. Puis le modèle a été appliqué au blé, culture qui, bien que moins concernée par les périodes de stress hydrique, peut être impactée en fin de saison par des déficits de précipitations.

Concernant la culture de tournesol, la paramétrisation du modèle a été validée localement sur le site d'Auradé grâce à deux années de mesures de flux (saisons culturales 2007 et 2016). Le modèle a été capable de reproduire avec précision la biomasse, le rendement ainsi que les flux de CO₂ et d'eau. Néanmoins, une validation plus approfondie sera nécessaire pour confirmer ces premiers résultats. En effet, pour l'instant cette validation ne s'appuie que sur deux années de mesures de flux, caractérisées toutes deux par de faibles développements de végétation et sur un même site (conditions pédoclimatiques et de gestion similaires). Cette validation est donc loin d'être représentative des conditions variées de développement du tournesol à une échelle plus large (régionale, nationale) et nécessiterait donc de s'appuyer sur d'autres années de mesure de flux collectées sur d'autres sites, notamment ceux du réseau ICOS.

Dans une perspective d'application du modèle à grande échelle, et parce que le modèle requiert des informations concernant les propriétés de sol, les produits sol GSM et SoilGrids ont été testés pour définir les paramètres sol en entrées du modèle. Il a été montré que la résolution spatiale et l'incertitude liée à ces produits ne permettaient pas de les utiliser dans l'approche proposée à une échelle parcellaire. En effet, la résolution actuelle de ces produits est de 250 et 90 m pour GSM et SG respectivement, ce qui ne permet pas de traduire la véritable hétérogénéité des sols à l'échelle spatiale qui nous concerne. Par ailleurs, nous avons montré que pour ces produits, la variabilité des sols en termes de texture n'était pas assez réaliste (Figure II-14), du moins pour notre zone d'étude, ce qui est un frein à leur utilisation. Nous en avons donc conclu que ces produits n'étaient pas adaptés à l'estimation des capacités de rétention d'eau du sol à une échelle parcellaire, et que par conséquent leur utilisation était suspendue pour le moment. Des produits d'humidité du sol dérivés de mesures satellites pourraient venir pallier à ce problème. En effet, de nombreux produits d'humidité du sol existent (Albergel, 2012; Ali et al., 2015; de Rosnay et al., 2006; Merlin et al., 2005) et pourraient être directement assimilés dans le modèle pour améliorer les estimations de flux d'évapotranspiration du modèle lorsque ce dernier est appliqué à des zones dont on ne possède aucune donnée de sol précise.

SAFYE-CO₂ a ensuite été appliqué à la culture de blé. Après avoir fixé les paramètres propres au module de bilan hydrique (Table II-6) pour la culture du blé, une première étape a servi à comparer les deux formalismes de l'évaporation (FAO-56 et nouveau formalisme). Il a été montré que les deux formalismes offraient des performances similaires dans l'estimation de l'ETR. Rappelons ici que le nouveau formalisme a été mis en place car celui proposé par la FAO ne convenait pas à un sol nu puisque l'ET₀ (sur lequel est basé ce formalisme) a été définie en référence à une surface couverte de gazon. Il a notamment été observé que l'évaporation en période de sol nu pouvait être supérieure à l'ET₀, et que l'évaporation était dépendante à l'ET₀. Or ces deux phénomènes ne sont pas pris en compte dans la méthode FAO-56. Même si les performances entre les deux formalismes sont similaires, nous pensons que des efforts devraient être apportés au développement de la nouvelle version, car elle permet la prise en compte de facteurs importants et pourrait permettre une meilleure précision dans l'estimation spatialisée de l'évaporation et donc de l'ETR.

Ensuite, en conservant la nouvelle équation de calcul de l'évaporation, la paramétrisation du module de bilan hydrique pour le blé a été validée grâce aux mesures d'évapotranspiration réalisées sur les sites d'Auradé et de Lamasquère. Le modèle a correctement reproduit les flux d'eau sur les années culturales de blé, en dehors des périodes concernées par des événements de repousses. Une

paramétrisation devra donc être établie pour ces événements de repousses, lorsque le modèle sera appliqué à des échelles de temps plus longues (rotations de cultures).

Nous avons également montré que le modèle SAFYE-CO₂ pouvait être utilisé sans rétroaction du contenu en eau du sol sur le calcul de la photosynthèse de la culture. En effet, nous considérons que le stress lié au manque d'eau est déjà pris en compte dans le GAI satellite. Cette hypothèse a été soulevée suite au constat que les périodes de stress hydrique étaient déjà bien estimées par SAFY-CO₂, sans considérer de stress lié au contenu en eau du sol. Or si une fonction de stress hydrique est ajoutée, la croissance de la plante sera doublement 'ralentie', via un coefficient de stress appliqué à la GPP et via la prise en compte implicite du cycle phénologique et de l'intensité de développement de la culture via le GAI satellite. Désactiver la fonction de stress hydrique a permis de simuler avec plus de précision le développement des cultures, tout en estimant correctement l'ETR du système et donc les potentiels besoins en irrigation. Bien sûr, la prise en compte de l'influence du contenu en eau du sol sur le calcul de l'évaporation et de la transpiration est conservée, tout comme l'influence du développement de la végétation sur le calcul de l'ETR.

La culture de maïs n'a pas pu être étudiée avec SAFYE-CO₂ pour les raisons déjà évoquées concernant les mesures de flux de CO₂ et d'eau. Ce travail devra néanmoins être mené grâce à des données de flux d'eau fiables, afin de pouvoir simuler des rotations de cultures. Cette future étude pourra notamment s'appuyer sur les travaux de Claverie et al., (2012) et de Battude et al., (2017).

Outre la culture de maïs, celle de colza devra également être paramétrée à court terme dans SAFYE-CO₂ afin de pouvoir simuler la majorité des rotations actuellement en place dans le sud-ouest et dans le reste de la France. Un stage de Master 2 vient de démarrer (mars 2021) au CESBIO dans cette perspective.

Chapitre III

Chapitre III : Estimation de l'effet albédo des cultures intermédiaires

1. Le pouvoir réfléchissant des cultures intermédiaires

Comme énoncé dans l'introduction de ce manuscrit, l'introduction de cultures intermédiaires (CI) ou leur extension dans les rotations culturales peut être utilisée comme levier d'atténuation du réchauffement climatique. Cette pratique agricole permet en effet de soustraire du CO₂ à l'atmosphère (Pellerin et al., 2019; Poeplau and Don, 2015a) sans accroître les autres émissions de GES (Kaye and Quemada, 2017a), ainsi que de diminuer l'énergie solaire absorbée par la surface via l'augmentation de l'albédo de surface (Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a). C'est ce dernier effet des CI qui sera étudié dans ce chapitre.

Sachant que la végétation a généralement un albédo plus élevé que le sol nu (Carrer et al., 2014), l'implantation d'un couvert végétal lors de périodes de sol nu permet généralement d'augmenter la part de rayonnement réfléchi par la surface, et ainsi diminuer sa température (à rapport de Bowen constant). Depuis plusieurs années, un intérêt croissant est porté à l'utilisation des surfaces agricoles comme levier d'atténuation du changement climatique, notamment grâce à la gestion de l'albédo des parcelles agricoles (Bright et al., 2015; Genesio et al., 2020; Hirsch et al., 2017; Ridgwell et al., 2009). Ces études ont analysé le forçage radiatif (RF) qui pourrait être induit par l'accroissement de l'albédo des surfaces agricoles causé, soit par une sélection de variétés de cultures ou de CI à fort albédo (Ridgwell et al., 2009; Sakowska et al., 2018; Genesio et al., 2020; Lugato et al., 2020) soit par un changement de pratiques (Davin et al., 2014; Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a). Notons toutefois que certains changements de pratiques peuvent aussi induire des diminutions d'albédo (*e.g.* une application de biochar ; Meyer et al., 2012). Les travaux sur l'albédo des cultures ont commencé en 2012 au CESBIO dans le cadre de la thèse de Morgan Ferlicoq (2016). Ils avaient permis, via une approche expérimentale menée en 2013 à Lamasquère, de démontrer que les CI permettaient d'augmenter significativement l'albédo des surfaces agricoles. Si ces travaux n'avaient pas permis de quantifier l'effet climatique net des CI, ce qui aurait nécessité des travaux de modélisation couplée surface-atmosphère, ils ont toutefois démontré que le RF induit par l'augmentation d'albédo de surface suivant l'introduction des CI n'était pas compensé par une augmentation des flux de chaleur sensible (H) au détriment des flux de chaleur latente (LE) comme cela peut être le cas avec un maintien des résidus de culture en surface (versus labour ; voir Davin et al., 2014). Au contraire, LE était accru par rapport à H, renforçant l'effet refroidissant de surface des CI. De plus, Ferlicoq (2016) et Ceschia et al., (2017) ont montré à partir de ces mêmes données que le rayonnement grandes longueurs d'ondes (rayonnement IR), la température de surface et celle des premiers centimètres de sols étaient diminués par les CI (ce qui peut contribuer à diminuer les émissions de CO₂ et de N₂O du sol). Tous ces processus biogéochimiques et biogéophysiques induits par les CI tendraient à entrer en synergie pour accroître l'effet refroidissant des CI. Aussi Kaye and Quemada, (2017) ont proposé une analyse du potentiel d'atténuation des CI, en prenant en compte des effets biogéochimiques (stockage de C, flux de N₂O, etc.) et biogéophysiques (effet albédo uniquement). Cette étude estimant l'impact climatique des CI est

très complète, mais elle a été réalisée à une échelle locale. Ainsi, il existe encore très peu d'études portant sur l'estimation du forçage radiatif induit par l'introduction de cultures intermédiaires à grande échelle, malgré l'intérêt croissant de la communauté scientifique pour la capacité des CI à contribuer à l'atténuation des CC. La principale raison est qu'aucun schéma de surface couplé aux modèles de climat ne permet, à l'heure actuelle, de simuler cette pratique. Pour compenser partiellement ce manque d'analyse à grande échelle, un modèle d'introduction de cultures intermédiaires permettant d'évaluer leur effet albédo à l'échelle Européenne, nommé RFCC (pour '*Radiative Forcing of Cover Crop*') a été mis en place.

2. RFCC, un modèle de simulation des effets albédo induits par l'introduction de cultures intermédiaires dans les rotations de cultures

Les données qui ont été utilisées dans ce chapitre sont présentées dans l'introduction générale (section 4). Par ailleurs, comme le premier article d'application de ce modèle (présenté en section III-4) ne présente pas en détail le modèle RFCC, la section suivante décrit la chaîne de traitement de façon plus détaillée.

2.1. Chaîne de traitement

La Figure III-1 présente les étapes de traitement des données dans le modèle RFCC développé par Elias Azzi (stage de 3^{ème} année de l'Ecole Polytechnique) sous la direction d'Eric Ceschia. Cette approche a continué d'être développée au cours de ces travaux de thèse pour simuler l'introduction de CI dans les rotations de cultures à l'échelle Européenne, et estimer le forçage radiatif associé. Les encadrés bleus représentent les données utilisées en entrée du modèle (voir section 4). Les encadrés verts désignent les étapes de modélisation qui permettent l'obtention des résultats intermédiaires, symbolisés par les encadrés roses. Enfin, l'encadré jaune correspond aux résultats finaux obtenus en sortie du modèle. Les flèches indiquent le sens de fonctionnement de la chaîne de traitement. Tous les traitements ne seront pas détaillés ici, seules les opérations permettant de définir les scénarii d'introduction seront présentés dans les sections suivantes.

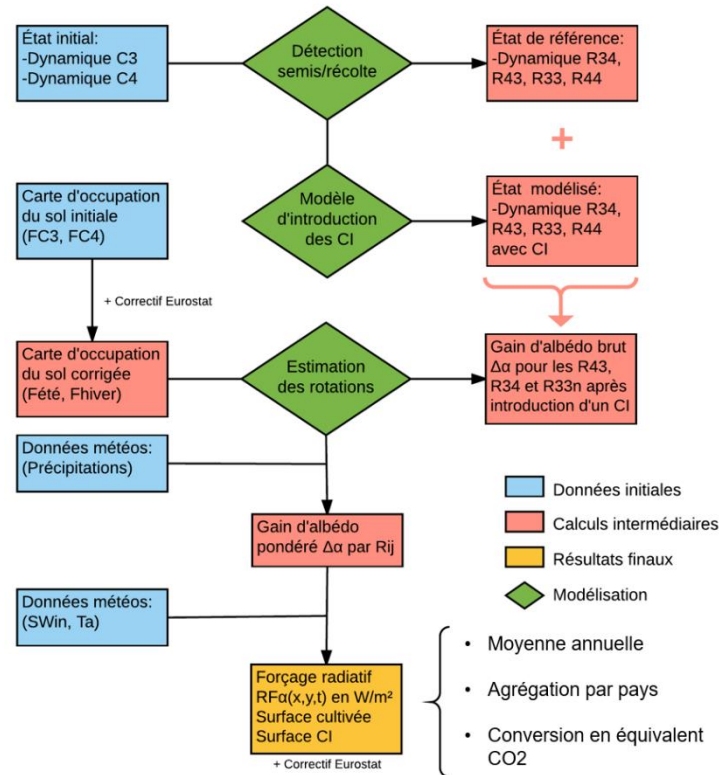


Figure III-1 : Représentation schématique de la chaîne de traitement du modèle RFCC permettant de simuler les gains d'albédo et forçages radiatifs induits par l'introduction de CI dans les rotations de cultures à l'échelle Européenne. Abréviations : C3 & C4 correspondent aux cultures à métabolisme photosynthétique C3 et C4, F = fraction de culture dans le pixel, R = fraction de culture en rotation dans le pixel, $RF\alpha$ = forçage radiatif induit par la modification d'albédo de surface.

2.2. Estimation de l'albédo des rotations de cultures

Les produits albédo issus des travaux de Carrer et al., (2014) ont été utilisées comme données d'entrée du modèle (voir section 4.4). Pour chaque pixel, ces produits fournissent un albédo de sol nu, ainsi qu'un albédo et un indice de végétation pour plusieurs classes d'occupation du sol (jusqu'à 11), et notamment les cultures à métabolismes C3 et C4.

Chaque pixel, de résolutions spatiale de $1/20^\circ$ et temporelle de 8 jours, comporte :

- $\alpha_{\text{SOL_NU}}$: un albédo de sol nu.

Et pour chaque classe d'occupation du sol :

- α_{VEG} : un albédo de végétation.
- **frac_veg** : une fraction d'occupation du sol au sein du pixel.
- **veg** : un indice de végétation compris entre 0 et 1, qui représente le taux de couverture du sol par la végétation au sein de frac_veg.

L'albédo total du pixel à une date donnée peut alors être défini comme :

$$\alpha_{tot} = \sum (\alpha_i \times frac_veg_i \times veg_i) + \alpha_{sol_nu} \times \left[1 - \sum (frac_veg_i \times veg_i)\right] \quad \text{III-1}$$

Dans ces travaux nous nous intéressons à l'albédo des parcelles agricoles (classes C3 et C4) qui est égal à :

$$\alpha_{parcelle_C3} = \alpha_{C3} \times veg_{C3} + \alpha_{sol_nu} \times (1 - veg_{C3}) \quad \text{III-2}$$

$$\alpha_{parcelle_C4} = \alpha_{C4} \times veg_{C4} + \alpha_{sol_nu} \times (1 - veg_{C4}) \quad \text{III-3}$$

À partir de ces données, il a fallu déterminer pour chaque pixel des systèmes d'assolement réalistes sur lesquels introduire les CI.

2.3. Assolement

L'assolement est un partage des terres arables sur une année donnée qui va aboutir à la mise en place d'un ensemble de systèmes de rotations des cultures sur une échelle de temps pluriannuelle. En Europe, les rotations sont construites principalement sur la base de deux grands types de cultures : les cultures d'été et celles d'hiver. Les cultures dites d'hiver sont semées en automne et récoltées en été, tandis que celles d'été sont semées au printemps et récoltées entre la fin de l'été et le début de l'automne. On trouve donc généralement 4 grands types de rotations (ainsi qu'un type de rotation propre aux pays nordiques) qui sont résumées sur la Figure III-2. Les cultures d'été sont définies par la lettre 'E' et les cultures d'hiver par la lettre 'H'. Nous considérerons donc dans notre approche 4 types de rotations de cultures : R_{HH} , R_{EE} , R_{HE} et R_{EH} . Nous supposons que pour chaque pixel de la zone d'étude, les rotations se répètent sur toute la durée de l'étude. Notons que la rotation R_{HE} est identique à la rotation R_{EH} avec un décalage d'un an, et les rotations R_{HH} et R_{EE} correspondent respectivement à des successions de cultures d'hiver (ex. blé suivi d'un colza) et à des successions de cultures d'été (ex. maïs suivi d'un tournesol). Enfin, une distinction est faite pour le cas des pays nordiques (pays situés au nord de la latitude 57.8°N). Dans ces régions, les cultures comme le blé, le colza, etc. considérées plus au sud comme des cultures d'hiver, sont semées au printemps (voir Fig. III-2) et permettent l'introduction d'une CI en automne sur la rotation R_{HH} (notée pour les pays nordiques R_{HH_n}).

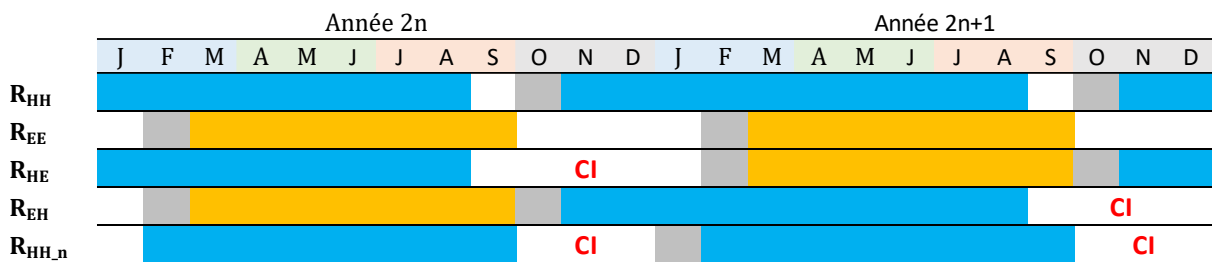


Figure III-2 : Représentation schématique des systèmes de rotations de cultures en Europe. H et E correspondent aux cultures d'hiver et d'été, respectivement. L'abréviation CI indique les périodes d'introduction potentielles des cultures intermédiaires.

Dans ce chapitre, l'introduction des CI est soumise à certaines règles :

- Les CI sont implantés uniquement sur les rotations R_{HE} et R_{HH_n} .
- Les CI ont une période de croissance minimale de 1.5 mois (0.75 mois pour le cas des pays nordiques).
- La destruction des CI est réalisée au moins 1 mois avant le semis de la culture suivante.

- La période d'introduction maximale des CI est limitée à 3 ou 6 mois.
- La levée des CI peut être soumise à un minimum de précipitation de 30 ou 50 mm devant être atteint le mois suivant l'introduction de la CI.

Afin d'estimer les surfaces agricoles sur lesquelles l'introduction de CI était possible, il a fallu dans un premier déterminer les surfaces en rotations R_{HH} , R_{EE} , R_{HE} et R_{HE} . Or la classification ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013a; Masson et al., 2003) sur laquelle s'appuie ces travaux ne fournit pas directement les surfaces en culture d'hiver et d'été.

2.3.1. Adaptation de la classification ECOCLIMAP

Dans la base de données ECOCLIMAP, les cultures sont classées selon leur type de photosynthèse (C3 et C4), alors que ce travail requiert une classification des cultures selon leurs dates d'implantation (hiver et été). Les cultures de type C4 correspondent essentiellement à des cultures d'été (*e.g.* maïs, sorgho, etc.), tandis que les cultures de type C3 peuvent correspondre à des cultures d'été (*e.g.* tournesol, pomme de terre, etc.), comme à des cultures d'hiver (*e.g.* blé, orge, colza etc.). Une modification apportée à la classification ECOCLIMAP a permis de réallouer une part des cultures de type C3 au total des cultures d'été.

Pour ce faire, les données statistiques Eurostat [agr_r_crops] ont été utilisées pour obtenir les superficies réelles allouées aux cultures d'été et d'hiver au sein de chaque pays. Ensuite, un correctif X (présenté dans le Tableau III-1) a été calculé en divisant le pourcentage de culture d'hiver Eurostat par le pourcentage de culture C3 ECOCLIMAP :

$$X_{pays} = \left(\frac{S_{HIVER}}{S_{HIVER} + S_{ETE}} \right)_{EUROSTAT} \bigg/ \left(\frac{S_{C3}}{S_{C3} + S_{C4}} \right)_{ECOCLIMAP} \quad \text{III-4}$$

Où $S_{CULTURE}$ est la surface du type de culture correspondant à la base de données Eurostat (S_{HIVER} ou S_{ETE}) ou ECOCLIMAP (S_{C3} ou S_{C4}).

Tableau III-1 : Valeur du correctif, par pays, appliqué aux données ECOCLIMAP permettant de convertir les surfaces de culture C3 et C4 en surface de culture d'hiver et d'été.

Allemagne	0.80	France	0.71	Pays-Bas	0.35
Autriche	0.73	Grèce	0.63	Pologne	0.83
Belgique	0.54	Hongrie	0.76	Portugal	0.45
Bulgarie	0.65	Irlande	0.95	République Tchèque	0.86
Chypre	0.93	Italie	0.77	Roumanie	0.48
Croatie	0.47	Lettonie	0.91	Royaume-Uni	0.96
Danemark	0.98	Lituanie	0.93	Slovaquie	0.78
Espagne	0.82	Luxembourg	0.89	Slovénie	0.49
Estonie	0.97	Malte	0.44	Suède	0.97
Finlande	0.98	Norvège	0.97	Suisse	0.72

À partir de ce correctif, les surfaces en culture d'été et d'hiver sont alors déterminées par :

$$F_{HIVER} = X_{pays} \times F_{C3} \quad \text{III-5}$$

$$F_{ETE} = F_{C4} + (1 - X_{pays}) \times F_{C3} \quad \text{III-6}$$

Où F_{C3} et F_{C4} sont les fractions de cultures C3 et C4 dans chaque maille originelle ECOCLIMAP, et F_{HIVER} et F_{ETE} sont les fractions de cultures d'hiver et d'été corrigées dans chaque maille ECOCLIMAP.

Une fois les fractions de cultures d'été et d'hiver corrigées pour chaque maille ECOCLIMAP, les surfaces en rotation (R_{HH} , R_{EE} , R_{HE} et R_{EH}) peuvent être estimées.

2.4. Estimation des surfaces de cultures en rotation

Pour chaque pixel, une fraction de cultures d'hiver et d'été a été convertie en surface en rotation selon un règle simple : « Seule une fraction C du maximum de culture pouvant être mis en rotation est effectivement mise en rotation ». La Figure III-3 présente un exemple d'allocation des cultures en rotation. Dans cet exemple, toute la surface en cultures d'été pourrait théoriquement être mise en rotation avec les surfaces en cultures d'hiver. Or dans la réalité ce n'est que rarement le cas. Seule une partie de la surface en cultures d'été est donc mise en rotation avec les cultures d'hiver. La portion de surface de cultures d'été restante étant considérée comme une rotation R_{EE} (e.g. monoculture de maïs). La fraction C correspondant à la proportion de cultures d'été mise en rotation avec les cultures d'hiver est un coefficient ajustable pour chaque pays. Il peut être fixé à 1 (toutes les surfaces d'été sont alors en rotation avec des cultures d'hiver) dans le cas d'un scénario optimiste (signifiant qu'un maximum de CI peut être introduite). Pour déterminer la valeur de C par pays en respectant un scénario réaliste, les données Eurostat ainsi que des connaissances en agronomie ont été utilisées. Les pratiques agricoles mises en place dans le sud-ouest de la France nous ont notamment été utiles pour estimer sur l'ensemble de l'Europe les systèmes de rotation selon des règles simples. Par exemple, une parcelle en tournesol l'année n est presque systématiquement mise en rotation avec une culture d'hiver. Moyennant le pourcentage de chaque culture, ce coefficient a été calculé pour chaque pays, et est présenté dans le Tableau III-2.

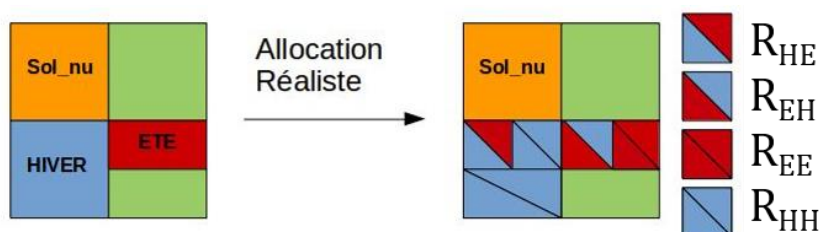


Figure III-3 : Exemple d'allocation des cultures d'été et d'hiver en rotation

Tableau III-2 : Coefficient C d'allocation des cultures par pays

Allemagne	0.60	France	0.76	Pays-Bas	0.66
Autriche	0.84	Grèce	0.99	Pologne	0.89
Belgique	0.63	Hongrie	0.95	Portugal	0.76
Bulgarie	0.96	Irlande	0.92	République Tchèque	0.60
Chypre	0.99	Italie	0.89	Roumanie	0.89
Croatie	0.97	Lettonie	0.98	Royaume-Uni	0.80
Danemark	0.60	Lituanie	0.93	Slovaquie	0.79
Espagne	0.96	Luxembourg	0.27	Slovénie	0.74
Estonie	0.99	Malte	1	Suède	1
Finlande	1	Norvège	1	Suisse	0.67

2.5. Dynamiques et périodes de végétation

Afin d'introduire des CI dans les rotations de cultures et de simuler leur impact d'un point de vue radiatif, il a fallu tout d'abord reconstruire les dynamiques de végétation associées à ces rotations et estimer les albédos correspondants. Pour ce faire les dates de semis et de récolte ont d'abord dû être

estimées pour chaque pixel MODIS pour identifier les périodes d'intercultures, susceptibles ou non d'accueillir des CI.

2.5.1. Estimation des cates de semis et de récolte

Les indices de végétation issus des produits satellitaires MODIS à 1/20° de résolution permettent de définir les dates d'implantation des CI. Grâce à ces indices (veg_3 et veg_4) et aux précédentes études du CNRM (Gibelin et al., 2006; Szczypta et al., 2014), 4 instants ont été définis pour chaque pixel :

- T1 : Récolte de la culture d'hiver.
- T2 : Semis de la culture d'hiver.
- T3 : Récolte de la culture d'été.
- T4 : Semis de la culture d'été.

Les instants T1 et T3 ont été déterminés grâce à veg_3 et veg_4 selon la règle suivante : « *Premier moment suivant $\max(veg_i)$ où $veg_i = 0.6 \times \max(veg_i) + 0.4 \times \min(veg_i)$* ». Si la détection de T1 est trop tardive (après la mi-novembre) alors T1 est fixé comme le « *premier moment suivant le maximum de veg où $veg_3 = 0.85 \times \max(veg_3) + 0.15 \times \min(veg_3)$* ». Les instants T2 sont estimés grâce à la règle suivante : « *Premier moment suivant T1 où veg_3 est croissant* ». Enfin les dates T4 sont déterminées selon la règle : « *Premier moment précédant $\max(veg_4)$ ou veg_4 est croissant* ». Une fois ces dates définies pour chaque pixel/maille ECOCLIMAP, les dynamiques correspondantes aux rotations énoncées précédemment peuvent être reconstruites.

2.5.2. Reconstruction des dynamiques de végétation de d'albédo

Pour créer les dynamiques de végétation correspondantes aux rotations suscitées (R_{HH} , R_{EE} , R_{HE} et R_{HE}), les signaux de végétation des cultures d'hiver et d'été ont été combinés grâce aux instants T1 à T4. Un exemple de reconstruction d'une dynamique de rotation R_{HE} a été tracé pour le pixel englobant la parcelle d'Auradé (Fig. III-4). Les courbes rouge et bleu correspondent respectivement aux dynamiques des cultures d'hiver et d'été, et la courbe grise correspond à l'albédo des surfaces en rotation R_{HE} . Les traits pleins et pointillés indiquent respectivement les dynamiques de végétation en rotation sans et avec CI. La dynamique de végétation simulée pour les CI respecte les règles suivantes :

- Une période de croissance linéaire de 40 jours (5×8 jours) suivant l'introduction des CI.
- Le maximum de végétation des CI ne peut excéder $0.95 \times veg_i$.
- Le maximum d'albédo des CI ne peut excéder $0.95 \times \alpha_i$.

Un gain d'albédo lié à l'introduction de CI peut alors être estimé pour chaque pixel. Il va permettre, moyennant les données de rayonnement et de transmittance, d'estimer un forçage radiatif. Ce dernier sera par la suite converti en équivalent CO_2 . Ces étapes sont détaillées dans l'article constituant le cœur de ce chapitre.

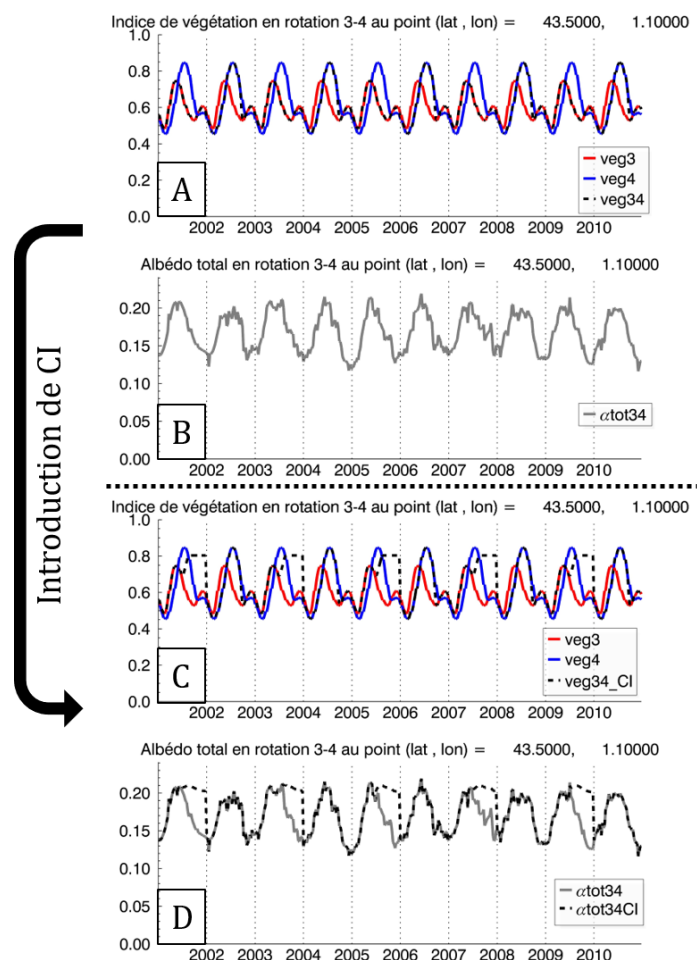


Figure III-4 : Exemple de dynamiques de végétation et d'albédo d'une rotation HE (B et D) reconstruites à partir des dynamiques de végétation (A et C) et d'albédo des cultures en C3 et en C4 pour le pixel englobant la parcelle d'Auradé. Les traits en pointillés représentent les dynamiques reconstruites sans (B) et avec (D) CI.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ Le modèle RFCC (*'Radiative Forcing of Cover Crops'*) est un modèle de simulation de la modification de l'albédo induit par l'introduction de cultures intermédiaires dans les rotations de cultures, permettant d'analyser le forçage radiatif induit à l'échelle Européenne par les CI.
- ♣ Des produits albédo basses résolutions (1/20°) et d'indice de végétation de cultures, issus de la décomposition par filtre de Kalman des données MODIS, ainsi que la classification ECOCLIMAP et les données climatiques ERA-Interim sont utilisés en entrée du modèle.
- ♣ Il est possible de simuler différents scénarii d'introduction des cultures intermédiaires.

3. Résumé de l'article en français

La gestion de l'albédo des surfaces agricoles est un levier potentiel d'atténuation du changement climatique. Nous avons donc quantifié le forçage radiatif lié à l'augmentation de l'albédo des surfaces cultivées en Europe induit par l'introduction de cultures intermédiaires durant les phases d'intercultures. Cela est possible car l'albédo du sol nu dans de nombreuses régions d'Europe est inférieur à celui de la végétation. En utilisant des données satellitaires MODIS à 1/20° de résolution ainsi que des produits ECOCLIMAP, nous avons démontré que l'introduction de cultures intermédiaires dans les rotations de cultures permettrait d'augmenter l'albédo sur 4.17% de la surface de l'Europe. Selon notre étude, l'effet résultant de cette augmentation de l'albédo des surfaces agricoles pour une introduction de CI sur une durée de 3 mois équivaldrait à une atténuation de 3.16 MtCO₂-éq.an⁻¹ sur un horizon de 100 ans. Cela équivaut à un potentiel d'atténuation par unité de surface (m²) de cultures intermédiaires introduites en Europe de 15.91 gCO₂-éq.an⁻¹.m⁻². En ajoutant l'impact des cultures intermédiaires sur la séquestration du carbone dans le sol et sur l'utilisation d'engrais, nous concluons qu'en considérant les zones favorables à leur introduction, les cultures intermédiaires introduites en Europe pourraient atténuer les émissions de gaz à effet de serre anthropiques du secteur agricole jusqu'à 7% par an, en utilisant 2011 comme référence. Cette valeur, obtenue à l'échelle européenne, est cohérente avec les autres estimations existantes dans la littérature scientifique. Nous montrons que ce potentiel d'atténuation pourrait être augmenté de 27% si les cultures intermédiaires étaient maintenues sur des périodes pouvant aller jusqu'à 6 mois, et que ce potentiel pourrait être réduit de 28% dans les zones où la ressource en eau est limitante. Les pays présentant le plus fort potentiel d'atténuation sont la France, la Bulgarie, la Roumanie et l'Allemagne.

4. What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crop (Published in Environmental Research Letters)

Carrer Dominique^{(1,4)*}, Pique Gaétan^{(2,3)*}, Ferlicq Morgan⁽²⁾, Ceamanos Xavier⁽¹⁾ and Ceschia Eric⁽²⁾

¹CNRM UMR 3589, Météo-France/CNRS. 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse Cedex, France

²CESBIO - Université Toulouse III/CNRS/CNES/IRD/INRA, 18 avenue Edouard Belin, bpi 2801, 31401 Toulouse Cedex 9, France

³ADEME, 20 avenue du Grésillé – BP 90406 Angers Cedex 01, France

⁴Author to whom any correspondence should be addressed

E-mail address: dominique.carrer@meteo.fr

Keywords: surface albedo, radiative forcing, cropland, cover crops, agriculture

4.1. Abstract

Land cover management in agricultural areas is a powerful tool that could play a role in the mitigation of climate change and the counterbalance of global warming. First, we attempted to quantify the radiative forcing that would increase the surface albedo of croplands in Europe following the inclusion of cover crops during the fallow period. This is possible since the albedo of bare soil in many areas of Europe is lower than the albedo of vegetation. By using satellite data, we demonstrated that the introduction of cover crops into the crop rotation during the fallow period would increase the albedo over 4.17% of Europe's surface. According to our study, the effect resulting from this increase in the albedo of the croplands would be equivalent to a mitigation of 3.16 MtCO₂-eq.year⁻¹ over a 100 year time horizon. This is equivalent to a mitigation potential per surface unit (m²) of introduced cover crop over Europe of 15.91 gCO₂-eq.year⁻¹.m⁻². This value, obtained at the European scale, is consistent with previous estimates. We show that this mitigation potential could be increased by 27% if the cover crop is maintained for a longer period than 3 months and reduced by 28% in the case of no irrigation. In the second part of this work, based on recent studies estimating the impact of cover crops on soil carbon sequestration and the use of fertilizer, we added the albedo effect to those estimates, and we argued that, by considering areas favourable to their introduction, cover crops in Europe could mitigate human-induced agricultural greenhouse gas emissions by up to 7% per year, using 2011 as a reference. The impact of the albedo change per year would be between 10% and 13% of this total impact. The countries showing the greatest mitigation potentials are France, Bulgaria, Romania, and Germany.

4.2. Introduction

Today, the scientific community has evidence that the global warming issue (IPCC 2014) will not be resolved without clever solutions to reduce human-induced radiative forcing (RF). Possible strategies for climate mitigation include carbon dioxide removal (CDR) approaches or solar radiation management (SRM). While CDR aims at removing some CO₂ from the atmosphere, the goal of the latter approach is to counteract greenhouse gas-induced warming with an increase in the sunlight reflected back to space by an increased average albedo of the Earth. Lenton and Vaughan, (2009) estimated that SRM strategies have the potential to cool the climate to its preindustrial state.

Various initiatives have been proposed to control the Earth's albedo. Although the dispersion of sulfate aerosols into the atmosphere is the most emblematic, this approach could have unintended and possibly harmful consequences (Robock et al., 2009). Changing the surface albedo naturally seems to be a more appropriate solution. Some studies have suggested that an increase in surface albedo can be achieved by making roofs white worldwide (Akbari et al., 2009; Jacobson and Ten Hoeve, 2012). Other initiatives support deforestation or forestation strategies to induce surface albedo changes (Betts, 2000; Davin et al., 2014; Singarayer and Davies-Barnard, 2012). An advantage of modifying the continental surface albedo for climate mitigation purposes (Lenton and Vaughan, 2009a) is that its progressive implementation could help limit the risk of an excessively rapid or strong negative climatic response and could, therefore, be reversed.

This study analyses the radiative forcing changes induced by an increase in the surface albedo of croplands in Europe following the introduction of a cover crop during the fallow period, that is, between the harvest of winter crops and the seeding of the following summer crops. After the harvest, croplands are often bare soil, which has usually a lower albedo than vegetation (Aguar and Page, 1999; Campbell and Norman, 1998; Carrer et al., 2014; Davies and Idso, 1979; Oke, 2002). The seeding of a cover crop (also referred to as a catch crop or green manure crop) during the fallow period, in places where the period is long enough, would permit more solar energy to be returned to space than when the soil remains bare after the harvest and during the entire winter season (Kaye and Quemada, 2017a). Many types of plants can be used as catch (or cover) crops. The most extensively used are legume (fava bean, clover) and grasses, but there is increasing interest in brassicas (such as rape, mustard, and forage radish). Another potential advantage of this practice is that it may allow the significant storage of carbon in the form of organic matter in the ground (Justes et al., 2012; Poeplau and Don, 2015a), thus combining SRM and CDR approaches (Smith and Rasch, 2013), as recommended by the IPCC (2014).

The main objective of this article is to investigate if the inclusion of cover crops in crop rotation is beneficial for climate mitigation purposes and if, therefore, this procedure could be considered by the Europe Commission to counteract climate change in the 28 Member States (EU-28). To this end, we quantify first the potential of global warming compensation resulting from human-induced surface albedo increases due to the introduction of a cover crop at the European scale. In a second part of this work, we also discuss the impact of cover crops on soil carbon sequestration and the use of fertilizer. For this purpose, we use satellite data, land cover databases, meteorological data from model reanalyses, ground measurements, and national agricultural statistics. The potential of these cover crops to increase latent heat fluxes at the expense of sensible heat fluxes, and to decrease surface temperature is not discussed here, even if these processes may increase the mitigation effect (Kaye and Quemada, 2017a).

4.3. Methods and materials

4.3.1. Approach to cover crop inclusion

This section identifies the areas in Europe where cover crops could be sown during the fallow period. Only agricultural areas with annual cropping are included in this study (section 3.3.1.1.). Furthermore, the favourable periods for the introduction of cover crops are not the same everywhere (section 3.3.1.2.).

4.3.1.1. Location of potential areas for the inclusion of cover crops

Suitable areas are those containing croplands with annual cropping. This includes the two families of arable crops that are predominant in central and southern Europe, summer crops (sown in spring and harvested in autumn) and winter crops (sown in autumn and harvested in early summer). Table III-3 presents the four main crop rotations that exist. As the table shows, the duration of the fallow period can either be too short (Rwww, winter–winter–winter case) or be associated with a late and unfavourable seeding period for cover crops (Rsss, summer–summer–summer case). Consequently, cover crops are mainly implanted between a winter crop (after) and a summer crop (before) in Europe (see green boxes, Table III-3); thus, Rsws (summer–winter–summer case) and Rws (winter–summer–winter case) were the only cases considered in this study to quantify the mitigation potential of cover crops.

Table III-3 : Different possible types of crop rotations during a 3-year period: summer–summer–summer (Rsss), winter–winter–winter (Rwww), summer–winter–summer (Rsws), and winter–summer–winter (Rws). In this example, the summer and winter crop periods are represented by black and grey, respectively. The period and duration of the vegetation cycles are estimated according to the approximate seeding and harvest dates of each crop over central and western Europe. Green boxes show favourable periods for the introduction of cover crops that have been considered in this study. Note that this period and its duration vary spatially in Europe.

	YEAR 1												YEAR 2												YEAR 3												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Rsss																																					
Rwww																																					
Rsws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					
Rws																																					

To estimate the location of croplands in Europe from year to year at a fine spatial resolution, as well as their associated crop rotation type, we used ECOCLIMAP land cover (Faroux et al., 2013a; Masson et al., 2003) and the European agricultural statistics (Eurostat) in 2011 (<http://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture/data/database>; last consulted: June 2016). ECOCLIMAP includes 520 ecosystems, or cover types, that are defined at a spatial resolution of 1 km. The heterogeneity of an ECOCLIMAP grid cell includes the mixing of 11 co-existing vegetation types, which may include winter and summer crops. Since ECOCLIMAP does not provide information about the possible crop rotations, the percentages of summer and winter crops and the crop rotation ratios (Rsws, Rws, Rsss, Rwww) in the sub-pixels were refined based on agronomical expertise and the 2011 national statistics from Eurostat. By doing this, the correct proportions of winter and summer crops were obtained for each country. Finally, we determined that the winter–summer crop rotation was the most common crop rotation in Europe (26% of the crop rotations).

4.3.1.2. Period in which a cover crop can be grown

This study analyzed data from three years, from 2008–2010, during which the introduction of cover crops in the fallow period was considered. To identify the winter and summer crop harvest and sowing times for each grid cell, we used a method proposed by Gibelin et al., (2006) and Szczypta et al., (2012) based on the vegetation index obtained from the ECOCLIMAP database. First, the harvest was estimated to occur in the declining phase of the vegetation index, when it decreases below 40% of the yearly maximum. Second, seeding was estimated to occur when the vegetation index begins to increase the following year. We used the ECOCLIMAP vegetation cycle climatology derived from satellite observations (Faroux et al., 2013a) to estimate these two occurrence dates for the winter and summer crops in each grid cell. For areas where winter to summer crop rotation occurs (mostly in central and southern Europe), the estimated fallow period between the winter crop harvest and the summer crop seeding was considered to be the potential period for the cover crop introduction.

4.3.2. Radiative forcing

4.3.2.1. Relationship between surface albedo and TOA radiative forcing

In the remote sensing of continental surfaces, the total surface albedo of a given area (or a pixel, in our case) throughout a full year can be expressed daily as the weighted sum of the vegetation albedo (crop, in our case) and bare soil albedo:

$$\begin{aligned}\alpha(d) &= (1 - veg(d)) \times \alpha_{bs}(d) + veg(d) \times \alpha_{veg}(d) \\ \alpha_{CI}(d) &= (1 - veg(d) - veg_{CI}(d)) \times \alpha_{bs}(d) + veg(d) \times \alpha_{veg}(d) \\ &\quad + veg_{CI}(d) \times \alpha_{vegCI}(d)\end{aligned}\tag{III-7}$$

where α , α_{bs} , and α_{veg} are the total, bare soil, and vegetation (summer or winter crop here) albedos, respectively. The parameter veg is the vegetation fraction. If a cover crop is added in the crop rotation, a vegetation fraction (veg_{CI}) of the cover crop is added to the equation (see the second line of equation III-7), and the total albedo (α) becomes α_{CI} . α_{vegCI} is the vegetation albedo of the cover crop. Calculations for total albedo are done on a daily basis (d).

The direct radiative forcing in $W.m^{-2}$ at the top-of-atmosphere (TOA) level due to the change in the surface albedo ($RF_{\Delta\alpha}$), here caused by the introduction of a cover crop in the crop rotation, is expressed in units of time for each pixel, as follows (Lenton and Vaughan, 2009a):

$$\begin{aligned}RF_{\Delta\alpha}(W.m^{-2}) &= -1/Ndays \sum_{d=1, Ndays} SW_{in}(d) \times T_a(d) \times \Delta\alpha(d) \\ \text{with } \Delta\alpha(d) &= CI_Ratio \times (\alpha_{CI}(d) - \alpha(d))\end{aligned}\tag{III-8}$$

Where SW_{in} is the total incoming solar radiation at the surface, T_a is the upward atmospheric transmittance, $\Delta\alpha$ is the variation in surface albedo, and CI_Ratio is the percentage of cover crop introduction in the Rsws or Rsw rotation. It is fixed between 0 and the maximum value of the crop rotation ratio (Rsws or Rsw) in the sub-pixels (according the favourable periods and areas defined in sections III-4.3.1.1 and III-4.3.1.2). $RF_{\Delta\alpha}$ is the annual average of the daily radiative forcing (d from 1 to $Ndays$, where $Ndays$ is equal to 1095 in this study, *i.e.* 3 entire years). The value of the $RF_{\Delta\alpha}$ at the TOA level is representative of the daily local power in $W.m^{-2}$ that would be reflected back to space due to the introduction of a cover crop. The estimation of $RF_{\Delta\alpha}$ resulted from 3 years of data, from 2008–2010, and was calculated based on the daily values of radiative forcing. As a matter of fact, all parameters (the albedo values, the vegetation fractions, the incoming solar radiation, etc.) in equation

III-8 were considered on the daily basis. This means the direct $RF_{\Delta\alpha}$ over 3 years was calculated for each pixel grid over Europe. The methods for obtaining all the parameters in equation 2 are described in the following section.

4.3.2.2. The α_{bs} , α_{veg} and veg data

In the last decade, surface albedo estimates have become available at the global scale using satellite observations from different instruments (Qu et al., 2015). These instruments allow us to estimate the Earth's surface albedo at a spatial resolution between 500 m and 5 km, with usually less than 10% uncertainty (Carrer et al., 2010). Given the several types of land covers that coexist in each satellite pixel at these resolutions, (Carrer et al., 2014) attempted to improve the characterization of the heterogeneity of the grid cells. This was done by developing a mathematical method based on ECOCLIMAP prior information (see section III-4.3.1.1) to derive the surface albedos of up to 11 co-existing vegetation types (grassland, broadleaf, evergreen, summer crop, winter crop, etc.) and a bare soil in the same grid cell. In addition, the method proposed by Carrer et al., (2014) allowed the effective capture of all seasonal or intra-annual and inter-annual albedo fluctuations of up to 12 pure, co-existing vegetation cover types and their underlying soils in the same pixel grid. The ECOCLIMAP land cover database was here used to determine the fraction of each co-existing vegetation type in a same grid cell. These fractions were readjusted at the country scale with the inventoried fractions of the different crop types provided by the 2011 national statistics from Eurostat (see section III-4.3.1.1). In equation III-7, α_{bs} , and α_{veg} were obtained by summing the different contributions from the pure vegetation types (maximum of 12 co-existing types) that exist at the sub-pixel scale. Values corresponding to the pure vegetation characteristics at the sub-pixel scale were from Carrer et al., (2014). Only the fraction of area covered by the summer or winter crop in a given grid cell was potentially impacted by the introduction of a cover crop in equation III-7. In this grid cell, the temporal fluctuations of the bare soil albedo were distinguished from the albedo changes of the different vegetation types. Updates of these values were conducted with the MODIS satellite product (MCD43GF) of the snow-free albedos (bi-hemispherical albedos in the shortwave domain, [0.3–4 μm]) using the Kalman filter method. Again, Carrer et al., (2014) provided, for the first time, estimates of the temporal evolution of bare soil albedo and vegetation albedos of crops at a global scale (which is necessary to properly conduct this study). These time series from 2008–2010 were used in the present study (albedo data of winter and summer crops and of bare soil - α_{veg} and α_{bs}).

4.3.2.3. The α_{vegCI} , veg_{CI} data

We interposed the development of some vegetation during the fallow period into the crop rotation between the winter and summer crops (see green boxes in Table III-3). The fallow period was determined according to the method presented above (see section III-4.3.1). The maximum fractional presence of the cover crop (veg_{CI}) was arbitrarily fixed to $0.95 \times \max(veg)$. It was assumed here that the level of development (or abundance) of the cover crop will not exceed the maximum level of development of the crop in a given location, a conservative approach. The vegetation fraction of the introduced cover crops gradually increased to the maximum value above. We used a linear interpolation to simulate this increase in the vegetation fraction, corresponding to the growing phase of the crop cover. Then, veg_{CI} remained constant until the cover crop was removed (veg_{CI} set to zero). Different scenarios for the date of removal were tested (see section III-4.3.2.6). Equation III-7 was used to estimate each daily value of the crop cover albedo (α_{CI}) derived from the daily estimates of veg_{CI} combined with α_{bs} , and α_{vegCI} . The value of α_{vegCI} was arbitrarily fixed at $0.95 \times \max(\alpha_{veg})$, although it could be higher, according to Ferlicoq (2016).

4.3.2.4. The SW_{in} and T_a data

The incoming solar radiation at the top of the atmosphere (SW_{TOA}) and at the surface level (SW_{in}) reported by the ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasts) reanalysis (Berrisford et al, 2011a; Berrisford et al., 2011b; Dee et al., 2011) were used in this study. Assuming the upward and downward atmospheric transmittances to be equal, T_a in equation III-8 was approximated as the ratio SW_{in}/SW_{TOA} . In comparison, when a mean annual and spatially constant upward T_a of approximately 0.85 is used as in Lenton and Vaughan, (2009) and Kaye and Quemada, (2017), that value has a tendency to overestimate the $RF_{\Delta\alpha}$. In addition, the rainfall data from this reanalysis was used later in section III-4.4.3 to consider the water needs of the cover crop emergence. Details concerning the satisfactory quality of these ECMWF fields are given in Dee et al., (2011) and Szczypta et al., (2012).

4.3.2.5. Conversion of radiative forcing into equivalent CO_2

Hereafter, we present two methods to convert radiative forcing into equivalent CO_2 . The estimations delivered by the two methods will be compared in section III-4.4.

Method 1 (based on a constant CO_2 airborne fraction, AF)

To compare the previously obtained $RF_{\Delta\alpha}$ with sources of CO_2 emissions, Betts, (2000), Bird et al., (2008), Muñoz et al., (2010) and Bright, (2015) convert RF in $W.m^{-2}$ into $kgCO_2-eq.year^{-1}$, as follows :

$$RF_{CO_2}(kgCO_2 - eq.year^{-1}) = \frac{S \cdot RF_{\Delta\alpha}}{AF} \times \frac{\ln 2 pCO_{2,ref} \cdot M_{CO_2} \cdot m_{air}}{S_{EARTH} \cdot \Delta F_{2x} \cdot M_{air}} \frac{1}{TH} \quad III-9$$

where S is the area affected by the change in surface albedo (in m^2), $RF_{\Delta\alpha}$ is the radiative forcing at the TOA level (in $W.m^{-2}$; see equation III-8), $pCO_{2,ref}$ is a reference partial CO_2 pressure in the atmosphere (383 ppmv), M_{CO_2} is the molecular weight of CO_2 ($44.01 g.mol^{-1}$), m_{air} is $5.148 \times 10^{15} Mg$, S_{Earth} is the area of the Earth ($5.1 \times 10^{14} m^2$), ΔF_{2x} is the radiative forcing resulting from a doubling of current CO_2 concentration in the atmosphere ($+3.7 W.m^{-2}$), and M_{air} is the molecular weight of dry air ($28.95 g.mol^{-1}$). With equation III-9, the local power in $W.m^{-2}$ due to the albedo change (equation III-8) that we estimated at the European spatial scale (surface area S) was converted into global RF_{CO_2} (surface area S_{Earth}). TH is the time horizon. Based on the recommendations of Anderson-Teixeira et al., (2012) and Kaye and Quemada, (2017), the time horizon of our potential global warming calculations was fixed at 100 years (which supposes that cover crops will be maintained for this duration during the fallow periods). The per-year CO_2 -eq from the albedo change was $1/100^{th}$ of the total CO_2 -eq due to the albedo change. In this way, the estimates of an equivalent CO_2 pulse due to the albedo change can potentially be compared to other sources of CO_2 emissions (for example, the energy, agriculture, or transport sectors). Note that the short analysis times of the cover crop introduction in the crop rotations overemphasize the albedo effect, while long analysis times, such as that in this study, deemphasize this effect (Anderson-Teixeira et al., 2012). More studies are needed to determine the most appropriate time frame for this analysis; this is currently an active area of research in environmental biophysics (Bright et al., 2015).

Parameter AF is the average CO_2 airborne fraction, defined as the ratio of the annual increase in atmospheric CO_2 to the total CO_2 emissions from anthropogenic sources. In other words, it represents the proportion of human-emitted CO_2 that remains in the atmosphere after a certain period of time. Considering the Bern carbon cycle model (Joos et al., 2001), after 10 years, 66% of the initial emission remains in the atmosphere due to CO_2 decay over time, while only 36% remains after 100 years. The integral of Bern carbon cycle model gives a 100 year AF value of 0.48 (quite close to 0.5 and 0.55 used by Betts, (2000) and Akbari et al., (2009), respectively). If all variables taking constant values in equation III-9 (right-hand term) are grouped into a single parameter ($rf_{CO_2} = 0.908 W.kg.CO_2^{-1}$), we obtain the following, according to Muñoz et al., (2010) and Bright et al., (2015):

$$RF_{CO_2-eq}(kgCO_2 - eq.year^{-1}) = \frac{RF(W.m^{-2}) \times S(m^2)}{AF \times rf_{CO_2}(W.kg_{CO_2}^{-1}) TH} \quad III-10$$

where AF is the atmospheric fraction for a 100-year time horizon (TH=100) and rf_{CO_2} is the derived radiative forcing from 1 kg of CO_2 . The uncertainty in these calculations depend on the respective uncertainties of α_{bs} , α_{Cl} , SW_{in} , and T_a in equation III-8, as well on rf_{CO_2} and AF when RF is converted to $kgCO_2$ -eq. For rf_{CO_2} , Akbari et al., (2009) suggest a $\pm 10\%$ error whereas the error concerning AF is less than $\pm 15\%$ according to Forster et al, (2007).

Method 2 (Global Warming Potential)

The use of a constant AF does not represent the variations in the emission rates of atmospheric CO_2 , which are non-negligible over a 100-year period. The Global Warming Potential method (GWP method, IPCC's emission metrics, Myhre et al., (2014)), which was also used in this study, attempts to take into account these variations in the atmospheric carbon concentration by using impulse-response functions (IRFs) (Joos et al., 2013; Myhre et al., 2014). The converted CO_2 -eq(t) decreases rapidly in the short term but very slowly over the long term. In the same way as above, to obtain a per-year CO_2 -eq, we divided the 100-year GWP by 100. Still, as mentioned above, the short analysis times of the cover crop introduction in the crop rotations overemphasize the albedo effect, while long analysis times, like that used in this study, deemphasize this effect.

4.3.2.6. Scenarios for introducing the cover crops

In the first scenario that we tested, the cover crop was added during the first three months following the harvest of the winter crop, when possible. This three-month period was tested first, as it corresponds to the duration of cover crop introduction period that is recommended in some European countries to limit nitrate pollution when cover crops are used as catch crops. In the second scenario, we accounted for limitations due to the water requirements of cover crops. The rainfall values in each pixel of our study grid were used to limit the area where the crops could grow (Figure III-5(c)). Rainfall data from the ECMWF reanalysis were used with a threshold of 50 mm (the cumulative value for the first month after seeding) for the development of the cover crop. This condition is more restrictive than the requirement of 30 mm, which was estimated by Brisson et al., (2009). All zones where rainfall is lower than 50 mm were excluded from our calculations in this second scenario. In the third scenario, we calculated the greatest impact by extending the cover crop for a period longer than 3 months, *i.e.* the longest possible period up to a maximum of 6 months, depending on the duration of the fallow period for each pixel. No limitation due to the water supply was introduced here. In all scenarios, the cover crop was not added if the introduction period was less than 1 month.

4.4. Results

4.4.1. Albedo changes

The albedo of bare soil may change with time. In fact, values are usually lower in the winter than in summer due to an increase in the soil water content. Figure III-5 shows a comparison between the bare soil albedo values retrieved in August and December 2008. These estimates were derived from MODIS satellite data (Carrer et al., 2014). The darkening of soils is one of the most important factors determining how profitable the introduction of the cover crop could be. The areas where the soil was brighter than a given threshold (typically 0.2) in Figures III-5(a) and (b) are likely unsuitable for introducing any cover crop. Indeed, the albedo of crops is typically between 0.15 and 0.3, except for some areas, such as Spain, that show a higher bare soil albedo in the summer. Figure III-5(c) shows the different types of soil classified by the Harmonized World Soil Database (HWSD—Version 1.21; Fischer et al., (2008)). The darkest soil in the world is the chernozem type (in dark blue, Figure III-5(c)).

There are two ‘chernozem belts’ in the world, and the main one is located north of the Black Sea (see Figure III-5(b)). The albedo of chernozem soil becomes very low in this area in December, and during this period, the soil is often bare due to the fallow.

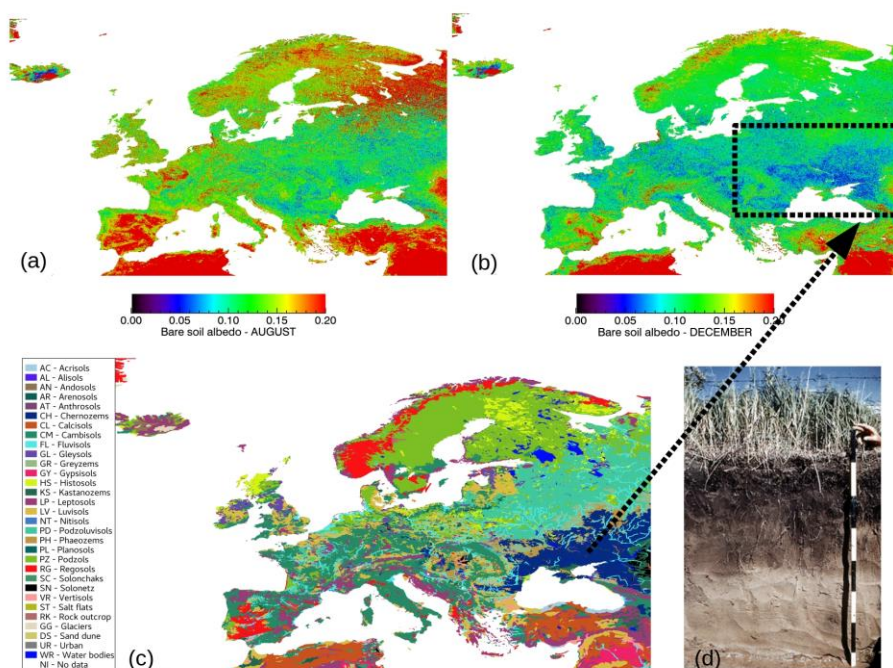


Figure III-5 : Mean bare soil albedo in August 2008 (a) and, December 2008 (b) and soil types from the HWSD database (c). The black rectangle delimitates the chernozems area (dark blue). A picture of this soil is shown in (d).

4.4.2. The fallow period

We estimated the start date of the fallow period for the winter-summer crop rotation following the methodology presented in section III-4.3.1. This occurs across Europe, on average across, on day 241 (August 29). The fallow period occurs earlier in the southwest than in the northeast of Europe (see Figure III-5(a)). The latest fallow periods start in the northern latitude regions (*i.e.* Norway, Sweden, and Finland) and over mountainous areas (*e.g.* the Carpathian, Alpes, and Pyrenean Mountains).

Figure III-6(b) shows the duration of the fallow period between the winter crop and the following summer crop. The average duration of the fallow period is 5.96 months, and it typically varies from 9 months in the southwest (in Spain) to 5 months in the northeast (in the Baltic States) of Europe. Hence, the duration is longer than the 3 months, which corresponds to the first and second tested scenarios (see section III-4.3.2.6), nearly all over Europe, except for in Scandinavia, where it lasts approximately 2 months. It is important to remark that cover crops could be added for periods exceeding 3 months in multiple areas in Europe.

The starting date of the fallow period (Figure III-6(c)) can also correspond to the date of seeding of the cover crop. To discuss the water needs of the cover crop for its emergence, Figure III-6(c) shows the mean cumulative precipitation during the months following the starting date of the fallow period.

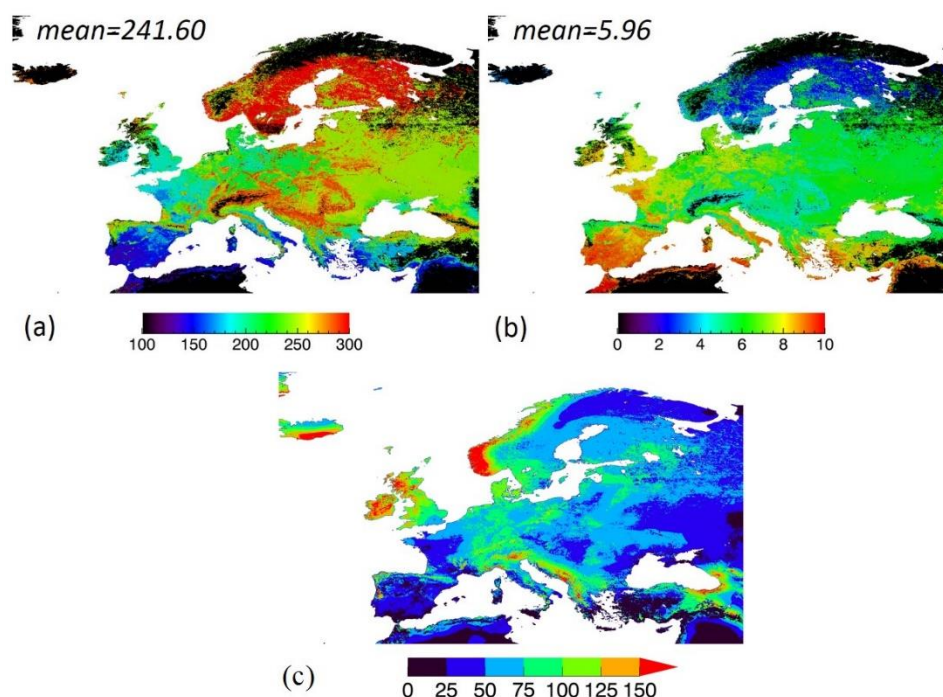


Figure III-6 : (a) Starting date in days after the 1st of January and (b) duration in months of the 2008–2009 fallow period for the winter– summer crop rotation (between year 1 and year 2, figure 1 and table 1). (c) Mean cumulative precipitation during the month following the starting date of the fallow period (or the seeding of the cover crop) see (a).

4.4.3. Albedo increase and radiative forcing

The strategy to introduce a cover crop in the crop rotation is described in section III-4.3.2.3. In the first scenario that we tested, the cover crop was added, when possible, during the first three months after the harvest of the winter crop (see Figure III-6(a)). The impact is expressed after averaging the yearly results over three years. The increase in the surface albedo resulting from the introduction of a cover crop ($\alpha_{CI} - \alpha$, equation III-8) is shown in Figure III-8(b). The increase in the surface albedo varies geographically and is, on average, equal to 0.0023 over the entire domain during the introduction period. In some places (*e.g.* France and Romania), the surface albedo of croplands is increased up to 0.15. The magnitude of this increase depends on how dark the soil is (low value of the bare soil albedo, α_{bs}) and how developed the cover crop is (high value of the vegetation fraction of the cover crop, veg_{CI}). In a few places, the bare soil is brighter than the cover crop, thus making the introduction of a cover crop unprofitable (see negative values in Figure III-8(b)). These areas are not discarded from the calculation of the climate change mitigation power. The bare soil albedo has a seasonal cycle, and it usually decreases rapidly after the summer (beginning of the rainy season). During the autumn–winter period, the values of the bare soil albedo across Europe become low (see Figures III-6(a) and (b)). The introduction of the cover crop becomes potentially profitable, as can be observed in Figure III-8(b).

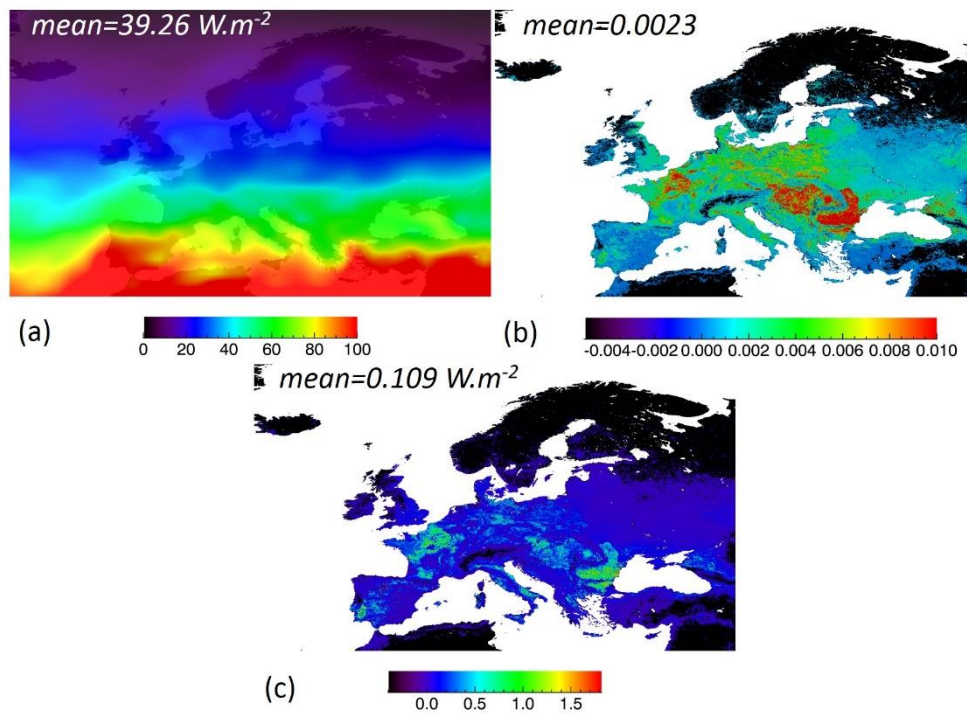


Figure III-7 : Mean daily value of (a) $T_a * SW_{in}$ ($W.m^{-2}$), (b) the increase in the surface albedo with the introduction of a cover crop, and (c) the radiative forcing ($RF_{\Delta\alpha}$) due to the introduction of a cover crop for the 3 months after the winter crop harvest in 2008 (in $W.m^{-2}$).

Data from the ECMWF reanalysis are used. Figure III-8(a) shows the mean incoming solar radiation multiplied by the atmospheric transmittance ($T_a * SW_{in}$, equation III-8) during the first three months of the 2008–2009 fallow period (the same period during which the difference in the albedo was calculated in Figure III-8(b)). This number represents the outgoing solar radiation from the Earth in the case of a surface albedo equal to 1. The mean value is 39.26 $W.m^{-2}$, and geographically, it primarily depends on the mean solar zenithal angle, which explains the south–north gradient. Figure III-8(c) shows the change in $RF_{\Delta\alpha}$ in $W.m^{-2}$ caused by the introduction of a cover crop after the winter crop harvest in 2008 (the result of a combination of Figures III-8(a) and (b), see equation III-8). The areas with a strong potential are not always the areas that exhibit the strongest albedo increase (see, for example, southern Portugal in Figure III-7(b)), as high values of atmospheric transmittance and incoming solar radiation are also important. However, the strongest changes in $RF_{\Delta\alpha}$ occur in Romania, Bulgaria, Hungary, Slovenia, and northern France, and these variations are clearly caused by strong albedo increases.

We estimate that the areas where cover crops could be introduced cover 4.17% of the 28-member states of Europe, including 7.87% of France, 9.47% of Bulgaria, 10.62% of Romania, and 6.20% of Germany (see Table III-4). This area represents 22% of the cultivated crop areas in the EU-28 (34% in France, 30% in Romania, and 21% in Germany). The difference in radiative forcing is lower for high latitude regions where less incoming solar radiation reaches the surface at the time of the cover crop introduction (0.01 $W.m^{-2}$ in Sweden versus 0.59 $W.m^{-2}$ in Portugal on average).

Table 2 also lists the cover crop albedo-induced effect on the radiative forcing per country in the EU-28 converted into $MtCO_2\text{-eq.year}^{-1}$ by using method 1 (and method 2, see section III-4.3.2.5). France, Bulgaria, Romania, and Germany are the four countries with the greatest mitigation potentials,

with changes in RF_{CO_2} of 0.87 (0.81), 0.39 (0.36), 0.36 (0.33) and 0.35 (0.33) $MtCO_2\text{-eq.year}^{-1}$, respectively. These values are consistent with the crop yields at the national scale, as France is by far the most important agricultural producer of cereals in Europe, according to Eurostat. The cumulative RF_{CO_2} over EU-28 is 3.16 (2.92) $MtCO_2\text{-eq.year}^{-1}$. This value represents 0.74 (0.68)% of the agricultural greenhouse gas (GHG) emissions in 2011, which were equal to 426.28 $MtCO_2\text{-eq}$ (The Eurostat statistics were updated in 2015, <http://ec.europa.eu/eurostat/>) (see Table III-4).

Tableau III-4 : Mean average increase in the surface albedo and the associated radiative forcing (in $W.m^{-2}$ and in $MtCO_2\text{-eq.year}^{-1}$, respectively) per country for 3 month cover crop introduction period. The percentage of the surface used is indicated relative to the total surface of the country (in %). GHG agricultural emissions are listed in the last column on the right (in $MtCO_2\text{-eq}$).

	Surface albedo increase	Albedo-induced radiative forcing	Country area	% use of the country's area for cover crop introduction	Radiative forcing per country (method 1 - constant AF)	Radiative forcing per country (method 2 - GWP)	Agricultural GHG emissions (2011)
		$W.m^{-2}$	km^2	%	$MtCO_2\text{-eq.year}^{-1}$	$MtCO_2\text{-eq.year}^{-1}$	$MtCO_2\text{-eq}$
Portugal	2.70E-03	-5.88E-01	90 608	2.70	7.83E-02	7.24E-02	30.09
Italy	1.80E-03	-2.00E-01	306 697	3.51	21.62E-02	2.00E-01	30.86
Malta	1.64E-03	-3.46E-01	350	3.31	0.02E-02	0.02E-02	0.06
Sweden	6.85E-03	-1.06E-02	449 857	0.12	0.23E-02	0.21E-02	7.17
Finland	1.33E-03	-1.45E-02	337 050	0.20	0.29E-02	0.27E-02	6.41
Estonia	1.23E-03	-1.13E-02	45 285	0.48	0.08E-02	0.07E-02	1.22
Latvia	2.27E-03	-2.33E-02	65 115	0.98	0.25E-02	0.23E-02	2.40
Lithuania	2.14E-03	-2.34E-02	65 234	1.96	0.56E-02	0.52E-02	4.35
Poland	2.84E-03	-8.74E-02	315 623	5.40	15.19E-02	14.05E-02	30.09
Czech Republic	2.81E-03	-1.04E-01	79 686	5.39	5.21E-02	4.81E-02	7.90
Slovakia	5.06E-03	-1.88E-01	49 267	7.10	4.83E-02	4.47E-02	2.81
Spain	5.42E-04	-1.04E-01	507 174	2.99	17.31E-02	16.01E-02	34.24
Austria	4.79E-03	-2.18E-01	85 066	3.84	4.86E-02	4.50E-02	7.15
Hungary	5.36E-03	-1.71E-01	94 490	13.09	13.56E-02	12.54E-02	5.88
Romania	6.10E-03	-2.27E-01	243 099	10.62	36.05E-02	33.34E-02	17.77
Slovenia	6.14E-03	-2.35E-01	20 777	2.72	0.74E-02	0.68E-02	1.70
Croatia	4.74E-03	-1.64E-01	56 471	4.89	1.85E-02	1.71E-02	2.80
Bulgaria	6.38E-03	-3.73E-01	112 391	9.47	38.87E-02	35.95E-02	4.90
Greece	2.80E-03	-3.09E-01	136 016	5.30	12.80E-02	11.84E-02	8.57
Cyprus	3.41E-04	-8.05E-02	9 690	0.52	0.11E-02	0.10 E-02	0.62
France	3.30E-03	-2.96E-01	557 639	7.87	87.38E-02	80.82E-02	77.36
Ireland	1.31E-03	-7.03E-02	70 604	0.81	0.52E-02	0.48E-02	17.75
United Kingdom	1.04E-03	-5.42E-02	246 934	1.66	5.05E-02	4.67E-02	44.01
Belgium	4.38E-03	-1.58E-01	30 714	8.90	2.38E-02	2.20E-02	10.14
Netherlands	3.04E-03	-7.03E-02	37 571	5.08	1.97E-02	1.82E-02	18.17
Luxembourg	2.81E-03	-1.08E-01	2 721	3.77	0.04E-02	0.04E-02	0.66
Germany	2.81E-03	-1.47E-01	362 390	6.20	35.14E-02	32.5E-02	64.54
Denmark	1.22E-03	-4.49E-02	43 696	3.97	1.33E-02	1.23E-02	10.33
Europe (EU-28)	2.48E-03	-1.49E-01	4 422 217	4.49	3.16	2.92	426.28

To go further in our study, we tested a second scenario, still based upon a 3-month cover crop development, but accounting for limitations due to the water requirements of cover crops (see section III-4.3.2.6 and Figure III-7(c)). By doing this, we estimated that, for EU-28, the water requirements for the emergence of cover crops could decrease the albedo effect by 28% in the case of no irrigation. The resulting cumulative RF_{CO_2} over EU-28 was 2.27 (2.10) $MtCO_2\text{-eq.year}^{-1}$.

Finally, in the third scenario, we calculated the greatest impact of extending the cover crop for a period longer than 3 months, *i.e.* up to a maximum of 6 months, depending on the duration of the fallow period for each pixel (for that, no water limitation was taken into account). The cumulative RF_{CO_2} over EU-28 was 4.31 (3.99) $MtCO_2\text{-eq.year}^{-1}$. With this extension of the cover crop life, we estimated that a compensation level of up to 1.01 (0.93)% of the agricultural GHG emissions could be obtained for the EU-28.

4.5. Discussion and conclusion

Potential level of climate mitigation. By using MODIS satellite data and the approach developed by Carrer et al., (2014), we were able to identify areas where the soil is dark enough (low albedo value) to make the introduction of a cover crop profitable. We examined the most likely scenario by introducing cover crops in crop rotations (between the winter and summer crops). We estimated that cover crops could potentially be introduced for 3 months over 4.17% of the surface area of the EU-28. That would represent 22% of the European cultivated surface area. This value at the European spatial scale is quite consistent with the estimate of Poeplau and Don, (2015). They estimated that 25% of the global cropland areas (16 million km²; Siebert et al., 2010) could potentially be cover cropped.

In Europe, we show that the mean average increase in the surface albedo over these cultivated areas and the associated $RF_{\Delta\alpha}$ of these cover crops are 0.0025 and -0.149 W.m^{-2} , respectively, for the 3-month scenario. If we convert this $RF_{\Delta\alpha}$ into CO₂-eq, it corresponds to a mitigation potential of $3.16 \text{ MtCO}_2\text{-eq.year}^{-1}$, assuming that the cover-crop practice is maintained for a period of 100 years ($2.92 \text{ MtCO}_2\text{-eq.year}^{-1}$, according to the GWP method). Based on our current knowledge, the estimated uncertainty due to the CO₂ equivalent conversion methodology is approximately 8%. However, it should be remembered that long analysis times, such as that of the current study, deemphasize the $RF_{\Delta\alpha}$ expressed in CO₂ equivalent (Anderson-Teixeira et al., 2012). Nevertheless, this mitigation potential would represent, every year for a 100-year period, 0.74% of the EU-28 agricultural GHG emissions in 2011, which is equal to $426.28 \text{ MtCO}_2\text{-eq}$. In other words, the introduction of cover crops for 100 years would compensate for 74% of the human-induced GHG agricultural emissions of one year (based on 2011). France, Bulgaria, Romania, and Germany appear to be the four countries with the greatest potential. We show that Bulgaria and Romania have chernozem soil with very low surface albedo in the winter (Figure III-6). This explains why those two countries are among the countries with the greatest mitigation potentials. The mitigation potential is also probably important for neighbouring countries outside Europe that also have chernozem soil (Moldavia, Ukraine, and Russia, in which the percentage of land used for agriculture is very high).

This mitigation potential of $3.16 \text{ MtCO}_2\text{-eq. year}^{-1}$ is equivalent to a mitigation potential per unit (m²) of an introduced cover crop over Europe of $15.91 \text{ gCO}_2\text{.year}^{-1}\text{.m}^{-2}$. We show that this mitigation potential could be increased by 27% if the cover crop is extended for periods longer than 3 months. This magnitude order is consistent with the recent estimations of the albedo effect delivered by Kaye and Quemada, (2017). They showed, using case study sites in central Spain and Pennsylvania (USA), that the surface albedo change due to cover cropping may mitigate $12\text{--}46 \text{ gCO}_2\text{.year}^{-1}\text{.m}^{-2}$ over a 100-year time horizon (impact per m² of cover crop). Additionally, they estimated that the increase in soil carbon sequestration rates and the decrease in fertilizer due to the adoption of the cover crop practice should mitigate greenhouse gas-based climate change by $\sim 116 \text{ gCO}_2\text{.year}^{-1}\text{.m}^{-2}$ for non-legumes and by $\sim 135 \text{ gCO}_2\text{.year}^{-1}\text{.m}^{-2}$ for legumes. This result is consistent with the value of $110 \text{ gCO}_2\text{.year}^{-1}\text{.m}^{-2}$ (per surface unit of cover crop) of the soil C storage effect found by Poeplau and Don, (2015). Considering the net biogeochemical effects of cover crops found in Kaye and Quemada, (2017) and adding the albedo effect found in this study, the total cover crop mitigation effect would be close to $\sim 150 \text{ gCO}_2\text{.year}^{-1}\text{.m}^{-2}$, which would result into a cumulative value over Europe of $29.79 \text{ MtCO}_2\text{-eq.year}^{-1}$ (considering that cover crops could be introduced to 4.17% of the EU-28, as explained below). As the GHG agricultural emissions in 2011 were equal to $426.28 \text{ MtCO}_2\text{-eq.}$, we believe that the introduction of cover crops over Europe may mitigate up to 7% of the human-induced GHG agricultural emissions per year, considering 2011 as the reference year; the impact of the albedo change per year would be between 10% and 13% of this total impact.

Advantages and limitations of cover crop adoption. Little is known about the impact of the introduction of cover crops at a large scale on the climate, even if this practice tends to be imposed on farmers by European legislation for its nitrogen capture effect. Hence, it is unclear if these changes will generate climate feedback (such as changes in cloudiness resulting from other biogeophysical impacts such as disturbance of roughness or evapotranspiration). According to Ceschia et al., (2017), the albedo cooling effect of cover crops could be doubled when considering their effect on long-wave radiation. Indeed, in a field scale comparative experiment (cover crop vs bare soil), they showed that the dynamic and intensity of the longwave effect was very similar to the albedo-induced cooling effect. Additionally, they found that the radiative cooling effects would be reinforced by a decrease/increase in the sensible/latent heat fluxes at the surface. In another study, Tribouillois et al., (2018), showed that, compared to bare soil, cover crops increased evapotranspiration (*i.e.* latent heat fluxes) without limiting the water resources for the next crop, if the cover crop were buried one month before seeding.

Additionally, reducing the area of bare soils by sowing cover crops provides a number of additional ecosystem services (*e.g.* reductions in soil erosion and nitrogen leaching and increases in biodiversity and soil fertility (Justes et al., 2012)) and probably has an impact on the proliferation of weeds, pests or pathogens. Furthermore, benefits in terms of reducing the use of fertilizers (and associated emissions) should be considered when the cover crops are leguminous. Some disadvantages and limitations to such practices also exist. Although the long fallow period may allow the timing of the cover crop introduction to be adjusted, we showed that the water requirements for the emergence of cover crops could decrease the albedo effect by 28% without irrigation. Furthermore, there is a short-term extra financial cost to farmers associated with cover crop cultivation, as well as small additional GHG emissions caused by seeding and destroying the cover crops (however, these emissions are small compared to the C storage benefits) (Ceschia et al., 2010a). All these feedbacks mechanisms must be carefully evaluated in the upcoming by using climate, economic, and ecological coupled models. From our perspective, a financial compensation for this climate change mitigation service should be encouraged (*e.g.* via a carbon market). In addition, the cultivation of crops with high water needs should be avoided if it is found that the effect of an additional cover crop would exceed an optimal limit, which still needs to be defined in accordance with equivalent economic criteria. In future work, feedback mechanisms should be analysed to refine the benefits proposed in this study.

Following the COP21. Evidence currently exists that the global warming issue needs to be resolved using attenuation measures and that limitations on GHG emissions are no longer sufficient. Following the COP21 meeting in 2015, the target is to limit global warming below a threshold of 1.5 °C. This new directive, which replaces the previous threshold of 2 °C, has great consequences, as it cannot be achieved even if we were to immediately stop all GHG emissions. Consequently, the resulting outcome of the COP21 is that policymakers will likely need to use geoengineering services for climate mitigation. Using satellite data, this study is in line with other recent studies that estimated the potential mitigation effect of cover cropping. The overall potential of mitigation (resulting from the change in albedo, carbon sequestration, and the change in fertilizer use) could be an appropriate solution (or contribution) that should be encouraged through agricultural policies in the future. As a matter of fact, the introduction of cover crops is in line with the on-going reform of the EU's Common Agricultural Policy, which aims to foster a greening of agricultural surfaces to fight against climate change and for ecological matters. In the upcoming years, the approach presented in this article may, therefore, be weighed against other geoengineering strategies, such as sulfate injections into the atmosphere, according to scientific and ethical criteria.

♠ Ma contribution

J'ai participé à la mise en place de l'étude, à l'établissement et à l'analyse des résultats. Dominique Carrer a réalisé la majeure partie du travail de rédaction auquel j'ai aussi contribué. J'ai également activement participé à répondre aux relecteurs, et à modifier l'étude en fonction des critiques. J'ai notamment échangé avec le chercheur Norvégien Ryan Bright, spécialiste des méthodes permettant de convertir les forçages radiatifs en équivalent CO₂ qui posait problème lors de la première soumission. Suite à la publication de cet article, nous (avec Dominique Carrer et Eric Ceschia) avons eu la chance de pouvoir vulgariser ces recherches au cours d'une émission de radio de Campus FM (<https://www.mixcloud.com/CampusFM/20-mg-s2e25-attenuation-climatique-par-les-cultures-intermediaires/>). Ces résultats ont aussi été présentés lors du Workshop Albedo and Climate Mitigation qui a eu lieu en Décembre 2020.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ L'utilisation de cultures intermédiaires a été identifiée comme méthode d'atténuation du réchauffement climatique grâce au pouvoir réfléchissant de ces dernières qui a été quantifié à l'échelle de l'Europe dans cette étude.
- ♣ Cette pratique, qui pourrait être mise place sur 4.17% de la surface Européenne, permettrait d'augmenter l'albédo des surfaces agricoles de 0.0025, ce qui entraînerait un forçage radiatif négatif équivalent à 0.149 W.m⁻².
- ♣ Une fois converti en équivalent CO₂, ce forçage vaut 3.16 MtCO₂-eq.an⁻¹.
- ♣ En ajoutant à l'effet albédo les autres effets biogéochimiques liés à l'utilisation de cultures intermédiaires (stockage de carbone et réduction d'engrais), cette pratique pourrait compenser jusqu'à 7% des émissions du secteur agricole à l'échelle Européenne.

5. Conclusions de l'article en français

Potentiel d'atténuation des cultures intermédiaires. En utilisant des données satellites MODIS et l'approche développée par Carrer et al., (2014), nous avons été capable d'identifier les zones où le sol est suffisamment sombre (valeur d'albédo faible) pour rendre l'introduction de cultures intermédiaires bénéfique d'un point de vue effet albédo. Nous avons analysé le scénario d'introduction le plus probable, en introduisant des CI entre une culture d'hiver et une culture d'été. Nous avons estimé que les CI pourraient être introduites pendant 3 mois sur 4.17% de la surface totale de l'UE-28. Cela représenterait 22% de la surface cultivée Européenne. Cette valeur à l'échelle Européenne est cohérente avec l'estimation de Poeplau and Don, (2015). Ils ont estimé que 25% des surfaces cultivées mondiales (16 million km²; Siebert et al., 2010) pourraient potentiellement accueillir des CI.

En Europe, nous avons montré que l'augmentation moyenne de l'albédo de surface sur ces zones cultivées ainsi que le RF_{Δα} associés aux CI sont respectivement de 0.0025 et -0.149 W.m⁻², pour le scénario d'introduction de 3 mois. Si l'on converti ce RF_{Δα} en CO₂-eq, cela correspond à un potentiel d'atténuation de 3.16 MtCO₂-eq.an⁻¹, en supposant que les CI sont maintenus pendant une période de 100 ans (2.92 MtCO₂-eq.an⁻¹, selon la méthode GWP). Sur la base de nos connaissances actuelles,

l'incertitude due à la méthode de conversion en équivalent CO_2 est estimée à approximativement 8%. Toutefois, il convient de rappeler que les longues périodes d'analyse, comme celle présentée dans cette étude, tendent à minimiser le $\text{RF}_{\Delta\alpha}$ exprimé en équivalent CO_2 (Anderson-Teixeira et al., 2012). Néanmoins, ce potentiel d'atténuation représenterait, chaque année et sur une période de 100 ans, 0.74% des émissions de GES du secteur agricole de l'UE-28 (en prenant comme référence les émissions de l'année 2011), ce qui équivaut à 426.28 $\text{MtCO}_2\text{-}\text{eq.}$ En d'autres termes, l'introduction de cultures intermédiaires pendant une période de 100 ans pourrait compenser 74% des émissions anthropiques de GES du secteur agricole de l'année 2011. La France, la Bulgarie, la Roumanie et l'Allemagne apparaissent comme les 4 pays ayant les plus forts potentiels d'atténuation via cet effet. La Bulgarie et la Roumanie ayant des sols de type chernozem caractérisés par des albédos très faibles en hiver (Fig. III-6), cela explique pourquoi ces deux pays sont parmi ceux qui ont le plus fort potentiel d'atténuation via l'effet albédo des CI. Ce potentiel d'atténuation est aussi probablement important pour les pays voisins extérieurs à l'UE-28 qui possèdent aussi des sols de type chernozem (Moldavie, Ukraine et Russie, où le pourcentage de surfaces utilisées pour l'agriculture est très important).

Ce potentiel d'atténuation de 3.16 $\text{MtCO}_2\text{-}\text{eq.}\cdot\text{an}^{-1}$ est équivalent à un potentiel d'atténuation par unité de surface (m^2) de culture intermédiaire introduite en Europe de 15.91 $\text{gCO}_2\text{-}\text{eq.}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Nous montrons que ce potentiel d'atténuation pourrait être augmenté de 27%, si les CI sont introduites sur une période de 6 mois. Cet ordre de grandeur est cohérent avec les estimations récentes de l'effet albédo fourni par Kaye and Quemada, (2017). Ils ont montré, à partir de mesures réalisées sur des sites d'études situés dans le centre de l'Espagne et en Pennsylvanie (USA), que l'effet albédo de surface liée à l'introduction de CI pourrait représenter l'équivalent de 12-46 $\text{gCO}_2\text{-}\text{eq.}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ sur un horizon de temps de 100 ans (impact exprimé par m^2 de CI). De plus, ils ont estimé que l'augmentation des taux de séquestration du carbone dans le sol et la diminution des engrais liées à la mise en place des cultures intermédiaires équivaldraient à une compensation d'émissions de GES de $\sim 116 \text{ gCO}_2\text{-}\text{eq.}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les légumineuses. Ce résultat est cohérent avec la valeur de 110 $\text{gCO}_2\text{-}\text{eq.}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ (par unité de surface de cultures intermédiaires) correspondant à l'effet stockage de C dans le sol des CI trouvé par Poeplau and Don, (2015). En considérant les effets biogéochimiques nets des CI trouvés par Kaye and Quemada, (2017) et en ajoutant l'effet albédo estimé dans cette étude, l'effet d'atténuation total des CI serait proche de $\sim 150 \text{ gCO}_2\text{-}\text{eq.}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, ce qui résulterait en une valeur cumulée de 29.79 $\text{MtCO}_2\text{-}\text{eq.}\cdot\text{an}^{-1}$ (en considérant que les CI pourraient être introduites sur 4.17% de la surface Européenne, comme expliqué ci-dessus). Comme les émissions de GES du secteur agricole en 2011 étaient de 426.28 $\text{MtCO}_2\text{-}\text{eq.}$, nous pensons que l'introduction de cultures intermédiaires à l'échelle Européenne pourrait atténuer jusqu'à 7% des émissions anthropiques de GES du secteur agricole par an, en considérant l'année 2011 comme année de référence ; l'impact annuel de la modification d'albédo serait compris entre 10% et 13% de l'impact total à court terme.

Avantages et limites liées à l'adoption des cultures intermédiaires. Peu de choses sont encore connues concernant l'impact sur le climat que pourrait avoir l'introduction de CI à grande échelle, même si cette pratique a été imposée aux agriculteurs Européens par le biais de la directive nitrates. Nous ne savons donc pas si ce changement de pratique entraînera ou non des effets de rétroactions climatiques (comme par exemple des changements de nébulosité ou des modifications du régime des pluies) pouvant accentuer ou réduire l'effet d'atténuation des CI. Aussi, selon Ceschia et al., (2017), l'effet refroidissant de l'albédo des cultures intermédiaires pourrait être doublé en considérant leur effet sur le rayonnement grande longueur d'onde. En effet, dans une expérience comparative à l'échelle parcellaire (culture intermédiaire vs. sol nu), ils ont montré que la dynamique et l'intensité de l'effet grande longueur d'onde était très similaire à l'effet refroidissant induit par l'albédo. De plus, ils ont constaté que les effets radiatifs refroidissants seraient renforcés par une diminution/augmentation des flux de chaleur

sensible/latente en surface. Dans une autre étude, Tribouillois et al., (2018) ont montré que, en comparaison au sol nu, les cultures intermédiaires augmentaient l'évapotranspiration (*i.e.* flux de chaleur latente) sans limitation de la ressource en eau pour la culture suivante, si la CI était enfouie dans le sol un mois avant le semis.

Il est d'ailleurs capital de s'intéresser aux autres services (et disservices) écosystémiques engendrés par les CI. Ces services et disservices ont été analysés dans le cadre d'une expertise nationale INRA menée par Justes et al., (2012). Cette étude a démontré que les CI contribuaient à réduire l'érosion des sols et la lixiviation des reliquats azotés, à augmenter la biodiversité et de la fertilité des sols et qu'ils pouvaient avoir un effet bénéfique sur la prolifération d'adventices, de parasites ou de maladies. En outre, les bénéfices en termes de réduction d'engrais (et d'émissions associées) devraient être considérés quand les cultures intermédiaires sont des légumineuses. Il existe néanmoins certains inconvénients et limites à cette pratique. Bien que la longue période de sol nu puisse permettre d'ajuster la période d'introduction des cultures intermédiaires, nous avons montré que les besoins en eau pour l'émergence des couverts pourraient diminuer l'effet albédo de 28% sans irrigation. De plus, la mise en place de cultures intermédiaires entraîne un coût financier à court terme pour les agriculteurs, ainsi qu'une légère augmentation des émissions de GES liée au semis et à la destruction des couverts (ces émissions sont toutefois très faibles par rapport aux bénéfices liés au stockage de carbone (Ceschia et al., 2010a)). Enfin, la destruction chimique des CI avant enfouissement dans le sol risque de polluer les sols, les nappes souterraines et les cours d'eau.

Tous ces processus biogéophysiques, effets de rétroactions, services et disservices écosystémiques, devront à l'avenir être évalués attentivement en utilisant des modèles couplés surface, climat, économiques et écologiques. D'après nous, une compensation financière pour ce service d'atténuation du changement climatique devrait être encouragée (*e.g.* via le marché du carbone qui se met en place en agriculture).

Suivant la COP21. Il existe aujourd'hui des preuves que le problème du réchauffement climatique doit être résolu en utilisant des mesures d'atténuation (ex. stockage de C dans les sols) et que la limitation des émissions de GES n'est plus suffisante. Suite à la tenue de la COP21 en 2015, l'objectif est de limiter le réchauffement global en dessous du seuil de 1.5°C. Cette nouvelle ambition, qui remplace la précédente fixée à 2°C, a d'importantes conséquences, puisqu'elle ne peut pas être atteinte même si nous stoppons toutes émissions de GES. Par conséquent, le résultat final de la COP21 est que les décideurs politiques devront probablement avoir recours à la géoingénierie pour atténuer le réchauffement. Cette étude, qui utilise des données satellites, s'inscrit dans la lignée d'autres études récentes qui ont estimé l'effet potentiel d'atténuation des cultures intermédiaires. Le potentiel d'atténuation global (lié à la modification d'albédo de surface, au stockage de carbone, à la modification des flux d'énergie en surface et à la réduction de l'utilisation des engrais) pourrait être une solution (ou contribution) appropriée qui devrait être encouragée à l'avenir via les politiques agricoles. En effet, l'introduction de cultures intermédiaires est en accord avec les réformes actuelles de la politique agricole commune de l'UE, qui vise à encourager le verdissement des surfaces agricoles pour lutter contre le changement climatique et pour des questions écologiques. Dans les prochaines années, l'approche proposée dans cet article pourra donc être comparée à d'autres stratégies de géoingénierie, comme l'injection d'aérosols sulfatés dans l'atmosphère, au regard de critères scientifiques et éthiques.

6. Conclusion

Dans ce chapitre consacré à l'estimation de l'augmentation d'albédo induit par la mise en place de CI, le modèle RFCC a été présenté. C'est un modèle d'introduction de CI permettant de calculer le forçage radiatif lié à la modification d'albédo de surface qu'ils induisent, et qui utilise comme entrée les données d'albédo issues des travaux de Carrer et al., (2014). Ces données fournissent, tous les 8 jours et à une résolution spatiale de $1/20^\circ$, un albédo de sol nu ainsi qu'un albédo et un indice de végétation pour, au maximum, 11 autres classes d'occupation du sol dont les cultures C3 et C4. À partir de ces données, de la base de données ECOCLIMAP, des données météorologiques ERA-Interim et de données statistiques, 2 scénarii d'introduction de CI ont été simulés. Le premier scénario a consisté à introduire des CI sur les rotations culture d'hiver/culture d'été pour une durée maximale de 3 mois. Il a été montré que, selon ce scénario, les cultures intermédiaires pouvaient être introduites sur 4.17% de la surface Européenne (soit 22% des surfaces cultivées), ce qui entraînerait une augmentation d'albédo des surfaces avec CI de 0.0025, induisant un forçage radiatif de -0.149 W.m^{-2} . Ce forçage a ensuite été converti en équivalent CO_2 , et il a été montré que si cette pratique était maintenue pendant une période de 100 ans, elle induirait un potentiel d'atténuation équivalent à $3.16 \text{ MtCO}_2\text{-eq.an}^{-1}$. D'après ces premières estimations, le pouvoir d'atténuation des CI pourrait augmenter de 27%, si la durée d'introduction des CI était allongée à 6 mois. En effet, la durée moyenne de l'interculture en Europe est de 5.96 mois, et elle varie généralement entre 5 et 9 mois.

Le modèle RFCC est opérationnel et il permet de quantifier l'effet albédo des CI, il peut donc être adapté pour simuler d'autre scénarii d'introduction. L'autre modèle développé pendant ces travaux de thèse permet également de simuler l'introduction de CI et de quantifier leur impact sur les flux/bilans de C et d'eau. Le chapitre suivant propose donc une application conjointe de ces deux approches permettant une analyse couplée des effets biogéochimiques et biogéophysiques liés à l'introduction de CI à une échelle régionale.

Chapitre IV

Chapitre IV : Impacts de l'occupation du sol pendant l'interculture sur les flux de CO₂, d'eau et sur l'albédo

1. Introduction

Comme exposé dans l'introduction générale, la modélisation agronomique peine aujourd'hui à fournir des estimations précises du bilan de carbone des surfaces agricoles à l'échelle de la parcelle et sur de grands territoires. Par ailleurs, peu d'études scientifiques ont mené des analyses couplées des effets biogéochimiques et biogéophysiques, liés aux changements de pratiques de gestion (Ceschia et al., 2017; Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a). Il est pourtant nécessaire de réaliser ces analyses couplées afin de mieux quantifier l'impact climatique de ces changements. En effet, que l'on s'intéresse aux sols agricoles ou à n'importe quelle autre surface terrestre, toute modification du système va avoir une incidence directe et/ou indirecte sur les flux de surfaces ainsi que sur le bilan d'énergie (Betts, 2000; Chang et al, 2021; Luyssaert et al., 2014; Rotenberg and Yakir, 2010).

Des outils de modélisation ont donc été développés dans le cadre de cette thèse afin d'être en capacité à répondre à ces problématiques. Grâce à ces outils, il est dorénavant possible d'obtenir des indicateurs biogéochimiques (flux de CO₂, bilan de C) et biogéophysiques (effets albedo, flux de chaleur latente) liés à la mise en place de CI, même si pour l'instant il n'existe qu'une paramétrisation générique pour tous les événements végétatifs d'interculture (EVI, *i.e.* adventices, repousses de la culture précédente ou CI) dans SAFY-CO₂. Il est proposé dans ce chapitre une analyse de l'impact lié à l'introduction de CI durant les phases d'intercultures sur les flux de CO₂, puis sur les flux de chaleur latente et l'albédo de surface.

Dans un premier temps, le modèle SAFY-CO₂ a été modifié pour pouvoir être appliqué sur des rotations blé/tournesol sur une zone située dans le sud-ouest de la France. Parmi les parcelles simulées, certaines présentaient des développements estivaux de végétation durant l'interculture (EVI estivaux) qui ont été simulés afin de quantifier leur impact sur les flux de CO₂. Ces résultats constituent la première partie de ce chapitre et le travail préliminaire à l'analyse des effets couplés. Par la suite, des simulations de plusieurs scénarii d'introduction de CI d'hiver ont été réalisés sur deux rotations, blé/tournesol et tournesol/tournesol, afin d'analyser l'impact des CI d'hiver sur les flux de CO₂/eau, les bilans de C et les effets albedo. Nous considérerons ici que la végétation observée pendant les phases d'interculture d'hiver s'apparente à une CI, plus ou moins bien développée. L'objectif est d'analyser les effets d'atténuations de cette pratique qui tend à se généraliser sur la zone d'étude depuis la mise en œuvre de la directive nitrates (principalement depuis 2015). La zone sur laquelle les deux modèles (SAFY-CO₂ et RFCC) ont été appliqués a été choisie en fonction de certaines contraintes (résolution des modèles, disponibilité en images satellites, etc.). Les scénarii d'introduction ont été définis et paramétrés dans les modèles de manière à rendre les deux approches cohérentes. Les variables d'intérêts simulées par les modèles ont ensuite été analysées de façon individuelle, puis de manière couplée afin de rendre compte de l'impact climatique induit par l'introduction de CI. Les résultats constituant la première partie du chapitre (interculture d'été) ont été obtenus avec SAFY-CO₂, puisqu'il a été démontré que la précision des produits sols nécessaires à l'estimation du contenu en eau du sol n'était pas suffisante pour

correctement estimer les flux d'eau. Néanmoins, la seconde partie du chapitre a mobilisé SAFYE-CO₂. L'objectif de cette partie étant de caractériser la période d'interculture hivernale via la simulation de plusieurs scénarii de CI et le contenu en eau du sol n'étant pas limitant sur cette période, l'analyse des différences entre scénarii reflète le comportement des parcelles simulées au cours de cette période.

2. Impact des évènements végétatifs d'interculture estivale sur les flux de CO₂

Dans cette section sont présentés les résultats de simulation d'une rotation blé/tournesol (cultures de rente et EVI) réalisés à l'aide de SAFY-CO₂, afin d'analyser l'effet sur les flux de CO₂, de la végétation pouvant se développer en été sur les parcelles pendant l'interculture. La zone d'étude ainsi que la méthodologie sont brièvement introduites, puis les résultats sont présentés et discutés.

2.1. Zone d'étude et méthodologie

La Figure IV-1 décrit la situation géographique de la zone d'étude choisie pour l'application du modèle, ainsi que l'emplacement de toutes les parcelles concernées par une rotation blé/tournesol en 2014 et 2015. Seules les plus grandes parcelles, avec une superficie supérieure à 5 ha, ont été conservées dans un souci de temps de calcul. La rotation blé/tournesol, simulée sur la parcelle instrumentée d'Auradé, concerne l'année culturale 2006-2007. L'application de l'approche sur une centaine de parcelles concerne les années 2014-2015. La Figure IV-2 présente la chronologie des images satellites utilisées pour calibrer SAFY-CO₂. Les images proviennent des capteurs FORMOSAT-2, SPOT et LANDSAT-8.

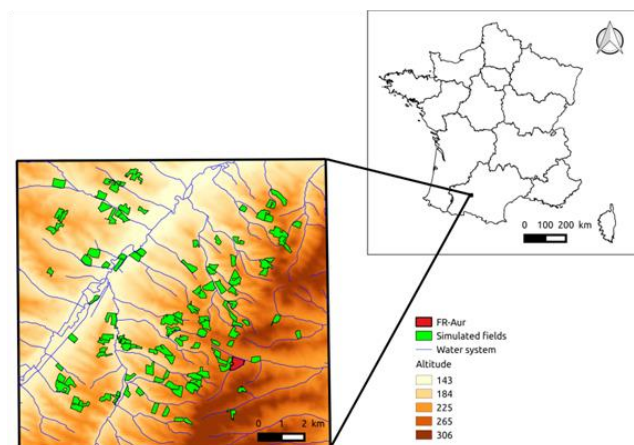


Figure IV-1 : Localisation de la parcelle flux d'Auradé et des 111 parcelles (> 5 ha) concernées par une rotation blé/tournesol en 2014-2015 et simulées avec SAFY-CO₂. Le relief (altitude en m) est affiché en arrière-plan (source : SRTM).

Parmi les parcelles d'intérêts, celles présentant au moins une valeur de GAI satellite supérieure à 0.5 m².m⁻² suivant la culture de blé ont été identifiées comme parcelles concernées par des EVI. Ces parcelles sont au nombre de 24. Elles ont été simulées avec et sans prise en compte des évènements d'EVI, pour analyser l'impact des phénomènes végétatifs sur les flux de CO₂. Rappelons qu'aucune différence n'est faite sur la nature des EVI, et qu'une paramétrisation unique est utilisée pour simuler tous les EVI (CI, adventices, repousses de la culture précédente ou mélange de ces modalités au sein d'une même parcelle).

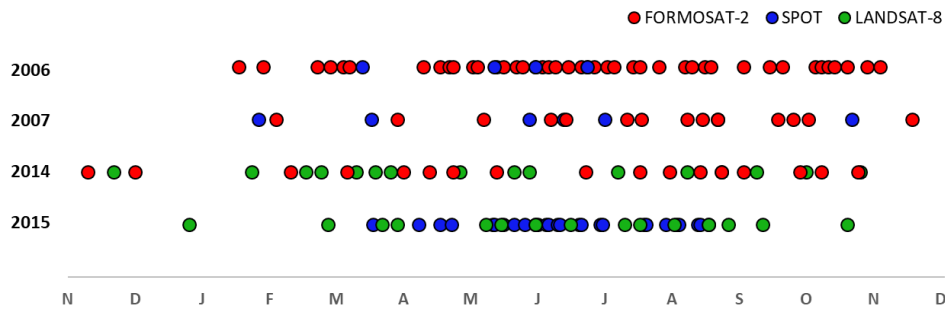


Figure IV-2 : Frise chronologique des images satellites utilisées pour simuler la rotation blé-tournesol avec SAFY-CO₂. Sur la parcelle d'Auradé en 2006-2007 et sur les 111 parcelles de la zone d'étude en 2014-2015. Les couleurs des points correspondent aux satellites d'observation utilisés (voir légende).

2.2. Analyse des résultats

2.2.1. Flux de CO₂ sur la rotation blé/tournesol

La Figure IV-3 présente l'évolution temporelle du flux net de CO₂ (NEE) ainsi que de ses composantes (GPP et R_{ECO}) simulés à l'aide de SAFY-CO₂, qui sont comparés aux observations réalisées en 2006-2007 sur la parcelle d'Auradé. Le Tableau IV-1 résume les performances statistiques du modèle dans l'estimation des trois variables d'intérêts, pour les différentes fenêtres temporelles correspondantes aux différentes occupations du sol (identifiables par les couleurs sur la Fig. IV-3). Comme la GPP n'est pas simulée pendant les périodes de sol nu, il n'y a pas de statistiques pour cette variable durant cette période.

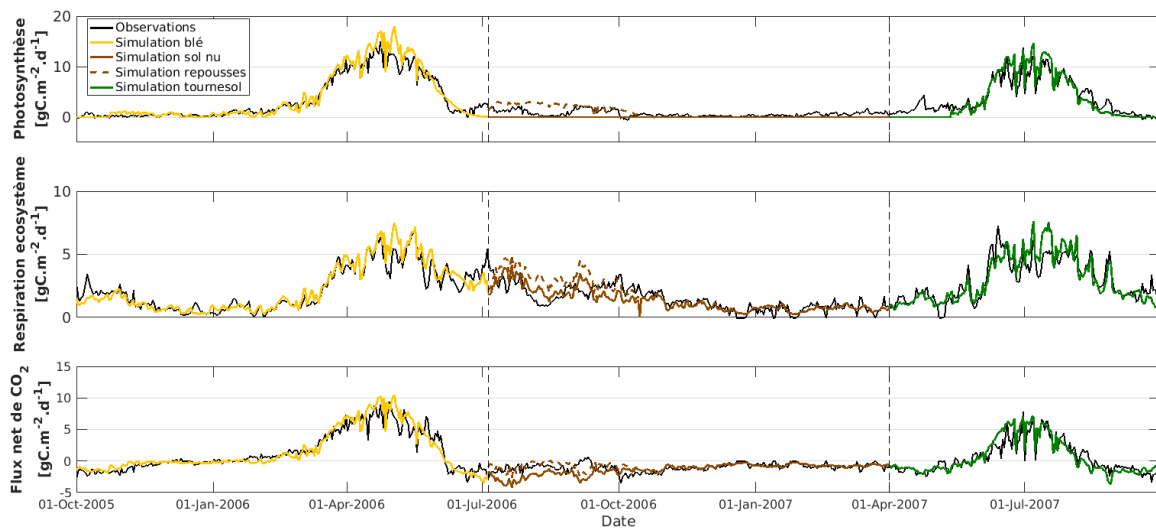


Figure IV-3 : Evolutions temporelles de la photosynthèse, de la respiration de l'écosystème et du flux net de CO₂. Les simulations correspondant à la culture de blé, au sol nu, aux repousses et au tournesol sont respectivement représentées par les courbes jaune, marron, marron pointillée et vert. Les observations sont présentées en noir.

Tableau IV-1 : Résumé des performances de SAFY-CO₂ dans l'estimation de la GPP, de la R_{ECO} et de la NEE pour différentes périodes temporelles correspondantes aux différentes occupations du sol.

	Période	R ²	RMSE [gC.m ⁻² .j ⁻¹]	Biais moyen [gC.m ⁻² .j ⁻¹]
GPP	2 ans	0.93	1.49	0.28
	Culture de blé	0.94	1.48	0.38
	Repousses	0.03	1.46	1.15
	Culture de tournesol	0.92	1.50	0.09
R_{ECO}	2 ans	0.83	0.70	0.00
	Culture de blé	0.88	0.66	0.07
	Sol nu	0.54	0.65	-0.09
	Repousses	0.55	0.85	0.22
	Culture de tournesol	0.80	0.83	0.02
NEE	2 ans	0.86	1.06	-0.06
	Culture de blé	0.89	1.10	0.12
	Sol nu	0.04	1.01	-0.33
	Repousses	0.04	0.74	0.17
	Culture de tournesol	0.86	1.06	0.06

Le modèle est capable de reproduire correctement les évolutions temporelles des trois variables ciblées. Sur toute la période de simulation (*i.e.* 2 ans), le modèle montre de très bonnes corrélations avec les observations (R^2 de 0.93, 0.83 et 0.86 pour la GPP, la R_{ECO} et la NEE respectivement) et de faibles erreurs (RMSE de 1.49, 0.70 et 1.06 gC.m⁻².j⁻¹ pour la GPP, la R_{ECO} et la NEE, respectivement). Concernant la période d'interculture, aucune corrélation significative n'a été obtenue pour les trois variables, même si les simulations sont très proches des observations (voir Tableau IV-1). La R_{ECO} présente tout de même une corrélation de 0.55 pour cette période, mais elle est largement influencée par la période d'interculture post-repousses, où seule la respiration hétérotrophe est simulée. La période d'interculture qui nous intéresse a été caractérisée par des repousses de blé, ainsi que par des adventices (observations terrain) qui se sont développées en deux phases, et de façon très hétérogène sur la parcelle. Le modèle étant calibré avec un GAI moyen à la parcelle, l'hétérogénéité de développement de la végétation à l'échelle intra-parcellaire est 'lissée' dans le processus de calibration et par conséquent, les sorties du modèle le sont aussi (une simulation au pixel aurait sans doute permis de mieux reproduire cette hétérogénéité). À l'inverse, les mesures de CO₂ par la méthode des fluctuations turbulentes sont représentatives d'une zone à l'intérieur de la parcelle (caractérisée par un '*footprint*'), qui dépend notamment de la direction et de l'intensité du vent. Enfin, les observations satellites n'étaient pas suffisamment denses pour capter les 2 dynamiques distinctes de végétation (repousses et adventices). Dans ces conditions, il était particulièrement ambitieux de représenter précisément la dynamique des flux de CO₂ observée durant l'interculture, surtout pour de si faibles développements végétatifs. Néanmoins, si l'on s'intéresse à la NEE cumulée (qui permet ensuite d'estimer les bilans de C) estimée sur la période d'interculture, l'erreur relative est réduite de +33.6 % à -16.9 % une fois les phénomènes de repousses pris en compte, comme le montre la Figure IV-4. Sur la période délimitée par la zone verte qui correspond à la présence d'EVI, on remarque que la pente de la NEE cumulée simulée sans prise en compte des repousses est plus forte que celle associée aux observations, car seule la respiration hétérotrophe contribue au flux net de CO₂ simulé sur cette période. Une fois ces repousses ainsi que les flux de GPP et R_a associés pris en compte, la dynamique de la NEE est plus fidèle aux observations. Si l'on considère seulement la période concernée par les EVI (du 7 juillet au 16 octobre 2006) et plus particulièrement un focus sur la date de destruction, la différence entre la NEE cumulée observée et

simulée est de 87 % (soit 104.1 gC.m^{-2}) sans prise en compte des repousses, alors qu'elle est réduite à -27 % (soit -31.4 gC.m^{-2}) une fois les EVI considérés.

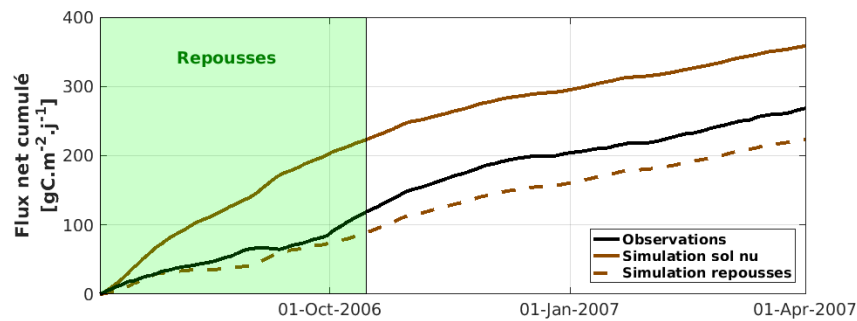


Figure IV-4 : Evolution temporelle du flux net de CO_2 cumulé pendant l'interculture 2006-2007 à Auradé. Les observations correspondent à la courbe noire. Les courbes correspondantes aux simulations sans et avec prise en compte des repousses sont respectivement en marron et marron pointillée.

2.2.2. Spatialisation de l'approche

La productivité nette de l'écosystème (NEP, équivalent à la NEE intégrée sur une période de 1 an) simulée sur les 111 parcelles en rotation blé/tournesol, sans prise en compte des EVI estivaux, est présentée sur la Figure IV-5 A. La NEP simulée sur cette rotation est comprise entre -186.4 et $298.1 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. La plupart des parcelles se comportent comme des puits de CO_2 . Néanmoins, 23% des parcelles cultivées avec cette rotation se comportent comme des sources de CO_2 . La NEP moyenne est de $-44.1 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, si l'on ne tient pas compte des EVI estivaux. Une fois ces dernières considérées, la NEP moyenne est alors de $-59 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. La faible différence entre les deux cas s'explique par le faible nombre de parcelles concernées par des EVI pendant la phase estivale de l'interculture. La Figure IV-5 B présente la différence de NEP entre les simulations avec et sans prise en compte des EVI estivaux. En considérant seulement les parcelles concernées par des EVI, la prise en compte de ces derniers augmente la quantité de carbone absorbée sous forme de CO_2 par l'écosystème de $-28 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ à $-139.5 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Fig. IV-5 B). De plus, la NEP moyenne de ces parcelles sans prise en compte des EVI est de $-16.1 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, alors qu'elle est estimée à $-85.2 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ une fois les EVI considérés. Enfin, parmi les 24 parcelles sur lesquelles des EVI ont été observés pendant l'interculture, 12 se comportaient comme des sources de CO_2 avant la prise en compte des EVI, alors qu'elles ne sont plus que 4 à rester des sources après leur prise en compte. Comme la période d'assimilation du CO_2 est plus longue lorsque de la végétation se développe pendant la période estivale d'interculture, la NEP est d'autant plus basse (plus négative ou moins positive) ce qui signifie que cela augmente le potentiel de puits de carbone des parcelles ou que cela diminue l'effet de sources de CO_2 .

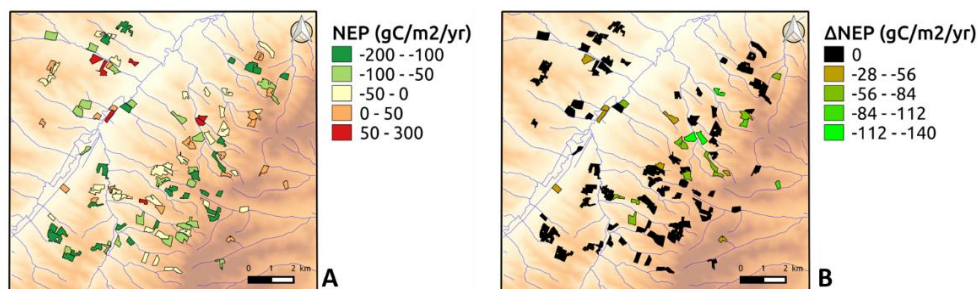


Figure IV-5 : Distribution spatiale de la productivité nette de l'écosystème (NEP) simulée sur 111 parcelles sans prise en compte des EVI (A) et différence avec la prise en compte des EVI (B)

2.3. Perspectives

Dans cet exercice le modèle SAFY-CO₂ a été modifié pour simuler des rotations de cultures. Pour l'instant, seules les paramétrisations pour le blé et le tournesol sont totalement validées dans le modèle (résultats présentés respectivement dans les sections I-4 et I-7). Les rotations entre ces deux cultures sont donc les seules pouvant être simulées à l'heure actuelle. Une paramétrisation générique a été appliquée à tous les EVI sans considération de leur nature (repousses de la culture précédente, adventices, cultures intermédiaires) permettant ainsi d'améliorer les estimations de NEE et par conséquent celles de NEP, ce qui est primordial pour estimer des bilans de C avec précision.

À notre connaissance, aucun autre modèle de culture ne considère les événements de repousses spontanées/adventices dans l'estimation de la NEP et donc leurs impacts sur les bilans de C (NECB). L'approche proposée est aussi la seule à prendre en compte le développement de ces EVI, tels qu'ils sont observés par satellite. Nous avons démontré ici que les EVI se développant pendant les périodes estivales pouvaient avoir un fort impact sur les flux de CO₂ et nécessitent donc d'être considérés lorsqu'on s'intéresse à la modélisation des bilans de C des rotations culturales. Les CI d'été, qui ont un plus fort potentiel de captation de CO₂ grâce à leur longue période d'introduction et à la sélection de variétés adaptées au climat estival (ex. sorgho fourrager ou mélanges de plusieurs espèces) pourront donc être simulées grâce à SAFY-CO₂.

Pour le moment, nous ne sommes pas en mesure de déterminer la nature des EVI. Il en découle une paramétrisation générique du modèle pour tous ces phénomènes. Toutefois, la nature de ces repousses pourrait être déterminée par télédétection dans un futur proche, ce qui permettrait de considérer avec plus de précision ces phénomènes. Par exemple, les satellites SAR (*'synthetic aperture radar'*) pourrait fournir des informations sur la nature de ces repousses grâce à la sensibilité du signal à la géométrie des couverts végétaux.

Enfin, la respiration du sol est simulée très simplement dans SAFY-CO₂, via une équation seulement dépendante de la température du sol. Il en découle une estimation peu précise de la NEE sur les périodes de sol nu, avec un niveau d'erreur qui pourrait s'avérer trop importante une fois le modèle appliqué à des périodes plus longues. Un modèle d'évolution de la matière organique dans le sol pourrait donc être couplé à SAFY-CO₂ afin de mieux estimer la respiration du sol, notamment suite à des apports de matière organique fraîche au sol issus des résidus de cultures, de repousses/adventices ou de CI d'été.

Le modèle SAFY-CO₂ étant dorénavant adapté pour quantifier l'impact des EVI sur les flux de CO₂, il est possible, moyennant l'estimation des rendements, de quantifier l'effet de ces EVI sur les bilans de C (en considérant que les pailles ne sont pas exportées et qu'aucun amendement organique n'est appliqué aux parcelles étudiées). En outre, le module de bilan hydrique de SAFY-CO₂ peut permettre de fournir des estimations des flux d'eau (sous certaines conditions comme discuté précédemment) et le modèle RFCC, des estimations de l'effet albédo, liées à l'introduction de CI. Il est donc proposé dans la section suivante une analyse de l'impact des CI sur ces différents indicateurs.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♠ Afin d'estimer les composantes des bilans de C pluriannuels, le modèle SAFY-CO₂ a été modifié afin de simuler des rotations de culture ainsi que les événements végétatifs pouvant se développer pendant la période d'interculture.
- ♠ Il est possible via cette approche de prendre en compte l'effet des phénomènes de repousses/adventices/CI sur le flux net de CO₂ et ainsi d'améliorer les estimations des bilans de C pluriannuels.
- ♠ Les événements végétatifs d'interculture (CI, repousses, adventices) sont pour le moment indifférenciés et sont donc simulés avec une même paramétrisation.
- ♠ L'application de SAFY-CO₂ à l'échelle du paysage va permettre une analyse précise du fonctionnement des parcelles agricoles en fonction de leur gestion (type de rotation, présence de CI, etc.).

3. Analyse des effets couplés

Cette section est dédiée à l'estimation des effets biogéochimiques et biogéophysiques liés à l'introduction de CI hivernales à une échelle régionale. La paramétrisation des EVI dans SAFYE-CO₂ ne faisant pas encore la différence entre les types de végétation pouvant se développer pendant l'interculture, on considèrera que la végétation simulée pendant cette période s'apparente à une CI (cas le plus fréquent dans notre zone d'étude). Aussi, les CI d'été étant encore marginales dans le sud-ouest de la France, nous nous sommes intéressés à l'introduction de CI hivernales, beaucoup plus répandues depuis la mise en œuvre de la directive nitrate.

Il a été décidé d'utiliser SAFYE-CO₂ pour estimer l'impact des différents scénarii d'implantation de CI sur les flux de chaleur latente, malgré les limites de l'approche, notamment vis-à-vis de l'estimation de l'ETR de manière spatialisée. Comme évoqué précédemment, ces limites sont liées 1) à la qualité des données sols (utilisées pour déterminer les valeurs de point de flétrissement, de capacité au champ et de profondeur), ainsi que 2) à la paramétrisation générique des CI qui manque de validation avec des données in situ. Les estimations, qui sont à considérer à titre indicatif, permettent néanmoins de définir des tendances quant à l'impact des CI sur les flux d'eau et la ressource en eau pour la culture suivante. Les données GSM ont été utilisées pour déterminer les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement, ainsi que la profondeur de sol des parcelles sélectionnées. Le modèle a été appliqué sans rétroaction du contenu en eau sur le développement de la végétation.

Une zone d'application des deux modèles (SAFYE-CO₂ et RFCC) a été définie, puis les sorties des modèles ont été analysées, séparément puis conjointement. Cette étude porte sur les années culturales 2008-2009 et 2009-2010. Les rotations de cultures considérées sont les suivantes : blé/tournesol (B/T) et tournesol/tournesol (T/T), le blé et le tournesol étant les deux seules cultures complètement validées dans SAFYE-CO₂. La rotation tournesol/blé n'est pas considérée ici puisque la durée d'interculture est trop courte pour permettre l'introduction de CI. Les rotations B/T et T/T appartiennent plus largement aux rotations de culture d'hiver/culture d'été (HIV/ETE) et monoculture d'été (ETE/ETE). Différents scénarii ont été simulés afin de quantifier l'effet des CI en fonction de leur durée d'implantation. En effet, les CI peuvent être introduites pendant une période courte à l'automne, pour être en conformité avec la directive nitrate (cas des CIPAN semées en fin d'été et détruits en décembre), ou sur une durée beaucoup plus longue, de l'automne au printemps (cas des CIMS), généralement dans une démarche volontaire d'amélioration et de préservation des sols par les agriculteurs. Dans le sud-ouest de la France, les agriculteurs détruisent généralement les CIPAN mi-décembre, pour respecter la directive tout en évitant de trop tasser le sol suite au passage des machines lorsque le sol est trop humide ce qui est le cas en hiver et au début du printemps.

3.1. Zone d'étude

La Figure IV-6 présente la zone d'étude qui a été choisie en fonction de plusieurs critères. Tout d'abord, le modèle SAFYE-CO₂ a été calibré et validé sur le sud-ouest de la France, dans la zone de l'OSR. Il apparaissait donc cohérent de choisir la zone d'étude au sein de ce territoire. De plus, la zone jouit d'un grand nombre d'images satellites qui permettent un processus de calibration efficace et précis de SAFYE-CO₂. La taille de la zone d'étude a été contrainte par les temps de calcul d'un tel exercice. Jusqu'ici, le processus d'optimisation de SAFYE-CO₂ est basé sur la méthode simplex qui est une méthode itérative permettant d'obtenir les meilleurs jeux de paramètres, mais qui a l'inconvénient d'être très chronophage. La zone a donc été limitée à une quinzaine de pixel de la maille d'application du modèle RFCC (Fig. IV-6), soit environ 336 km².

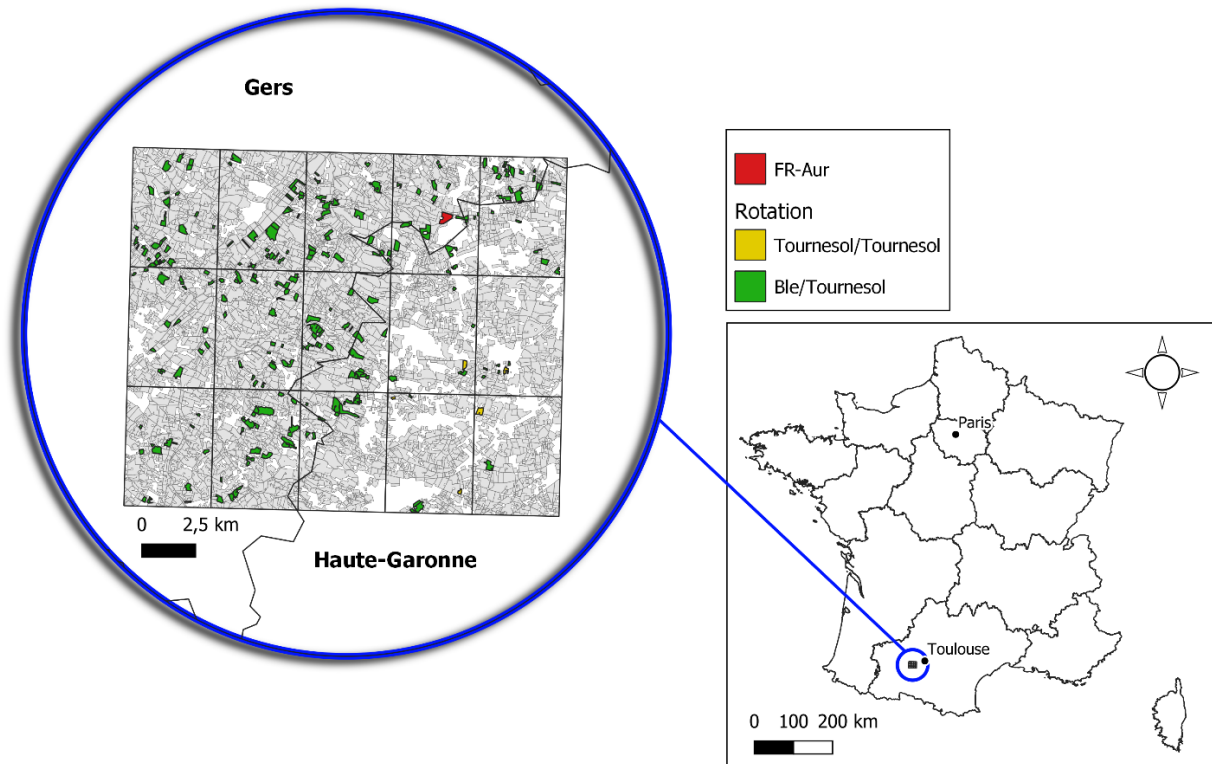


Figure IV-6 : Présentation de la zone d'application des modèles SAFYE-CO₂ et RFCC. Le parcellaire culturelle de la zone est présenté en fond (source RPG 2009).

3.2. Caractéristiques d'application des modèles

Afin d'identifier les parcelles en rotation B/T et T/T lors des années culturales 2008-2009 et 2009-2010, les registres parcellaires graphiques (RPG) de 2009 et 2010 ont été utilisés. Seuls les ilots purs (>95%) de blé (classe 1) et de tournesol (classe 6) ont été conservés. Les parcelles dont la surface était inférieure à 1 ha ont aussi été filtrées. Au total, 250 parcelles en rotation B/T, et 5 parcelles en rotations T/T ont été conservées. La monoculture de tournesol est une pratique très rare, elle concerne généralement les parcelles sur lesquelles le tournesol n'a pas levé ou a été détruit (maladies, sécheresse, etc.) l'année n , et sur laquelle l'agriculteur a de nouveau semé un tournesol l'année $n+1$.

Au final, le modèle SAFYE-CO₂ a été appliqué sur 255 parcelles en utilisant les paramétrisations de la culture de blé, du tournesol et des CI. Le modèle RFCC a été forcé avec les fractions de culture du RPG, correspondantes à ces 255 parcelles (voir section IV-3.2.3).

3.2.1. Détermination des scénarii d'introduction des CI et des dynamiques de végétation

Pour rendre compte de l'impact climatique des CI en fonction de leur modalité d'implantation (type CIPAN ou CIMS), plusieurs scénarii d'introduction de CI ont été établis. Deux scénarii d'introduction de CIMS ont été définis pour la rotation B/T, correspondants à une CIMS bien développée et à une CIMS peu développée. Ce dernier cas peut aussi s'apparenter 1) à des repousses de la culture précédente, 2) à une mauvaise implantation de la CI ou 3) à une CI qui aurait été atteinte par une maladie (ex. cas fréquent des féveroles atteintes d'anthracnose dans le sud-ouest). Un scénario

supplémentaire a été simulé pour la rotation B/T, il correspond au cas des CIPAN, caractérisés par une durée d'introduction plus courte.

Pour simuler l'introduction de CI avec le modèle SAFYE-CO₂, il a été décidé de fixer des dynamiques de végétation (GAI) moyennes propres à ces cas de figures, puis d'optimiser le modèle avec ces dynamiques moyennes. Afin de déterminer ces dynamiques de GAI, des données de NDVI ont été utilisées (GAI et NDVI étant dérivés des images satellites optiques).

Les données de NDVI correspondant aux intercultures 2016-2017 et 2017-2018 ont été extraites à partir de 3 tuiles Sentinel-2 (T31TCJ, T31TCH et T30TYP) à l'échelle spatiale du pixel, puis moyennées à la parcelle (travail réalisé par Aïnhua HERBLOT). Un algorithme de classification non supervisé, méthode K-means (Kodinariya and Makwana, 2013), a été utilisé afin de déterminer des classes de dynamiques de NDVI, correspondantes à l'interculture des parcelles en rotations HIV/ETE et ETE/ETE (sans distinction entre les différentes cultures d'hiver et les différentes culture d'été). La méthode K-means a été appliquée sur les séries temporelles d'images acquises durant la période du 1^{er} Décembre au 1^{er} Avril pour la rotation ETE/ETE, et du 20 Octobre au 30 Avril pour la rotation HIV/ETE.

Trois dynamiques de NDVI pour la rotation ETE/ETE ont été retenues via la méthode Elbow (Bholowalia et Kumar, 2014). Elles correspondent au cas sol nu, ainsi qu'aux cas CIMS bien et peu développées. En revanche, seulement deux dynamiques réalistes ont pu être identifiées grâce à cette méthode pour la rotation HIV/ETE, assimilées à la classe sol nu et à la présence de végétation. En effet, la méthode Elbow indique qu'un gain important est atteint lorsque l'on passe de 1 à 2 clusters, mais très peu de gain au-delà (Fig. IV-7). Les dynamiques végétation de l'interculture HIV/ETE (1 CIPAN et 2 CIMS) ont donc été déterminées en fixant des valeurs de NDVI seuils à certains instants et en appliquant une interpolation linéaire entre ces points. Les valeurs de NDVI seuil ont été fixées grâce aux observations terrains dans la zone d'étude.

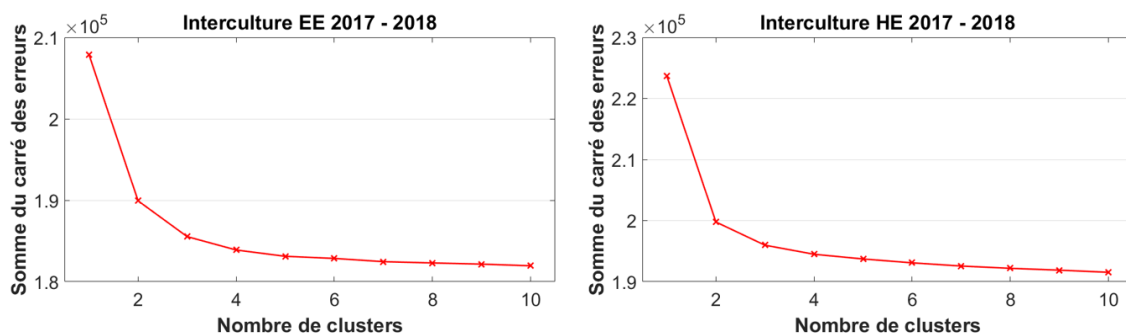


Figure IV-7 : Méthode Elbow appliquée aux profils de NDVI correspondant à l'interculture des parcelles en monoculture d'été (gauche) et en rotation culture d'hiver/culture d'été, obtenus sur 3 tuiles Sentinel ; T31TCJ, T31TCH et T30TYP.

Les dynamiques de NDVI ont ensuite été converties en dynamiques de GAI via l'équation IV-1 (Velo, 2014).

$$GAI = 0.16 \times \exp^{3.61 \times NDVI} \quad (IV-1)$$

Les profils de GAI correspondants aux différents scénarii d'introduction sont présentés sur la Figure IV-8. Ces dynamiques sont typiques de celles observées dans le sud-ouest de la France. Les CI bien développées correspondent souvent à des CI dont le semis a été soigné (*i.e.* graines enfouies à la bonne profondeur au moment du semis), dont les variétés ont été judicieusement choisies (*i.e.* variétés de féveroles insensibles à l'anthracnose) et qui peuvent même être des mélanges de plusieurs espèces

(celles étant le mieux adaptées aux conditions climatiques prenant le dessus sur les autres). À l'inverse, les CI mal développées sont souvent des CI semées à la volée, qui sont fréquemment touchées par la maladie ou qui correspondent à des années climatiques difficiles ne permettant pas un développement optimal des CI. Enfin les CIMS se distinguent des CIPAN par leur destruction beaucoup plus tardive.

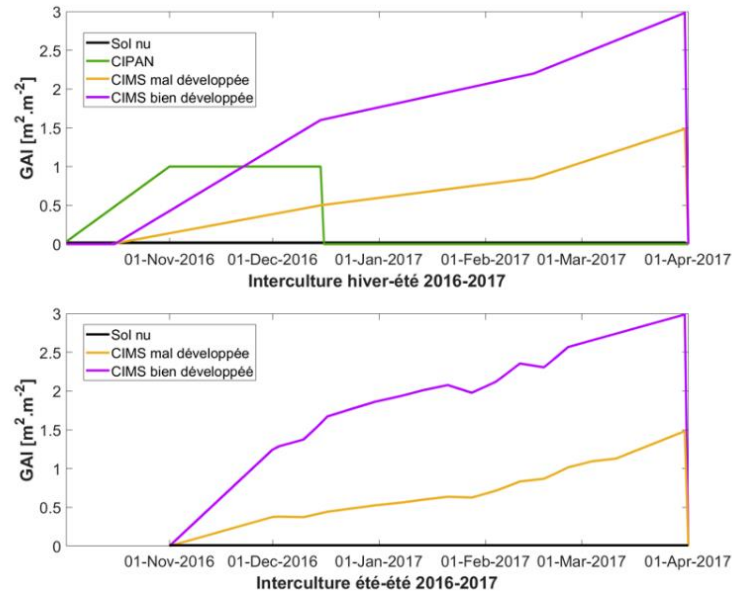


Figure IV-8 : Dynamiques de GAI sur lesquelles SAFYE-CO₂ a été optimisé pour simuler les scénarii d'introduction des CI.

3.2.2. Variables d'intérêts simulées par les modèles

Le but de cet exercice de modélisation est de quantifier les impacts biogéochimique (bilan de C) et biogéophysique (effet albédo, flux de chaleur latente) liés à l'introduction de différents types de CI hivernales.

Le modèle SAFYE-CO₂ fournit des estimations journalières du flux net d'ETR et de CO₂, ainsi que des estimations de productions (biomasse et rendement) permettant des calculs de bilans de C. Comme précédemment expliqué dans ce manuscrit, estimer les exports de C d'une parcelle cultivée en blé nécessite de savoir si les pailles sont exportées de la parcelle ou non. Les exports de pailles sont destinés à nourrir le bétail or, à quelques exceptions près (*e.g.* parcelle ICOS de Lamasquère), les pailles sont très peu exportées sur la zone correspondant à cet exercice. Nous considérerons donc que les pailles ont été enfouies sur l'ensemble de la zone d'étude. De la même manière, les entrées de C sous forme d'amendements organiques étaient très rarement observées sur notre zone d'étude à cette époque, et ils seront donc considérés comme inexistant dans cet exercice.

Les effets biogéophysiques des CI seront caractérisés via les estimations de forçage radiatif induits par les changements d'albédo de surface obtenues avec le modèle RFCC. Pour ce qui est de l'impact sur les flux de chaleur latente, ils seront estimés à partir des estimations d'ETR fournies par SAFYE-CO₂ et de la chaleur latente de vaporisation de l'eau (fonction de la température de l'air).

Enfin, dans un souci de caractérisation du comportement des parcelles agricoles (sources ou puits de C), le nombre de jour de végétation active sera également examiné. Il correspond au nombre de jours où de la végétation (culture principale ou intermédiaire) est présente sur la parcelle, et est défini dans notre approche par les jours où la GPP simulée est non nulle.

3.2.3. Protocoles de simulation

La Figure IV-9 résume le protocole de simulation appliqué à SAFYE-CO₂ pour simuler l'introduction de CI. La rotation B/T a été simulée avec une période d'introduction potentielle des CI définie entre le 1^{er} Octobre et le 1^{er} avril. Au cours de cette période, 4 scénarii d'introduction des CI ont été simulés : pas de CI (sol nu en permanence), une CIMS bien développée, une CIMS mal développée ainsi qu'une CIPAN du 1^{er} Octobre au 15 Décembre (voir Fig. IV-8). La rotation T/T a été simulée avec une période d'interculture légèrement inférieure. Elle a été définie entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} avril et 3 scénarii ont été simulés : un cas sol nu, une CIMS bien développée et une CIMS mal développée (voir Fig. IV-8).

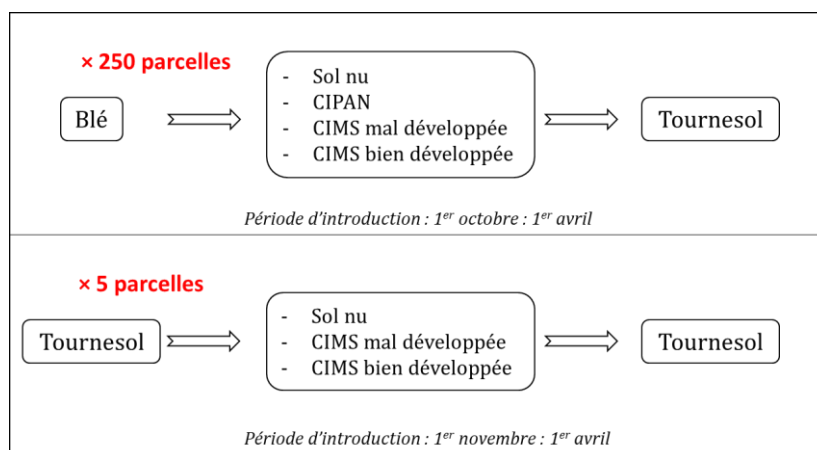


Figure IV-9 : Protocole de simulation appliqué au modèle SAFYE-CO₂ pour simuler l'introduction de CI hivernales à l'échelle régionale.

Rotation	Durée d'introduction (mois)		
R _{HE}	2.5	6	Max
R _{EH}	/	/	/
R _{EE}	5	5	Max
R _{HH}	/	/	/
Scénario CIPAN Scénario CIMS Scénario optimal			

Figure IV-10 : Protocole de simulation appliqué au modèle RFCC pour simuler l'introduction de CI sur les rotations HIV/ETE et ETE/ETE.

Concernant les simulations réalisées avec le modèle RFCC, les fractions de pixel en rotation HIV/ETE et ETE/ETE (voir section III.2.3) ont été forcées avec les fractions effectivement observées dans le RPG (îlots purs et parcelles >1 ha). Trois scénarii d'introduction ont ensuite été simulés : un scénario CIPAN, un scénario CIMS et un scénario optimal (voir Fig. IV-10). Dans le scénario CIPAN, les CI sont introduites pendant une durée de 2.5 mois pour la rotation HIV/ETE. Dans le scénario CIMS, l'introduction de CI sur la rotation HIV/ETE est fixée à 6 mois. Enfin dans le scénario optimal, la durée d'introduction des CI est uniquement limitée par la durée d'interculture. Pour chaque interculture des rotations ETE/ETE, la durée d'implantation des CI est systématiquement de 5 mois, dans la mesure où des CIPAN ne peuvent être implantées sur ce type de rotation (la culture d'été précédente étant récoltée

trop tardivement). Les différents scénarii sont définis par la durée d'introduction sur la rotation HIV/ETE puisque les parcelles concernées par cette rotation représentent la majorité des parcelles simulées (250/255).

3.3. Analyse des résultats

Les sorties de simulation sont, dans un premier temps, analysées de manière indépendante, par approche de modélisation, puis de manière couplée.

3.3.1. Impacts biogéochimiques des CI

3.3.1.1. Composantes des bilans de C des cultures principales

Dans l'approche proposée, les estimations de bilans de C sont obtenues via l'estimation des productions et des flux de CO₂ intégrés à l'année sans prise en compte des CI. Cette section est donc consacrée à l'analyse de ces deux variables. La Figure IV-11 présente la distribution¹³ des rendements simulés par SAFYE-CO₂ pour le blé et le tournesol sur les deux années culturales étudiées. Les rendements du blé simulés en 2008-2009 sont compris entre 249.7 et 712.0 g.m⁻², avec une moyenne pondérée par les surfaces de 461.3 g.m⁻² (soit 46.1 qx.ha⁻¹). Les rendements de tournesol simulés sur la même année culturale (Tournesol 1 sur Fig. IV-11) sont compris entre 158.7 et 218.4 g.m⁻² avec une moyenne située à 167.1 g.m⁻² (soit 16.7 qx.ha⁻¹). Concernant l'année culturale 2009-2010, les rendements de tournesol de la rotation B/T (250 parcelles) sont compris entre 123.0 et 307.7 g.m⁻² et ceux de la rotation T/T sont compris entre 151.2 et 217.6 g.m⁻². Les valeurs moyennes des rendements de tournesol simulés sur 2009-2010 sont de 215.6 pour les parcelles de la rotation B/T et 175.4 g.m⁻² pour celles de la rotation T/T (soit 21.6 et 17.5 qx.ha⁻¹). Les rendements de blé se trouvent légèrement en dessous de la gamme de valeurs généralement observées dans la région (52 et 55 qx.ha⁻¹ pour la Haute-Garonne et le Gers en moyenne sur 2006-2010 d'après données Agreste). Les rendements de tournesol se trouvent également en dessous des rendements moyens (23 qx.ha⁻¹ en moyenne sur 2006-2010 selon données Agreste), notamment ceux des parcelles en rotation T/T. Ceci s'explique par le fait que les parcelles concernées par la rotation T/T sont toutes situées en zone de côteaux, à l'est de la zone d'étude (zone où les parcelles sont moins denses sur Fig. IV-6), avec des sols moins profonds et des potentiels de rendements plus bas.

La Figure IV-12 présente la distribution de la NEP simulée par SAFYE-CO₂ pour le blé et le tournesol sur les années culturales 2008-2009 et 2009-2010. La NEP du blé est comprise entre -349.3 et 177.1 gC.m⁻².an⁻¹ avec une moyenne située à -101.8 gC.m⁻².an⁻¹. La majorité des parcelles se comportent comme des puits de CO₂ pour l'atmosphère (192/250). À l'inverse, la NEP simulée sur les parcelles en tournesol de la rotation B/T est comprise entre -84.4 et 249.2 gC.m⁻².an⁻¹ avec une moyenne à 81.6 gC.m⁻².an⁻¹, et indiquent que 223 parcelles (/250) se comportent comme des sources de CO₂. La NEP des parcelles en rotation T/T est comprise entre 151.2 et 218.4 gC.m⁻².an⁻¹ indiquant que toutes ces parcelles émettent plus de CO₂ qu'elles n'en absorbent.

¹³ Représentation des boîtes de dispersion : le rectangle va du premier au troisième quartile et est coupé par la médiane, les extrémités correspondent aux valeurs extrêmes.

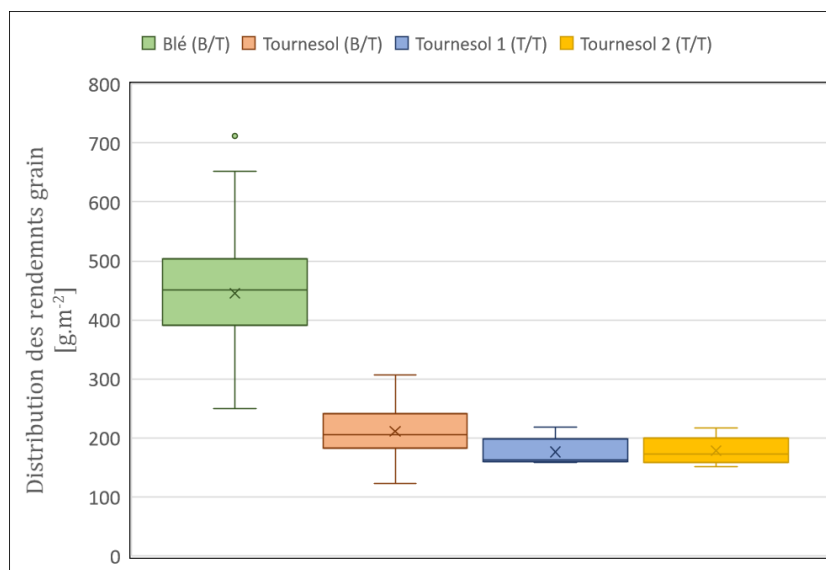


Figure IV-11 : Distribution des rendements simulés par SAFYE-CO₂. Les rotations auxquelles correspondent les parcelles sont indiquées en légende. Pour la rotation T/T, les parcelles correspondent soit à l'année culturelle 1 (2008-2009), soit à l'année culturelle 2 (2009-2010).

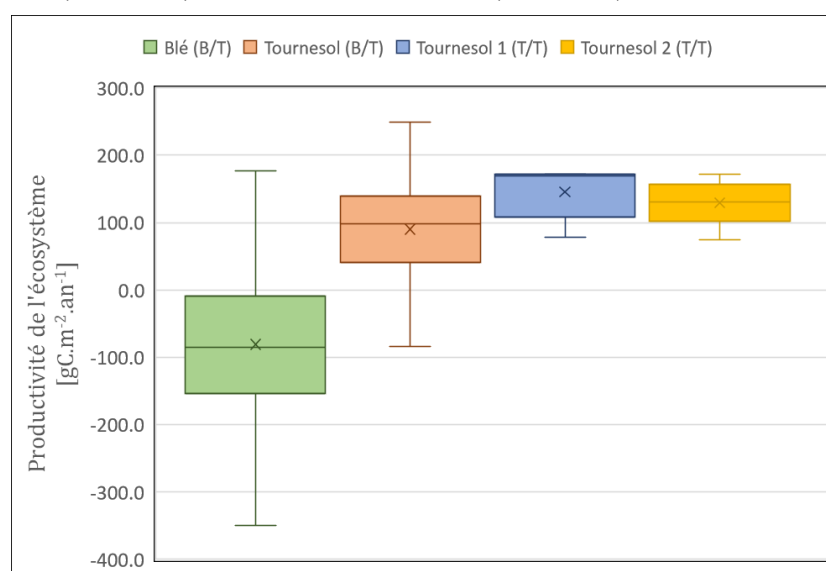


Figure IV-12 : Distribution de la NEP simulée par SAFYE-CO₂. Les rotations auxquelles correspondent les parcelles sont indiquées en légende. Pour la rotation T/T, les parcelles correspondent soit à l'année 1 (2008-2009), soit à l'année 2 (2009-2010).

3.3.1.2. Impact des CI sur les flux de CO₂

La Figure IV-13 présente la NEP exprimée en $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ simulée pour les différents scénarii d'interculture, pour la rotation B/T. L'augmentation de la durée et du développement de la CI induit une augmentation de la fixation de CO₂ et donc une NEP plus négative, ou moins positive. En moyenne, la NEP simulée par SAFYE-CO₂ est de -10.1, -54.8, -78.4 et -135.8 $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour les scénarii sol nu, CIPAN, CIMS peu développée et CIMS bien développée, respectivement. On remarque une différence importante de NEP entre le scénario sol nu et le scénario CIPAN, malgré une période d'introduction courte. Cela s'explique par le développement réussi des CIPAN, permettant une bonne production de biomasse et une diminution de la NEP. On remarque par ailleurs que la différence de NEP entre le

scenario CIMS bien développée et sol nu ($-125.7 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est pratiquement deux fois plus importante que la différence entre le scénario CIMS peu développée et sol nu ($-68.4 \text{ gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$), alors que ces deux scénarii d'introduction sont caractérisés par des périodes d'implantations de CI identiques. Cela illustre l'impact de la réussite d'implantation des CI sur les flux de CO_2 (choix des variétés, soin du semis, absence de maladie etc.) et plus largement sur les bilans de C.

Alors que plus de la moitié des parcelles se comportent comme des sources de CO_2 dans le scénario sol nu (130/250), seulement 15 restent des sources de CO_2 dans le scénario CIMS bien développée.

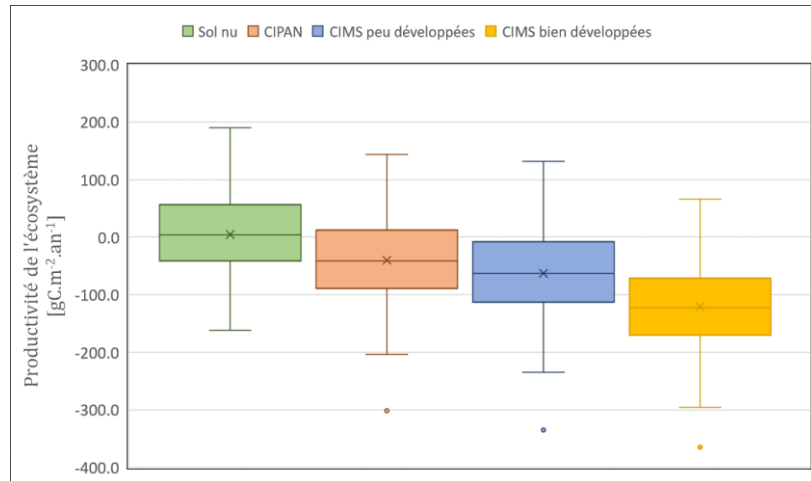


Figure IV-13 : Distribution de la NEP simulée par SAFYE- CO_2 pour les 4 scénarii d'interculture appliqués aux 250 parcelles concernées par une rotation blé/tournesol : sol nu, CIPAN, CI peu développées et CI bien développées.

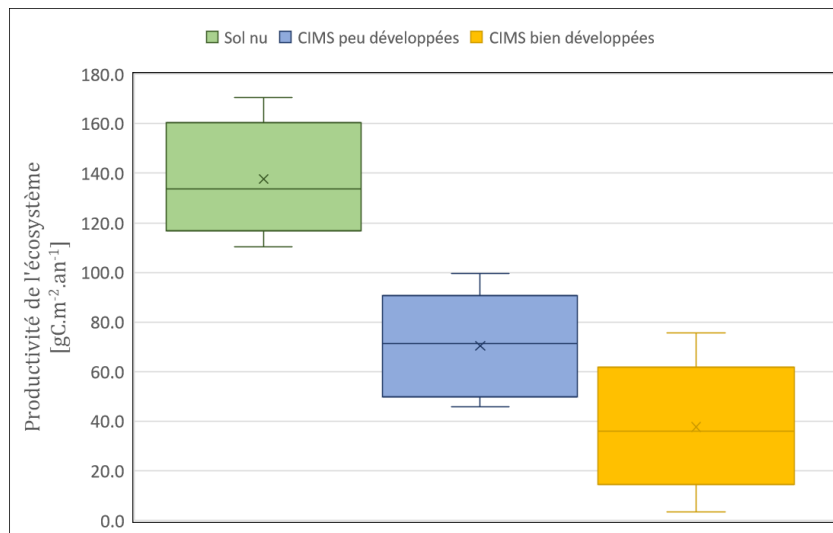


Figure IV-14 : Distribution de la NEP simulée par SAFYE- CO_2 pour les 3 scénarii d'interculture appliqués aux 5 parcelles concernées par une rotation tournesol/tournesol : sol nu, CI peu développées et CI bien développées.

La Figure IV-14 présente la NEP simulée pour les cinq parcelles en rotation T/T. La moyenne de NEP simulée est respectivement de 148.0, 79.3 et 49.5 $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour les scénarii sol nu, CIMS mal développée et CIMS bien développée. Comme pour la rotation B/T, on constate une diminution de

la NEP proportionnelle au développement de la CI. Cependant, dans ces scénarii, toutes les parcelles se comportent comme des sources de CO₂.

Afin de quantifier l'impact de la durée de végétation sur les flux de CO₂, la NEP annuelle correspondant à chaque scénarii d'introduction a été tracée en fonction du nombre de jours de végétation active (ndva, Fig.IV-15). L'hétérogénéité de développement des cultures principales, ainsi que des CI simulées entraîne beaucoup de dispersion ($R^2 = 0.23$). On observe toutefois une tendance, avec une diminution significative de la NEP en fonction du ndva ($NEP = -1.2 \times ndva + 188.6$). Cette tendance, déjà observée dans Ceschia et al., (2010), s'explique par le fait que plus le sol est couvert pendant un temps long, plus l'assimilation de CO₂ par les cultures est grande, ce qui augmente les capacités de puits de CO₂ des parcelles agricoles. Cette assimilation ne dépend évidemment pas que du ndva mais aussi du type ainsi que du niveau de développement des cultures, ou des conditions météorologiques, pouvant favoriser l'assimilation nette de CO₂ par les plantes tout comme la respiration du sol.

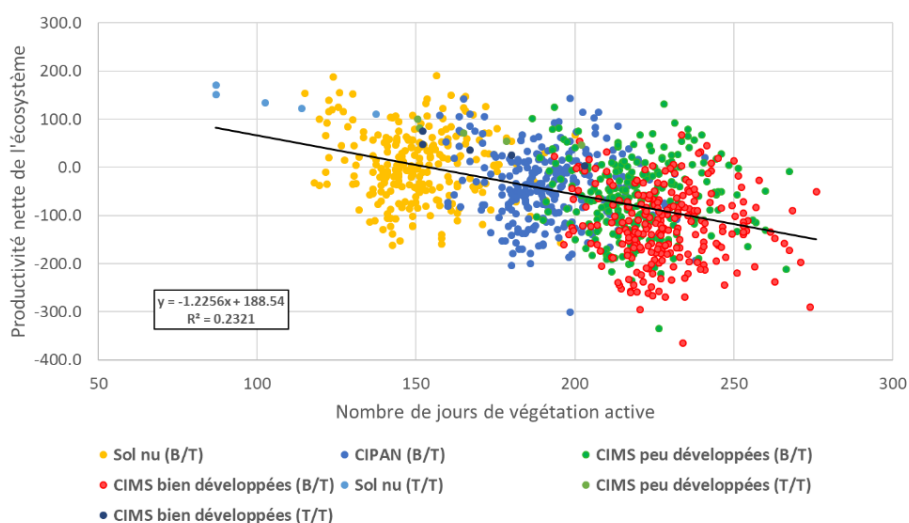


Figure IV-15 : Productivité nette de l'écosystème simulée par SAFYE-CO₂ selon les différents scénarii d'introduction des CI en fonction du nombre de jours de végétation active durant l'année culturale.

3.3.1.3. Impact des CI sur les bilans de C

À partir des estimations de rendements et de flux net de CO₂ fournies par SAFYE-CO₂, les bilans de carbone annuel (NECB) de chaque parcelle ont pu être calculés pour les différents scénarii d'interculture discutés précédemment. La Figure IV-16 présente le NECB à la parcelle pour chacun des trois scénarii. Lorsqu'aucune végétation ne se développe pendant la phase d'interculture (premier scénario), les NECB des parcelles en rotation B/T se trouvent entre 235 et 375 gC.m⁻².an⁻¹ et ceux des parcelles en rotation T/T entre 290 et 313 gC.m⁻².an⁻¹. En moyenne sur toutes les parcelles simulées, le NECB est estimé à 301 gC.m⁻².an⁻¹.

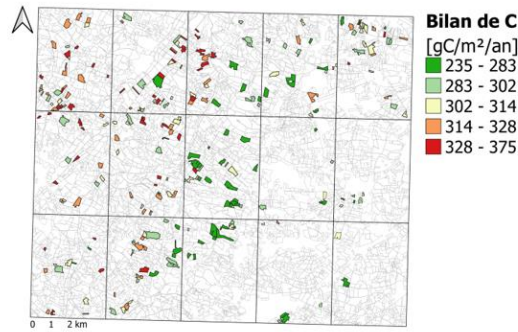
Le second scénario présenté sur la Figure IV-16, correspondant à une introduction de CIPAN sur la rotation B/T et à une CIMS mal développée sur la rotation T/T, est caractérisé par des NECB plus faibles. En effet, la totalité des parcelles sont concernées par une diminution du NECB, autrement dit ces parcelles rejetteraient moins de CO₂ selon ce scénario, en comparaison du scénario sol nu. L'effet global de la végétation d'interculture sur le NECB est significatif puisqu'en moyenne sur toutes les parcelles le NECB estimé est de 233 gC.m⁻².an⁻¹ selon ce scénario, soit 22.7% de moins que pour un sol nu.

Les NECB estimés selon le scénario qui maximise la présence et le développement de la végétation pendant l'interculture (cas CIMS bien développé pour les deux rotations) sont finalement représentés. On remarque que selon ce scénario les NECB sont très impactés et se trouvent entre 101 et 260 $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour la rotation B/T et entre 183 et 218 $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour la rotation T/T. En moyenne le NECB estimé est de 176 $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, soit 41.5% de moins que pour le scénario sol nu. Cela démontre l'impact de la durée d'implantation des CI sur les bilans de C.

Nature de l'interculture :

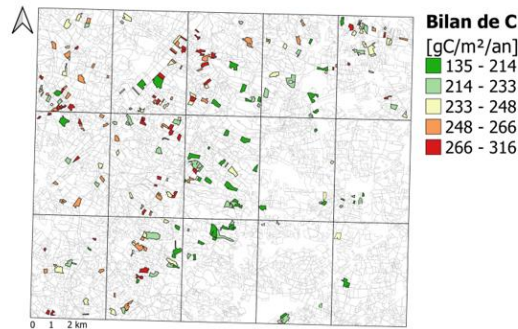
Rotation T/T : **sol nu**

Rotation B/T : **sol nu**



Rotation T/T : **CIMS mal développée**

Rotation B/T : **CIPAN**



Rotation T/T : **CIMS bien développée**

Rotation B/T : **CIMS bien développée**

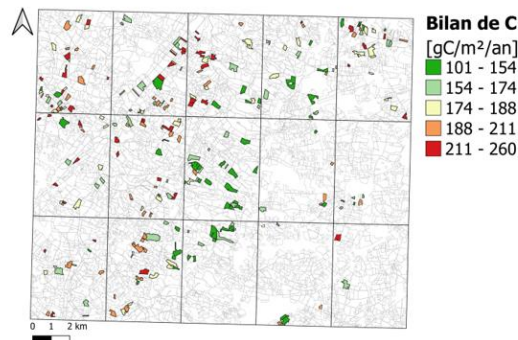


Figure IV-16 : Bilan annuel de carbone estimé avec SAFYE-CO₂ pour trois scénarii d'occupation du sol pendant l'interculture. Haut, cas sol nu ; milieu, cas CIPAN et CI mal développée ; bas, cas CIMS bien développée.

3.3.2. Impacts biogéophysiques des CI

3.3.2.1. Impact des CI sur l'évapotranspiration

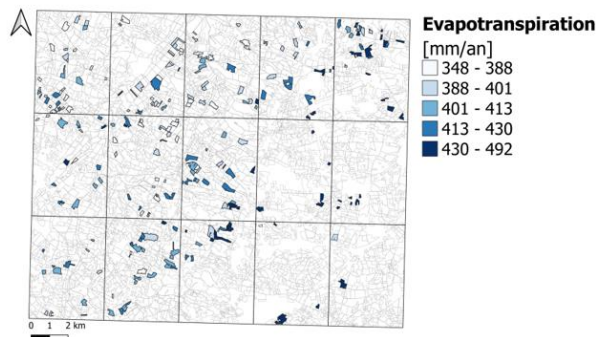
Comme énoncé plus tôt dans ce chapitre, les données sols utilisées ne permettent pas une estimation suffisamment précise du contenu en eau du sol et donc des flux d'évapotranspiration. Toutefois, la période que l'on cherche à caractériser dans cet exercice s'étale du début de l'automne au début du printemps, et est généralement marquée par d'importantes précipitations si bien qu'aucun stress hydrique n'est simulé par le modèle. Autrement dit, même si le contenu en eau du sol n'est pas bien

estimé, cela n'a pas d'incidence forte sur les flux d'eau puisqu'aucune rétroaction ne vient limiter l'évaporation ou la transpiration pendant la période d'interculture, du fait des fortes précipitations et de la faible demande évaporative. La différence d'évapotranspiration entre les différents scénarii traduit donc l'impact du type d'interculture sur les flux d'eau.

Nature de l'interculture :

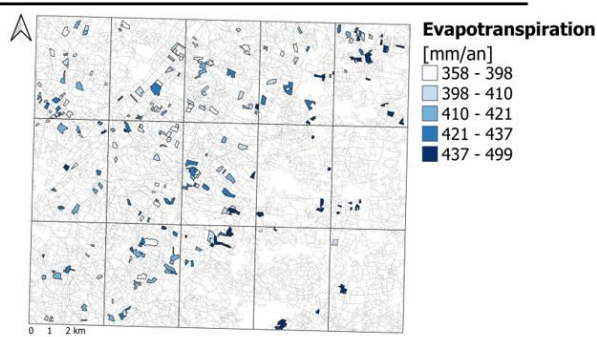
Rotation T/T : **sol nu**

Rotation B/T : **sol nu**



Rotation T/T : **CIMS mal développée**

Rotation B/T : **CIPAN**



Rotation T/T : **CIMS bien développée**

Rotation B/T : **CIMS bien développée**

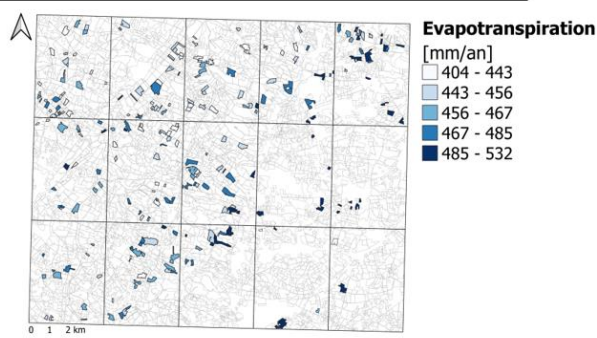


Figure IV-17 : Évapotranspiration estimée avec SAFYE-CO₂ pour trois scénarii d'occupation du sol pendant l'interculture. Haut, cas sol nu ; milieu, cas CIPAN et CI mal développée ; bas, cas CIMS bien développée.

La Figure IV-17 présente l'évapotranspiration annuelle estimée par SAFYE-CO₂ pour les trois mêmes scénarii d'introduction des CI présentés section IV-3.3.1.3. Selon le scénario sol nu, l'ETR simulée est en moyenne de 409 [348 - 479] mm.an⁻¹ pour les parcelles en rotation B/T et de 440 [386 - 492] mm.an⁻¹ pour les parcelles en rotation T/T. Contrairement à l'analyse sur les bilans de C, le scénario CIPAN a un impact très faible sur les flux d'ETR. En effet, on constate une augmentation des flux d'ETR de seulement 2.1% comparée au scénario sol nu (contre 22.7% de différence sur les bilans C). L'ETR simulée avec le scénario CIPAN est donc en moyenne de 418 [358 - 486] mm.an⁻¹ pour les parcelles en rotation B/T et de 447 [391 - 499] mm.an⁻¹ pour les parcelles en rotation T/T. Le scénario CIMS est marqué par des flux d'ETR plus importants, en moyenne égal à 464 [404 - 532] mm.an⁻¹ pour les parcelles en rotation B/T, et à 460 [403 - 512] mm.an⁻¹ pour les parcelles en rotation T/T. Selon ce

scénario, les flux d'ETR augmentent de 13.2% par rapport au scénario sol nu. Cette différence plus importante que dans le scénario CIPAN s'explique par la plus forte demande évaporative rencontrée à la fin de la période d'introduction des CIMS (fin d'hiver-début de printemps).

L'impact des CI sur la ressource en eau est souvent questionné car il pourrait limiter la disponibilité en eau pour la culture suivante. Ces résultats démontrent que dans notre zone d'étude, la présence de CIPAN aurait un impact négligeable sur le contenu en eau du sol et que la présence de CIMS aurait un impact limité voire nul car les précipitations sur la période avril-mai dépassent généralement l'ETR des cultures (recharge en eau du sol).

3.3.2.2. Impact radiatif de la durée d'introduction des CI

La Figure IV-18 présente le gain d'albédo sur les 15 pixels simulés avec RFCC, ainsi que le forçage radiatif associé pour les trois scénarii d'introduction de CI simulés (Fig. IV-10). Les estimations associées au scénario CIPAN sont caractérisées par des gains d'albédo situés entre 0.0020 et 0.0123 et des $RF\alpha$ entre 0.29 et 0.67 $W.m^{-2}$. Ces gains sont plus importants sur les pixels contenant une fraction en rotation ETE/ETE, *i.e.* les 4 pixels sur lesquels sont observés les parcelles en rotation T/T. En moyenne sur ces 4 pixels, le gain d'albédo et le $RF\alpha$ associé sont respectivement de 0.09 et 0.50 $W.m^{-2}$, alors qu'il est respectivement de 0.003 [0.002 – 0.012] et 0.36 [0.29 – 0.67] $W.m^{-2}$ sur l'ensemble des pixels. L'introduction de CI étant, dans ce scénario, deux fois plus longue sur la rotation ETE/ETE (5 mois) que sur la rotation HIV/ETE (2.5 mois), l'augmentation d'albédo des pixels contenant une fraction de parcelles en rotation ETE/ETE est donc supérieure à celle des pixels incluant seulement une fraction de parcelles en rotation HIV/ETE.

Lorsque la durée d'introduction des CI est allongée à 6 mois pour la rotation HIV/ETE (scénario CIMS), le gain annuel d'albédo estimé au pixel augmente significativement et atteint en moyenne 0.012 [0.009 - 0.018] induisant un $RF\alpha$ de 0.95 [0.71 - 1.29] $W.m^{-2}$. La variabilité des gains d'albédo entre les pixels dépend évidemment de la durée d'introduction, mais aussi des valeurs d'albédo de végétation et de sol nu propre à chaque pixel. La période d'introduction est également un facteur majeur du $RF\alpha$. En effet, on remarque que les plus forts gains d'albédo (*i.e.* pixel milieu droite) ne correspondent pas forcément aux plus forts gains de $RF\alpha$. Ici, le pixel concerné par le plus fort gain d'albédo (0.018) comporte une fraction en rotation ETE/ETE, or l'introduction de CI sur cette rotation (dans RFCC) s'étale de septembre à janvier, tandis qu'elle s'étale de juillet à décembre sur la rotation HIV/ETE selon ce scénario. Les rayonnements étant plus forts en période estivale, le gain d'albédo des parcelles en rotation HIV/ETE induira un $RF\alpha$ plus important que celui des parcelles en rotation ETE/ETE.

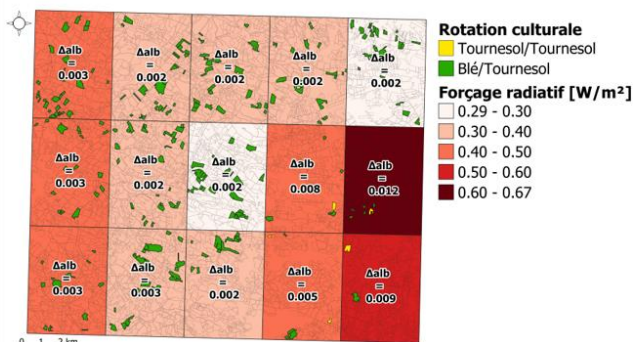
Enfin, lorsque les durées d'introduction des CI sont seulement limitées par la durée de l'interculture (scénario optimal) le gain d'albédo moyen est de 0.018 [0.013 - 0.025] induisant un $RF\alpha$ de 1.14 [0.71 - 1.29] $W.m^{-2}$. Plus la durée d'introduction des CI est longue, plus le gain d'albédo sera important. Par ailleurs, bien que le gain d'albédo et le $RF\alpha$ soient intimement liés, la capacité de la modification d'albédo à induire un forçage est également dépendante des conditions de rayonnement. Une CI implantée en période estivale, pendant laquelle les rayonnements sont importants, sera donc plus efficiente d'un point de vue radiatif qu'une CI implantée en période hivernale, caractérisée par des rayonnements plus faibles.

La durée moyenne des intercultures estimés par RFCC est de 8.4 [7.7 – 8.8] mois pour la rotation HIV/ETE et de 6.3 [6.1 – 6.4] mois pour la rotation ETE/ETE. Dans la région, la culture de blé est généralement cultivée entre les mois d'octobre/novembre et de juillet, tandis que celle de tournesol est généralement semée pendant les mois d'avril/mai et récoltée entre la fin du mois d'août et le mois d'octobre. Cela signifie que les intercultures des parcelles en rotation HIV/ETE durent habituellement

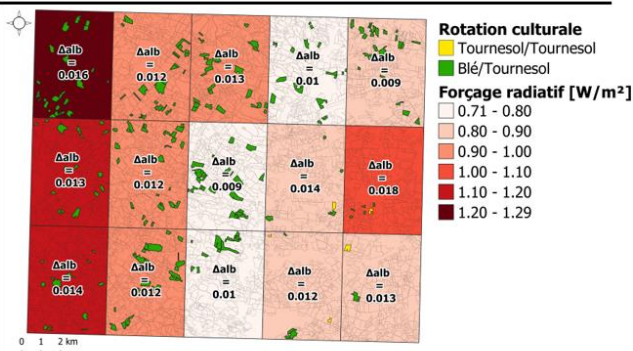
autour de 9-10 mois, tandis que celles des monocultures d'été durent à peu près 6.5 à 8.5 mois. La durée des intercultures HIV/ETE simulée par RFCC a donc tendance à minimiser l'impact radiatif des CI, puisque ces dernières sont introduites sur des périodes plus courtes qu'elles ne pourraient l'être.

Durée d'introduction des CI (mois):

Rotation T/T : 5 (CIMS)
Rotation B/T : 2.5 (CIPAN)



Rotation T/T : 5 (CIMS)
Rotation B/T : 6 (CIMS)



Rotation T/T : Max
Rotation B/T : Max

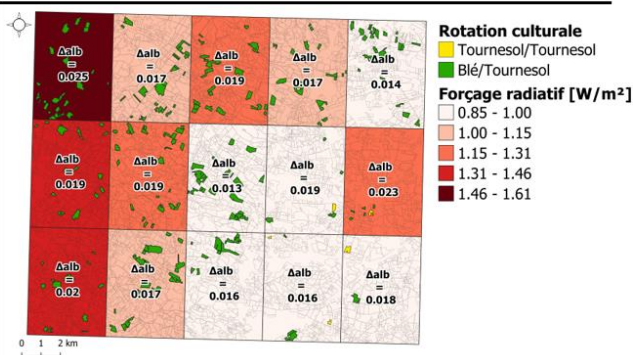


Figure IV-18 : Forçage radiatif et gain d'albédo agrégés au pixel associés aux trois scenarii d'introduction des CI simulés avec RFCC.

3.3.3. Effets couplés

La Figure IV-19 présente les estimations des modèles SAFYE-CO₂ (NECB, flux de chaleur latente) et RFCC (RF α) pour les 3 scenarii d'introduction suivant :

- Cas de référence : Pas d'introduction de CI → sol nu sur toute la durée de l'interculture.
- Cas CIPAN : CI limitées à 2.5 mois sur la rotation HIV/ETE (cas des CIPAN) et à 5 mois sur la rotation ETE/ETE.
- Cas CIMS : CI de 6 et 5 mois pour respectivement la rotation HIV/ETE et ETE/ETE.

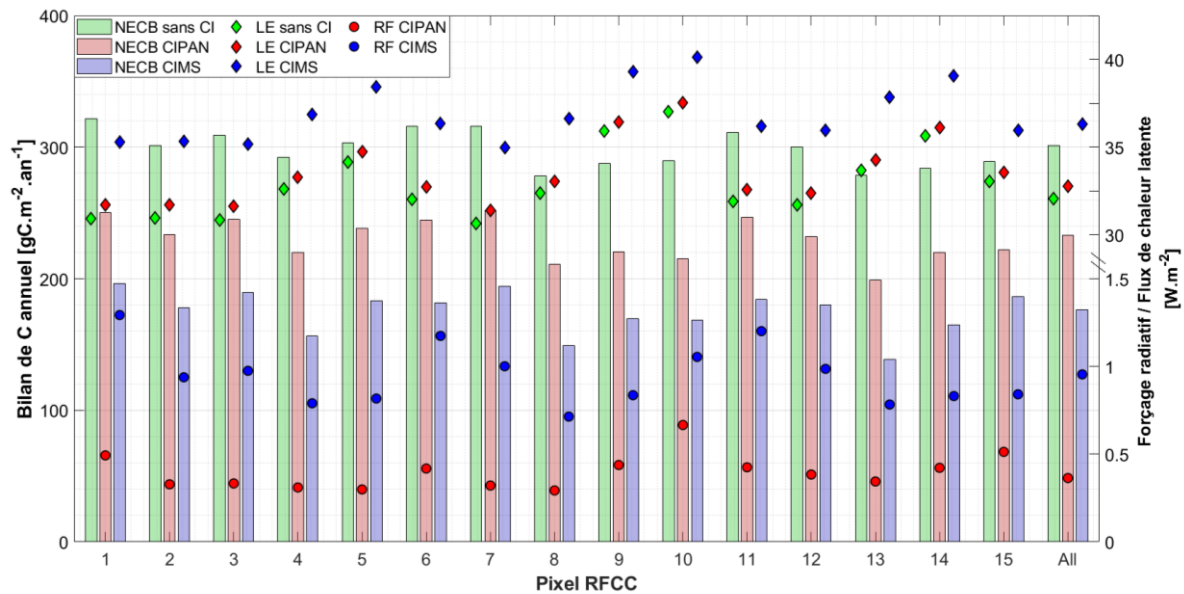


Figure IV-19 : NECB estimés par SAFYE-CO₂ (axe de gauche), LE estimés par SAFYE-CO₂ et RF α estimés par RFCC (axe de droite) pour le scénario de référence (sol nu durant l'interculture), le scénario CIPAN et le scénario CIMS, sur les pixels RFCC.

On remarque sur la Figure IV-19 que la différence en termes de bilan de C est liée à la durée d'implantation des CI. En effet, les NECB simulés sont diminués de respectivement 22.7 et 41.5% selon les scénarii CIPAN et CIMS par rapport au scénario de référence (sol nu). Néanmoins, la différence relative de NECB entre les deux scénarii est plus faible que la différence relative en termes de durée d'implantation. Ceci s'explique par les conditions météorologiques de la période hivernale qui ne permettent pas un fort développement de la végétation et limitent ainsi la production de biomasse.

Les flux de chaleur les plus importants sont observés sur les pixels concernés par une rotation T/T (pixel n° 9, 10, 14 et 15) car les périodes de végétation dans ce scénario, et notamment la fin de période culturale du tournesol, coïncident avec des périodes de fortes demandes évaporatives (*i.e.* fin de la période juillet-août-septembre). Les racines profondes du tournesol pendant cette période vont donc permettre de répondre, au moins partiellement, à cette demande évaporative via la transpiration du tournesol.

Concernant l'impact sur le RF α , bien que l'introduction de CI selon le scénario CIPAN entraîne en moyenne un RF α de 0.36 W.m⁻², celui-ci est largement plus important sur les pixels contenant une rotation T/T où il est compris entre [0.42 – 0.67] W.m⁻². On remarque enfin en analysant les résultats du scénario CIMS, que l'allongement de la durée d'introduction tend plus à augmenter le RF α que les flux de chaleur latente et le bilan de C. En effet, le développement des CI pendant la période hivernale est conditionné par les faibles températures, limitant ainsi la production de biomasse (effet sur les bilans de C) et l'ETR. À l'inverse, même si la végétation d'interculture n'est pas très développée elle couvre le sol, ainsi elle va avoir un impact sur le rayonnement réfléchi. Quelque soit le scénario d'introduction des CI, on note une synergie entre les effets stockage C, flux de chaleur latente et effets albédo. Ces résultats illustrent l'importance des analyses couplées entre effets biogéochimiques et effets biogéophysiques liés aux changements de pratiques.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ Plusieurs scénarii d'introduction des CI ont pu être simulés avec SAFYE-CO₂ ainsi qu'avec RFCC permettant ainsi de quantifier l'impact de cette pratique sur les bilans de C, sur les flux de chaleur latente et sur le forçage radiatif lié aux changements d'albédo.
- ♣ Les bilans de C sont assez fortement impactés par les CI même lorsque la durée d'introduction est limitée (cas des CIPAN) même si les conditions météorologiques ne permettent pas un développement optimal de la végétation sur un laps de temps aussi court.
- ♣ Le changement d'albédo des parcelles agricoles induit un forçage radiatif important proportionnel à la durée d'introduction des CI.
- ♣ La simulation de scénarii d'introduction similaires dans SAFYE-CO₂ et RFCC permet de réaliser des analyses couplées de certains effets biogéochimiques (bilan de C) et biogéophysiques (effet albédo, chaleur latente) liés à l'introduction de CI qui montrent des synergies entre ces effets.

4. Discussion et conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, le modèle agro-météorologique SAFYE-CO₂ a été appliqué sur plus d'une centaine de parcelles en rotation blé/tournesol sur lesquelles des EVI, observés par satellites pendant la phase estivale d'interculture, ont été simulés. Environ un quart des parcelles simulées (24/111) étaient concernées par des EVI. Cet exercice a permis de montrer que les phénomènes de repousses/adventives, qui ne sont pas pris en compte dans les autres approches de modélisation, ont pourtant un impact significatif sur les flux de CO₂ et donc sur les bilans de C des parcelles agricoles. La prise en compte réaliste de tels événements, que ce soient des adventices, des repousses ou des CI estivales, n'est possible que via l'utilisation de la télédétection. En plus de pouvoir détecter la présence de ces EVI, l'utilisation de produits satellites permet également de renseigner le niveau et la durée de développement de ces EVI, ce qui est essentiel afin d'estimer les biomasses et les flux de CO₂ avec précision.

Dans la continuité de cette étude, et parce que la mise en place de CI hivernale est fréquente durant cette période et tend à se généraliser (soit à cause de la directive nitrate (CIPAN), soit car les agriculteurs le font de manière volontaire pour protéger et améliorer la qualité de leur sol (CIMS)), un second exercice de simulation couplée a été mis en place. Plusieurs scénarii d'introduction des CI durant la phase d'interculture hivernale ont été simulés avec les deux modèles SAFYE-CO₂ et RFCC, afin d'obtenir des analyses couplées des effets biogéochimiques et biogéophysiques liées à cette pratique. Il a été démontré que la mise en place de CI pourrait : 1) augmenter de 22.7 à 41.5% le bilan de C des parcelles agricoles, et 2) entraîner un forçage radiatif entre 0.36 et 0.95 W.m⁻², selon le scénario d'introduction. Concernant les flux de chaleur latente, il a été montré que cette pratique avait peu d'impact lorsqu'elle était mise en place pendant un laps de temps court comme dans le cas des CIPAN (+2.1%), car leur période d'introduction est caractérisée par de faibles demandes évaporatives. En

revanche, lorsque les CI sont introduits sur une période plus longue, les flux de chaleur latente sont plus significativement impactés (+13.2%).

Cependant, la comparaison des effets biogéochimiques et biogéophysiques liée à un changement de pratique est délicate car cela nécessite d'être cohérent sur les horizons de temps en jeu, ainsi que sur l'emprise géographique qui va être impactée par ces effets. Or les impacts des effets analysés sont différents en espace et en temps. Par exemple, les effets biogéochimiques, tels que émissions nettes de CO₂ ou d'autres GES, ont un effet global sur la température puisque ces gaz sont mélangés de façon homogène dans l'atmosphère. À l'inverse, les effets biogéophysiques, qui sont exprimés par un forçage radiatif en haut de l'atmosphère, peuvent avoir un effet local sur la température, comme dans le cas des effets albédo (Davin et al., 2014), et peuvent aussi entraîner des effets de rétroactions du climat sur la surface (*i.e.* modification des régimes de précipitations, mouvement des masses d'air, formation de nuages, etc.) difficilement prédictibles sans couplage à des modèles de climat. Pour palier à ce problème, Lugato et al., (2020) suggèrent que les effets albédo liés à l'introduction de CI ne devraient pas être analysés dans les mêmes métriques (CO₂-eq) que les effets sur les émissions de GES, mais plus comme un indicateur permettant de savoir si les effets biogéophysiques peuvent entrer en synergie avec les effets biogéochimiques ou s'ils sont antagonistes.

De plus, lorsque des analyses couplées sont réalisées sur des temps courts, comme c'est le cas dans ce chapitre, cela tend à surestimer certains effets et à en sous-évaluer voire omettre d'autres. Ainsi, l'effet stockage de C dans le sol est probablement limité dans le temps puisque les stocks de C du sol vont finir par atteindre un nouvel équilibre (Lugato et al., 2020a; Tribouillois et al., 2018a). Ainsi, l'effet de stockage est important les premières années, puis décroît les années suivantes pour finir par disparaître au bout de 45-50 ans (Tribouillois et al., 2018a). Par ailleurs, certains phénomènes ne sont pas du tout pris en compte dans les études appliquées sur de courtes échelles temporelles. Ainsi, l'apport répété de matière organique fraîche au sol va induire un assombrissement du sol et donc une décroissance de l'albédo du sol. Cette modification de l'albédo de surface, qui pourrait avoir un impact radiatif significatif, n'a pourtant jamais été considérée. Ces problématiques seront abordées dans le chapitre suivant qui traite des effets directs (couverture du sol) et indirects (liés à l'assombrissement du sol induit par accumulation de matière organique via les CI) sur les RFA à différents horizons temporels.

Chapitre V

Chapitre V : Analyse des effets albédo à court et long termes des cultures intermédiaires

1. Vers une meilleure compréhension de l'impact climatique des cultures intermédiaires

Le modèle RFCC, développé pour estimer l'effet albédo induit par l'utilisation des cultures intermédiaires (CI) à l'échelle Européenne, a permis d'obtenir des premières estimations du potentiel, en termes de forçage radiatif (RF) des parcelles agricoles, lié à la mise en œuvre de cette pratique. Cette première étude mérite toutefois d'être approfondie de manière à mieux rendre compte de l'impact des CI en considérant certains aspects qui n'ont, jusqu'ici, pas été considérés. En premier lieu, la durée de simulation était jusqu'ici de 3 ans ce qui est trop court par rapport au phénomène étudié. En effet, la conversion du RF en équivalent CO₂ s'appuie sur l'hypothèse d'un maintien de la pratique sur 100 ans. Il apparaît donc intéressant de comparer des simulations établies sur une durée plus importante. Par ailleurs, seul deux scénarii d'introduction ont été simulés dans notre première étude (Carrer et al., 2018), *i.e.* introductions de CI après une culture d'hiver et avant une culture d'été pour des durées de 3 ou 6 mois. Or la mise en place de cette pratique est observée sur d'autres périodes d'interculture (*i.e.* entre deux cultures d'été). Il est donc proposé dans ce chapitre une analyse plus approfondie de l'effet court et long terme des CI.

Concernant l'effet de la neige, quelques rares études ont souligné l'importance de la prendre en compte dans ce genre d'approche (*e.g.* Lugato et al., 2020; Meyer et al., 2012). Kaye and Quemada, (2017) ont montré que lorsque la neige était totalement couvrante, elle annihilait tout forçage radiatif lié aux CI puisque l'albédo de référence restait inchangé. En revanche, les auteurs alertent sur les effets de la couverture neigeuse lorsque cette dernière est partiellement couvrante. En effet, dans ce cas, l'albédo de surface tendrait à diminuer en présence de CI puisque l'albédo de la végétation est plus faible que celui de la neige. Autrement dit, la mise en place de CI sur des surfaces partiellement couvertes de neige pourrait entraîner un forçage radiatif positif (effet réchauffant). Les mêmes constats ont été établis par Lugato et al., (2020) qui ont introduits l'effet neige dans leur approche de modélisation des effets albédo des CI. Cette méthodologie a été appliquée dans notre approche et sera détaillée dans l'étude constituant ce chapitre.

Enfin, la prise en compte de l'assombrissement du sol, lié à l'accroissement de la teneur en matière organique suite à la mise en œuvre des CI, n'a jamais été traité dans la littérature (à notre connaissance) alors qu'il est probable que cet effet ait un impact fort sur le bilan radiatif. Rappelons que les sols agricoles se sont appauvris en matière organique depuis le début de la révolution verte (Lal, 2002). Cet appauvrissement s'est notamment traduit par une hausse de leur albédo. Ces sols représentent aujourd'hui un très fort potentiel de stockage de carbone atmosphérique, et les CI ont été identifiés comme la pratique agricole ayant en France le plus fort potentiel en terme de stockage de C (Pellerin et al., 2019). Cette augmentation des stocks de matière organique, en particulier en surface, s'accompagne d'un assombrissement du sol (Cierniewski et al., 2018; Genesio et al., 2012; Meyer et al., 2012a). Autrement dit, les effets refroidissants apportés par le piégeage du CO₂ atmosphérique et l'effet albédo

à court terme des CI (effet couverture du sol), risquent d'être, au moins partiellement et à moyen terme, compensés par la diminution de l'albédo du sol. Cette pratique pourrait donc induire à moyen terme des effets antagonistes entre effets biogéochimiques (stockage de C) et biogéophysiques (augmentation d'albédo des parcelles liée à la couverture du sol par les CI et diminution d'albédo de sol liée au stockage de C). Il est donc important de quantifier l'effet albédo à court et moyen terme des CI afin de parvenir à une meilleure compréhension de l'effet que pourrait avoir la généralisation de cette pratique sur le climat. Afin de prendre en compte ces différents effets, une ébauche d'article, est présentée dans ce chapitre.

2. Résumé de l'article en français

Aujourd'hui, les sociétés sont confrontées à un challenge sans précédent qui consiste à contenir le réchauffement global en dessous d'un seuil acceptable. Suite à la COP21, les pays signataires de la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) se sont mis d'accord sur une limitation des émissions de gaz à effet de serre permettant de limiter l'augmentation de la température en dessous de 1.5°C par rapport à l'époque préindustrielle. Dans ce contexte, il apparaît que la gestion des sols agricoles pourrait être utilisée comme un levier d'atténuation des changements climatiques. En effet, il a été démontré qu'un effet refroidissant résulterait de l'introduction de cultures intermédiaires à l'échelle Européenne, lié à trois effets majeurs : une augmentation de la séquestration de carbone dans le sol, une diminution de l'utilisation des engrais et une augmentation de l'albédo de surfaces des parcelles agricoles. En se basant sur l'utilisation de produits satellitaires, de base de données d'occupation des sols, de variables météorologiques, de statistiques agricoles et sur des mesures in situ, Carrer et al., (2018) ont développé un modèle qui simule le forçage radiatif induit par l'augmentation de l'albédo de surface suivant l'introduction de cultures intermédiaires en Europe, pendant l'interculture de la rotation culture d'hiver/culture d'été. Ils ont montré que selon un scénario réaliste, les cultures intermédiaires pourraient être introduites sur 4.17% de la surface Européenne. Il en résulterait un potentiel d'atténuation de 3.16 ou 4.01 MtCO₂-eq.an⁻¹ selon la durée d'introduction des cultures intermédiaires (respectivement 3 et 6 mois). Le présent article peut être considéré comme la suite de cette étude, offrant une analyse plus poussée de l'impact de cette pratique, en considérant trois questions importantes soulevées par Carrer et al., (2018) : i) dans quelle mesure est-il possible d'étendre les périodes d'implantation des cultures intermédiaires et quel en serait la conséquence d'un point de vue effet albédo ? ; ii) quel serait l'impact de la couverture neigeuse en présence de CI sur le forçage radiatif ? ; et iii) quelles peuvent être les conséquences d'une augmentation de matière organique du sol induite par les CI sur les effets albédo à moyen et long termes ? Cette étude montre que le potentiel d'atténuation des CI pourrait à court terme atteindre 6.74 MtCO₂-eq.an⁻¹ en augmentant les périodes et durées d'introduction des cultures intermédiaires et pourrait tomber à 0.99 MtCO₂-eq.an⁻¹ en considérant l'effet d'une couverture neigeuse partielle des CI. Finalement, notre étude démontre que l'effet assombrissement du sol tend à moyen terme à prédominer sur l'effet couverture du sol des CI à court terme, faisant basculer le forçage radiatif d'un effet refroidissant équivalent à 6.74 MtCO₂-eq.yr⁻¹ à court terme à un effet réchauffement de -19.98 MtCO₂-eq.yr⁻¹ à moyen/long terme. En conclusion, cette étude démontre que les surfaces agricoles devraient être couvertes de manière permanente par de la végétation ou par des pailles afin d'éviter tout effet antagoniste une fois que des pratiques stockantes ont été mises en œuvre.

3. Analysis of direct and undirect effects of cover crop on the albedo induced radiative forcing

Pique Gaétan^{(1,2)*}, Carrer Dominique⁽³⁾, Fieuzal Rémy⁽¹⁾, Garisoain Raphaël⁽³⁾, Ceschia Eric⁽⁴⁾

¹CESBIO, Université de Toulouse, CNES/CNRS/INRA/IRD/UPS, Toulouse, France

²Agence De l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie (ADEME), Angers Cedex 1, France

³CNRS-GAME, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

⁴INRAE, USC 1439 CESBIO, Toulouse, France

Keywords: albedo, radiative forcing, cover crop, remote sensing monitoring

* Corresponding author: E-mail address: piqueg@cesbio.cnrs.fr

3.1. Abstract

Today societies face an unprecedented challenge to limit global warming. After the COP21, the signatory countries of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) agreed on limiting greenhouse gases emissions allowing to limit the temperature increase under 1.5°C compared to the pre-industrial era. In this context, recent studies showed that land management could be used as a mitigating lever against global warming. They demonstrated that the introduction of cover crops over Europe could result in a cooling effect due to three major effects: an increase of soil organic carbon sequestration, a decrease in the use of fertilizers and an increase in surface albedo of the croplands. Based on the use of remote sensing data, land cover database, meteorological data, national agricultural statistics and ground measurements, Carrer et al., (2018) developed a model that simulates the radiative forcing following the increase in surface albedo caused by the introduction of cover crops over Europe during the fallow period between winter and summer crops. They showed that, according to realistic scenario, cover crops could be introduced over 4.17% of the European surface resulting in a mitigation potential of 3.16 to 4.01 MtCO₂-eq.yr⁻¹ depending on the duration of the CC (respectively 3 and 6 months). This article can be considered as a companion paper and offers further analysis of the impact of the cover crops by considering three important questions raised in Carrer et al., (2018) : i) how feasible is it to extend the favourable periods for the introduction of the cover crops and what would be the consequence in terms of albedo effect ? ; ii) what would be the impact of snow cover in the presence of cover crop on radiative forcing ? ; and iii) what could be the consequences of an increase in soil organic matter induced by cover crops on the medium and long term albedo effects ? This study shows that the mitigation potential could increase up to 6.74 MtCO₂-eq.yr⁻¹ by extending the periods of introduction of the cover crops, and could be limited to 0.99 MtCO₂-eq.yr⁻¹ by considering drastic snow effects. Finally, our study shows that the soil darkening effect tends in the medium term to predominate over the cover crop soil cover effect in the short-term, tipping the radiative forcing from a cooling effect equivalent to 6.74 MtCO₂-eq.yr⁻¹ in the short term to a warming effect of -19.98 MtCO₂-eq.yr⁻¹ in the medium/long term. In conclusion, this study shows that cropland areas should be permanently covered

by vegetation or straws in order to avoid any antagonistic effect once storage practices have been implemented.

3.2. Introduction

Since the beginning of the industrial era (1850-1900 according to the IPCC 2013) atmospheric carbon dioxide concentration is continuously rising, increasing global temperature. An ambitious objective of the 2015 United Nations Climate Change Conference (COP21) was to contain the global air temperature increase below 1.5°C by the end of the 21st century. However, current climate projections indicate that this limit is likely to be exceeded without strong mitigation strategies. Indeed, in the fifth assessment report of the IPCC (IPCC, 2013), the Representative Concentration Pathways (RCPs) predict that the global mean temperature increase is likely to be 0.3-1.7°C for the most optimist scenario (RCP2.6) while the scenario considering the highest GHG emissions (RCP8.5) predicts an increase of 2.6-4.8°C compared to the average temperature over the period 1986-2005. As this period is already 0.63°C warmer than the pre-industrial era (IPCC 2013), it is very unlikely that the stated objective of the COP21 will be achieved without the use of geoengineering techniques. Even if GHG emissions stopped now, global temperature would continue to increase during decades due to ocean and carbon cycle inertia (Matthews and Caldeira, 2008).

‘Geoengineering’, also called ‘climate engineering’, refers to “a broad set of methods and technologies that aim to deliberately alter the climate system in order to alleviate the impacts of climate change” (IPCC 2014). Those methods can be divided into two categories: the carbon dioxide removal (CDR) and the solar radiation management (SRM) techniques. CDR approaches are intended to remove carbon dioxide from the atmosphere to reduce the greenhouse effect. To do so, those techniques either aim at increasing natural C sinks, *e.g.* through ocean fertilization (Watson et al., 2008) or afforestation/reforestation (Caldeira et al., 2013) or aim at capturing CO₂ through different methods (Bao and Trachtenberg, 2006; Gray et al., 2008; Mahmoudkhani and Keith, 2009). SRM approaches aim at increasing the fraction of solar radiation reflected back to space by increasing Earth’s albedo. Among SRM approaches, some suggest to increase the atmosphere’s albedo by seeding clouds to increase cloud droplets number and thus cloud albedo (Latham et al., 2008) or consider injecting sulphate aerosol into the atmosphere (Crutzen, 2006; Robock et al., 2009). Others studies consider increasing land surface albedo, which is probably less dangerous as it can be implemented gradually and it is reversible. For instance, Akbari et al., (2009) and Jacobson and Ten Hoeve, (2012) investigate the climatic impact of painting rooftops in white worldwide. Also, Ridgwell et al., (2009) and Singarayer and Davies-Barnard, (2012) analysed the cooling effect of increasing crops leaf albedo through varietal selection.

In this context, the recent ‘4 per 1000’ initiative (Chabbi et al., 2017a; Minasny et al., 2017a) aims at increasing global soil organic carbon (SOC) stocks of all non-permafrost soil by 4‰ per year in order to counterbalance the anthropogenic GHG emissions. Several studies identified cover crops (CC) as an efficient management practice to sequester carbon in the soils (Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a; Tribouillois et al., 2018a) as the CC biomass is incorporated into the soil enabling to increase SOC stocks. This practice can thus be considered as CDR effective but recent studies showed that they can also increase surface albedo. Indeed, for most croplands in Europe, the vegetation albedo is higher than that of bare soil (Campbell and Norman, 1998; Carrer et al., 2014). Therefore, the introduction of CC during fallow periods can lead to an increase of surface albedo and thus to a negative albedo-induced radiative forcing (RF_α) which correspond to a cooling effect. Kaye and Quemada, (2017) estimated the climatic impact of the CC at a field scale by considering carbon storage effects, N₂O direct and indirect

fluxes, emissions associated to field operations and albedo effects. They show that the CC albedo effect could induce a $RF\alpha$ equivalent to 12 - 46 $gCO_2.m^{-2}.yr^{-1}$. Nevertheless, as in other studies (*e.g.* Lenton and Vaughan, 2009), they used a constant atmospheric transmittance while it is known to vary temporally and spatially. Sieber et al., (2019) highlighted the importance of considering those variations because it could lead to wrong RF estimates and even resulting in a warming instead of a cooling effect. Later Carrer et al., (2018) estimated that the $RF\alpha$ induced by the European cropland albedo increase following the introduction of CC would be equivalent to 16 - 20 $gCO_2.m^{-2}.yr^{-1}$ which is consistent with estimates from Kaye and Quemada, (2017) (12 - 46 $gCO_2.m^{-2}.yr^{-1}$). One major difference between the two studies is the calculation of a dynamic (spatially and temporally) atmospheric transmittance in Carrer et al., (2018). Nevertheless, in their study, Carrer et al., (2018) only consider the introduction of CC after a winter crop and before a summer crop, while CC can also be introduced between two summer crops. Also, the albedo products used in their study were snow-free leading to an overestimation of the mitigation potential over areas covered by snow. More recently Lugato et al., (2020) overpassed those issues and showed that, considering snow cover, the radiative mitigation potential of CC would be between -7 and 12 $gCO_2.m^{-2}.yr^{-1}$. Those studies tend to show that CC can be seen as a Natural Climate Solution (Griscom et al., 2017) that combines progressive and reversible SRM and CDR effects as encouraged by the IPCC (2014) report.

Furthermore, several studies (Poeplau and Don, 2015; Tribouillois et al., 2018 ; Lugato et al., 2020) have analysed the impact of CC on soil SOC storage and have shown a gradual soil SOC increase for the first 45-50 years (up to a maximum soil carbon storage capacity). However, this increase in SOC could result in a gradual darkening of the soils (Cierniewski et al., 2018; Genesio et al., 2012; Meyer et al., 2012a). Yet, none of the studies addressing the direct albedo effect of cover crops considered this darkening effect.

This article can be considered as a companion paper of Carrer et al., (2018) and offers a further analysis of the impact of CC on the albedo induced radiative forcing by considering three important questions raised in Carrer et al., (2018): i) how feasible is it to extend the favourable periods for the introduction of the cover crops and what would be the consequence in terms of albedo effect ? ; ii) what would be the impact of snow cover in the presence of cover crop on radiative forcing ? ; and iii) what could be the consequences of an increase in soil organic matter induced by cover crops on the medium and long term albedo effects ? Moreover, in their study, Carrer et al., (2018) only analysed 3 years of simulation, while 100 years are considered here in order to analyse the effect of soil darkening that occurs on the long term.

In the following section, the data and the model are presented along with the experimental protocol. Then the results are presented and discussed. Finally, we conclude with a discussion about the advantage/inconvenient of such a practice as well as the limitations of the simulated scenarios.

3.3. Materials and methods

3.3.1. Data

3.3.1.1. Climatic data

Estimating top-of-atmosphere radiative forcing resulting from changes in surface albedo ($RF\alpha$) requires meteorological data of seasonal incoming shortwave radiation (SW_{in}) and of atmospheric transmittance (T_A). The ERA-5 products (Hersbach et al., 2020) were used for this purpose. Those data (<https://cds.climate.copernicus.eu>, last access XX/XX/XXXX) are available at global scale, at an hourly time step and at a spatial resolution of $1/4^\circ$ (ERA5, *i.e.* solar radiation) or $1/10^\circ$ (ERA5-Land, *i.e.*

precipitation). The T_A was estimated for each grid point on a daily basis as the ratio between SW_{in} and the incoming solar radiation at TOA (R_{TOA}). Since the CC emergence is conditioned by rainfall, ERA-5 data of total precipitation were used. Finally, in order to assess the CC albedo effect when snowfall occurs, the snow depth from the ERA5-Land product was also used.

3.3.1.2. ECOCLIMAP classification

To define the areas and periods of potential CC introduction, the ECOCLIMAP classification (Faroux et al., 2013; Masson et al., 2003) was used. This database provides, all over Europe and at a spatial resolution of 1 km, the fraction of C3 and C4 crops as well as the fraction of bare soil. Since the proposed method aims at simulating cover crop introduction between two cash crops (either summer or winter crops) a correction was applied on the ECOCLIMAP C3 and C4 crop fractions. Indeed, for the purpose of this approach, crops have to be distinguished according to their growth period (*i.e.* winter or summer crop) rather than according to their photosynthesis types (C3, C4). As in Carrer et al., (2018), a correction factor was thus defined for each country from the fraction of C3 plants in ECOCLIMAP and the fraction of winter crops of the 2011 Eurostat database (<https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/agriculture/data/database>, last access XX/XX/XXXX). This correction factor was then applied to each pixel of the associated country.

3.3.1.3. Vegetation indices and albedo products

Assessing $RF\alpha$ induced by the CC requires to estimate changes in surface albedo following their introduction in the crop rotations. To do so, data on bare soil and vegetation albedos as well as vegetation indices for cropland are needed.

The MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data (MCD43FG) from AQUA and TERRA (Sun, 2017) provides gap-filled snow-free albedo products. But the current spatial resolution ($\sim 1\text{km}$ at the Equator) of these products is not sufficient to meet the objectives of simulating CC introduction. To address this issue, Carrer et al., (2014) retrieved separate bare soil (α_{BS}) and vegetation (α_{VEG}) albedos and vegetation indices (veg) of up to 11 co-existing vegetation types (grass, evergreen, summer crop, etc.) from MODIS products, using a Kalman-Filter method, and the ECOCLIMAP classification (see Section 2.1.2). This led to a global soil and vegetation albedo mapping for cropland at a temporal resolution of 8-day over the period 2001-2010 and at $1/20^\circ$ resolution. The total albedo α_{TOT} is thus obtained as a combination of α_{BS} , α_{VEG} and of the vegetation indices (see section V-3.3.2.2).

To assess the impact of snow and of the progressive soil darkening following CC introduction on $RF\alpha$, the method used in Carrer et al., (2018) was adapted.

Snow albedo - Since the albedo products from Carrer et al., (2014) are snow-free and because Kaye and Quemada, (2017) and more recently Lugato et al., (2020) highlighted the importance of taking the snow cover effect into account to estimate the CC $RF\alpha$ effect, the impact of snow cover has been introduced in the proposed approach. The ERA-5 snow depth was used to estimate surface albedo as it is done in Lugato et al., (2020). Between 0 and 21 cm of snow, the bare soil albedo for the fallow period or under the crop/CC is considered to be the albedo of the snow which is fixed to a 0.65 constant value ($\alpha_{BS}=0.65$). In this case, the introduction of CC which have usually α_{VEG} value around 0.2-0.3 (smaller than 0.65) lead to a total surface albedo (α_{TOT}) decrease (see Eq. V-1). Above 21 cm, the snow is assumed to cover all the surface with vegetation and soil. In this case, $\alpha_{TOT}=0.65$ and the impact of CC introduction becomes null for these periods.

Soil darkening effect - To simulate the decrease in soil albedo associated to the increase in Soil Organic Carbon (SOC) content following the introduction of CC, several assumptions were made. First, we considered that the CC biomass was always incorporated into the soil and that the albedo of the soil was inversely proportional to the SOC content (Cierniewski et al., 2018; Genesio et al., 2012; Meyer et al., 2012a). We used results from Poeplau and Don, (2015) and Tribouillois et al., (2018) in which the authors used respectively the RothC soil model (Coleman and Jenkinson, 1996b) and the STICS crop model (Brisson et al., 2003a) to simulate SOC sequestration dynamics following the incorporation of CC over 50 years. After this period, the authors stated that the soil reaches a new equilibrium and that no more carbon could be stored in the soil. This result is consistent with the studies from Poeplau and Don, (2015), Pellerin et al., (2019) and Lugato et al., (2020). A similar temporal dynamic of SOC sequestration as in Poeplau and Don, (2015) and Tribouillois et al., (2018) was used to determine the dynamic in bare soil albedo (α_{BS}) decrease.

To define the minimum value of α_{BS} after 50 years of CC introduction for a given location, and its associated seasonal cycles (amplitude), we used as a reference the pixel which has today the lowest α_{BS} in the study area. This pixel is located over chernozem soils in Romania. This chernozem soil area is well-known for being one of the two regions in the world with highest SOC content. Because uncertainty exists concerning the efficiency of CC to sequester SOC and its consequences in terms of α_{BS} decrease, 3 different thresholds were considered: 100, 80 and 50 % of the decrease in the initial α_{BS} mean value and amplitude to reach the one observed in Romania, in order to study the sensitivity of the results to this threshold.

3.3.2. Calculation of the CC albedo effect

The determination of the regions and the periods of CC introduction as well as cropland albedo changes and associated gains were estimated following the methodology proposed by Carrer et al., (2018).

3.3.2.1. Regions and periods of cover crop introduction

In most of Europe, the cultivated crops can be split into 2 categories; winter crops (sown in fall and harvested in early summer) and summer crops (sown in spring and harvested in fall). To simulate the introduction of CC, the crop rotations between summer and winter crops had thus to be rebuilt. From the ECOCLIMAP derived vegetation indices of the winter and the summer crops, vegetation indices corresponding to the four possible crop rotations between winter and summer crops were rebuilt, *e.g.* winter-winter, summer-summer, winter-summer and summer-winter (hereafter noted R_{WW} , R_{SS} , R_{WS} and R_{SW}). The Figure V-1 presents these 4 crop rotations which are characterized by a fallow period during which CC can be introduced following agronomical rules and considering the vegetation indices (see V-3.3.1.3). The R_{SW} and R_{WS} are the same rotations with one-year shift and the CC are only introduced after the winter crops and before the summer crops on these rotations. The fallow period after a summer crop and before a winter crop is generally too short for a CC introduction (see Fig. V-1).

For each considered pixel of the study area containing a crop fraction, crop rotation fractions were estimated based on the Eurostat national statistics [agr_r_crop] and agronomic expertise as in Carrer et al., (2018). To define the fraction of the main crop type (*e.g.* winter crop) in a given pixel that is rotated with the other one (*e.g.* summer crop), we set the following rule: « only X% of the main crop type is in rotation with the other crop type, the rest being in rotation with the same crop type (*i.e.* R_{WW} and/or R_{SS}) ». X was defined for each country (see Carrer et al., (2018) for more details). Note that in this study, only pixel containing at least 20% of crop were considered to rebuilt crop rotations.

	Year n	Year n+1
--	--------	----------

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
R _{SS}	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
R _{WW}	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
R _{SW}	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
R _{WS}	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figure V-1 : Possible crop rotations between winter and summer crops: summer-summer (R_{SS}), winter-winter (R_{WW}), summer-winter (R_{SW}) and winter-summer (R_{WS}). Summer and winter crops correspond respectively to black and grey boxes. Potential periods of CC introduction are represented by green boxes. Note that these periods and durations vary spatially in Europe.

In order to simulate the development and the presence of the CC, vegetation indices (veg_{CC}) and albedo (α_{VEG_CC}) of CC were defined following rules based on the French ‘4p1000’ national expertise scenario (Pellerin et al., 2019):

- If the sowing date of the crop following the CC occurs before early fall (e.g. 21th of September), at least one month of bare soil is required before the sowing of the following crop causing an early CC destruction.
- If the sowing date of the crop following the CC occurs after early fall (e.g. in spring when considering summer crops), no fallow period is needed before the next crop. The CC is destroyed at the same time as the sowing of the following crop.
- The value of α_{VEG_CC} does not exceed 0.95 of the maximum value of α_{VEG} .
- veg_{CC} is defined by a constant value corresponding to 0.95 of the maximum vegetation index of the winter crop of the same pixel and by a linear interpolation the firsts 32 days (4×8 days) to reach this value and which correspond to the CC development.

3.3.2.2. Radiative forcing calculation

RF α is estimated on a daily basis from the difference in albedo between a baseline scenario (corresponding to 2001-2010 observations, i.e. without cover crops) and the albedo resulting from CC introduction at some stage of the fallow period. The albedo of the cropland equal to α_{TOT} (or α_{CC} if there is CC introduction) is estimated as:

$$\alpha_{TOT} = \alpha_{VEG} * veg + \alpha_{BS} * (1 - veg) \quad (V-1)$$

$$\alpha_{CC} = \alpha_{VEG_CC} * veg_{CC} + \alpha_{BS} * (1 - veg_{CC}) \quad (V-2)$$

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_{CC} \quad (V-3)$$

Where α_{VEG} is the vegetation albedo of the crop, α_{VEG_CC} is the CC albedo, veg is the crop rotation vegetation index, veg_{CC} is the CC vegetation index, α_{BS} is the bare soil albedo. veg_{CC} and α_{VEG_CC} are defined following the rules defined in section V-3.3.2.1.

Note that constraining the albedo of CC below the maximum of observed vegetation albedo tends to minimize their radiative mitigation potential. Indeed, if CC are used to increase cropland albedo, species with high albedo could be used as it is proposed in Sakowska et al., (2018). In this study, they considered a chlorophyll mutant soybean with an albedo of 0.29.

Once the change in surface albedo is estimated, the albedo induced radiative forcing is calculated as:

$$RF = -SW_{in} * T_A * \Delta\alpha \quad (V-4)$$

With SW_{in} the shortwave incoming global radiation, T_A the atmospheric transmittance. Since T_A is not directly provided in the ERA-5 database, we estimated it as:

$$T_A = SW_{in} / SW_{TOA} \quad (V-5)$$

3.3.2.3. Conversion into equivalent CO₂

In the objective of homogenising the $RF\alpha$ with other CC effects such as carbon storage or GHG emissions effects, the $RF\alpha$ was converted into equivalent CO₂. To do so, the Global Warming Potential (GWP) method was used here. This metric has already been used to estimate the albedo-induced climatic impact (Cherubini et al., 2012; Meyer et al., 2012a). It considers the cumulative RF induced by an effect (*i.e.* change in albedo) relative to that of the CO₂ at a specific time horizon (TH). GWP is defined as:

$$GWP = \frac{\int_{t=0}^{TH} RF_{TOA}(t) dt}{k_{CO_2} \int_{t=0}^{TH} y_{CO_2}(t) dt} \quad (V-6)$$

Where GWP is expressed in kgCO₂-eq.m⁻², k_{CO_2} is the CO₂ radiative efficiency in the atmosphere (W.m⁻².kg⁻¹) at a constant concentration (389 ppm ; Joos et al., 2013) and $y_{CO_2}(t)$ is the CO₂ impulse-response function.

3.3.3. Simulation scenarios

Based on the different data presented in section V-3.3.1 and on the rules for introducing the CC developed section V-3.3.2.1, different scenarios have been simulated and analysed. The Figure V-2 summarizes the experiments set-up for this study.

Scenario $S_{Carrer_et_al}$ - The first scenario is based on the work of Carrer et al., (2018). In that study, the authors estimated the radiative impact of the introduction of CC using the same model as in this study. They simulated CC introduction on R_{SW} and R_{WS} (see Fig. V-1) which usually correspond to the crop rotations having the longest fallow period. The maximum duration of introduction of the CC was fixed to 3 months before their destruction and incorporation in the soil by the farmer. Initially the simulation was performed over 3 years only. For the purpose of this study, the model was modified to increase the simulation period up to 100 years. As no climate change scenario was applied, we replicate ten times the 2001-2010 climatic data. Moreover, a threshold limiting the emergence of CC below 30 mm of rainfall the month following the introduction has been added, as suggested by Brisson et al., (2009).

Scenario $S_{CC_extension}$ - From the $S_{Carrer_et_al}$ scenario, the model was modified in order to introduce the CC on the R_{SW} , R_{WS} but also on R_{WW} and R_{SS} when the fallow period lasted for at least 2.5 months (see Fig V-1). The duration of the CC introduction is only limited by the intercropping duration. This scenario constitutes the CC extension scenario: $S_{CC_extension}$.

Scenario S_{Snow} - Based on the $S_{CC_extension}$, another experiment was carried out and allowed to take the snow cover effect on the $RF\alpha$ into account. In this scenario, the albedo of the soil has been modified as explained in section V-3.3.1.3, for the pixels covered by snow.

Scenario S_{Alb_dec80} - Finally, starting from the S_{Snow} , we analysed how the progressive decrease in soil albedo following the repeated incorporation of CC biomass in the soil could affect the $RF\alpha$. This scenario considered a threshold of 80% of the mean value and of the amplitude of the darkest soil in the study area (*i.e.* chernozem soils) for simulating soil albedo decrease (see V-3.3.1.3). This scenario is the

soil albedo decrease scenario: $S_{Alb_dec_80}$. Because uncertainties exist concerning the efficiency of CC to sequester SOC and its consequences in terms of α_{BS} decrease, 2 additional scenarios were simulated considering other thresholds of 100 and 50 %, hereafter named $S_{Alb_dec_100}$ and $S_{Alb_dec_50}$ respectively. These two scenarios were used to performed a sensitivity analysis of the $RF\alpha$ to this effect (see V-3.4.2).

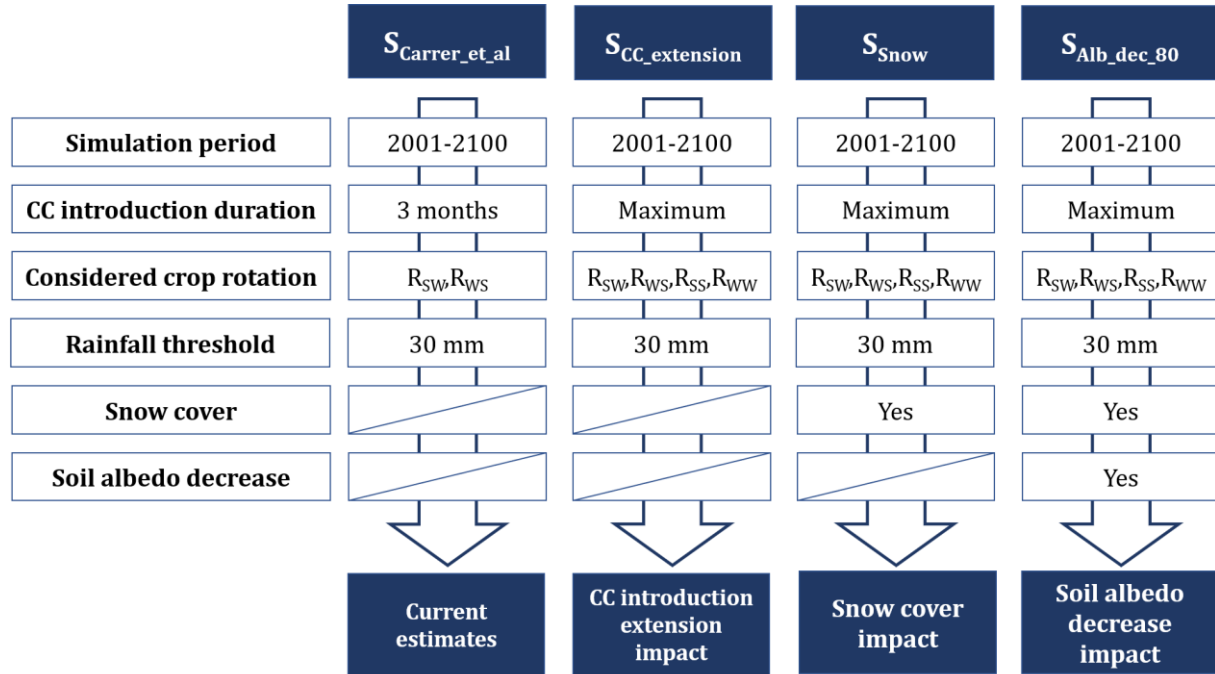


Figure V-2 : List of simulated experiments and their characteristics.

3.4. Results

The first part of this section is dedicated to the analysis of each simulated scenario. Then a sensitivity analysis of the soil albedo decrease effect is proposed.

3.4.1. Analysis of the results for each scenario

The Figure V-3 shows the mean albedo changes following CC introduction for each country concerned by the study area as well as the cover crop introduction areas and the mean $RF\alpha$ (expressed by unit of CC introduction area) and GWP for each country and for the four scenarios.

3.4.1.1. Impact of the extension of the duration of CC introduction

In the $S_{CC_extension}$, CC are introduced as described in section 3.3.2.1 whenever it is possible in each crop rotation (see Fig. V-1). While the potential CC introduction area is estimated at 3.9% of the total area (EU28 + Switzerland and Norway) according to the $S_{Carrer_et_al}$, it represents 13.0% in the $S_{CC_extension}$. In the scenario that did not consider rainfall limitation, Carrer et al., (2018) estimated this area to cover 4.2% of the total area of study. Therefore, the difference with the $S_{Carrer_et_al}$ comes from the consideration of rainfall as a limiting factor for the CC development.



Figure V-3 : 100-year average of the albedo changes (A), cover crop introduction area (B), albedo-induced radiative forcing (C) and Global Warming Potential (D) simulated for the 4 scenarios considering that CC are maintained during 100 years.

The areas of CC introduction per country in the $SCC_{extension}$ are rather proportional to the national area of arable lands. The countries concerned by the largest CC introduction area are thus Poland, France, Germany and Romania with respectively 96582, 89247, 87383 and 54608 km² (see Fig. V-3 B). The countries showing the highest $RF\alpha$ per surface unit (m²) are Portugal, Cyprus, Greece, and Bulgaria (see Fig. V-3 C). These countries are among those that receive the highest radiation and that have the highest atmospheric transmittances, which explains the high $RF\alpha$. For the opposite reasons, the lowest

RF α per surface unit are observed in Northern countries such as Denmark or England. The GWP induced by the CC is a combination between the RF α and the area on which CC can be introduced (see Eq. V-6). In the $S_{CC_extension}$, the three countries exhibiting the highest GWP (mitigation potential) are France (1.59 MtCO₂-eq.yr⁻¹), Romania (1.05 MtCO₂-eq.yr⁻¹) and Italy (0.73 MtCO₂-eq.yr⁻¹) (see Fig. V-3 D). According to the $S_{CC_extension}$ and considering that CC are maintained during 100 years, this practice could be introduced on 58.2% of the arable land of the study area (EU-28 + Norway and Switzerland). It would increase the surface albedo by 1.17E-02 and it could induce a RF α of -0.62 W.m⁻², equivalent to a mitigation potential of 6.74 MtCO₂-eq.yr⁻¹ *i.e.* 3 times larger compared to $S_{Carrer_et_al}$ (2.17 MtCO₂-eq.yr⁻¹).

3.4.1.2. Impact of snow cover

In order to refine the estimates of the $S_{CC_extension}$, the snow cover was considered in the S_{Snow} allowing to identify the most affected countries. Compared to the $S_{CC_extension}$, the areas of introduction of the CC are the same (see Fig. V-3 B) and the difference in mitigation potential between the two scenarios only comes from the differences in snow effect (see Fig V-2 and section V-3.3.3). The southern countries (Portugal Cyprus, Spain, etc.) are not impacted by the snow, but most of the other countries are highly impacted, even countries that are not concerned by frequent snowfall. As a result, the average albedo change over the total study area became negative (-8.32E-03). However, as most of the countries with large areas of CC introduction are still concerned by an increase in surface albedo (9.42E-03, 6.10E-03 and 1.81E-03 for respectively France, Spain and UK) the total estimated RF α over the total area of study remains negative (-0.06 W.m⁻²) and thus corresponds to a cooling effect equivalent to 0.99 MtCO₂-eq.yr⁻¹ *i.e.* a 85% loss compared to the $S_{CC_extension}$.

3.4.1.3. Impact of the soil albedo decrease

According to the $S_{Alb_dec_80}$ scenario, all the countries exhibit decreases in surface albedo due to the darkening of their soil in spite of the soil coverage effect of the CC. Consequently, the immediate effect of the CC albedo increase following the CC introduction is counterbalanced after a few years by the soil darkening effect. At European scale, the mean decrease in surface albedo over the 100 years of study is equal to -2.97E-02 (see Fig. V-3 A). This results in a positive RF α of 1.53 W.m⁻² (see Fig. V-3 C) and to a strong warming effect of -19.98 MtCO₂-eq.yr⁻¹ (see Fig. V-3 D); *i.e.* a -396% loss compared to the $S_{CC_extension}$. The impact of the soil darkening effect on the RF α and on the GWP is here again proportional to the surface of arable land of each country. The countries contributing the most to the warming effect at European scale are now Romania, France, Spain and Poland. The countries exhibiting the highest RF α are those having the brightest soils and the highest incoming solar radiation, *i.e.* Spain, Portugal, Malta and Cyprus.

3.4.2. Sensitivity analysis to the changes in soil albedo

Several assumptions were made to simulate the $S_{Alb_dec_80}$ (see section V-3.3.1.3). In order to analyse the impact of these assumptions on the surface albedo, RF α and GWP, other thresholds for the soil darkening effect were analysed. These scenarios are named $S_{Alb_dec_50}$ and $S_{Alb_dec_100}$ corresponding to thresholds of 50% and 100% for the total soil C storage effect.

Figure V-4 shows the temporal dynamic of the bare soil albedo estimated at the location used as a reference for the minimum albedo value in the area of study. The reference site is located in Romania in a region well known for its high SOC content (chernozem soil – see section V-3.3.1.3). Figure V-4 also shows examples of soil albedo dynamics affected by soil darkening according the 3 thresholds for 3 pixels located in France, Germany and Spain. These 3 pixels were selected because their original bare soil albedo dynamics were quite different. The pixel located in Spain correspond to an agricultural area

characterized by very bright soil. Figure V-4 D shows that for such a bright soil (as in most parts of Spain, largely concerned by calcisols) the decrease in soil albedo and of its seasonal dynamic is quite strong whatever the threshold considered. As a result, in Spain, the decrease in soil albedo was of higher amplitude than the α increase that could be achieved by the implementation of CC. The consequence was a decrease in mean surface albedo (not shown). On average, and considering an 80% threshold, 50 years after the CC introduction, the mean surface albedo decrease was of 0.077, 0.059 and 0.131 for the pixels located in France, Germany and Spain, respectively.

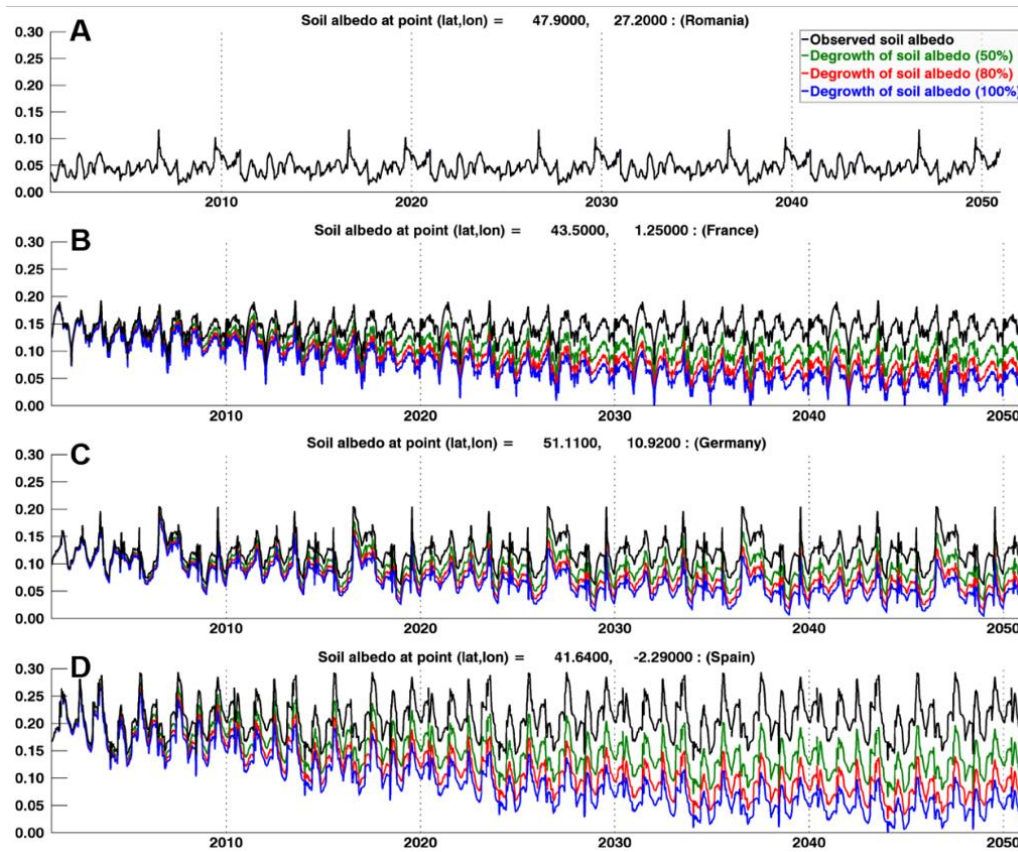


Figure V-4 : A- Reference bare soil albedo dynamic over 50 years for a location in Romania. In B, C and D reference bare soil albedo dynamics (in black) and for soils that progressively reach 50 (green), 80 (red) and 100% (blue) of soil carbon storage capacity following CC introduction the first year of simulation in France, Germany and Spain, respectively. Latitude and longitude coordinates of the center of each pixel are indicated in the title of the subplots.

Figure V-5 presents on the left the mean annual soil albedo used in $S_{\text{Carrer_et_al}}$, S_{Snow} and $S_{\text{CC_extension}}$ experiments (*i.e.* with no impact of the soil darkening). On the right, Figure V-5 shows the mean annual soil albedo after 50 years in $S_{\text{Alb_dec_100}}$, $S_{\text{Alb_dec_80}}$, and $S_{\text{Alb_dec_50}}$. The $\Delta\alpha$ between the reference soil albedo and the estimated ones are -0.0812, -0.0653 and -0.0412 respectively for $S_{\text{Alb_dec_100}}$, $S_{\text{Alb_dec_80}}$ and $S_{\text{Alb_dec_50}}$.

The Figure V-6 shows the mean $\text{RF}\alpha$ (per unit of CC surface) over Europe for the 3 scenarios of soil albedo darkening. For each scenario, the $\text{RF}\alpha$ switches to positive values after only one or a few decades of introduction of the CC because soil albedo decrease is faster the firsts years. This means that the direct albedo benefit induced by the CC introduction (soil coverage effect) is counterbalanced by the decrease in soil albedo after a few years only. 10 years after the CC introduction, all the scenarios show positive $\text{RF}\alpha$, and after 50 years $\text{RF}\alpha$ are equal to 1.06, 1.72 and 2.15 W.m^{-2} for $S_{\text{Alb_dec_100}}$, $S_{\text{Alb_dec_80}}$,

and $S_{\text{Alb_dec_50}}$, respectively.

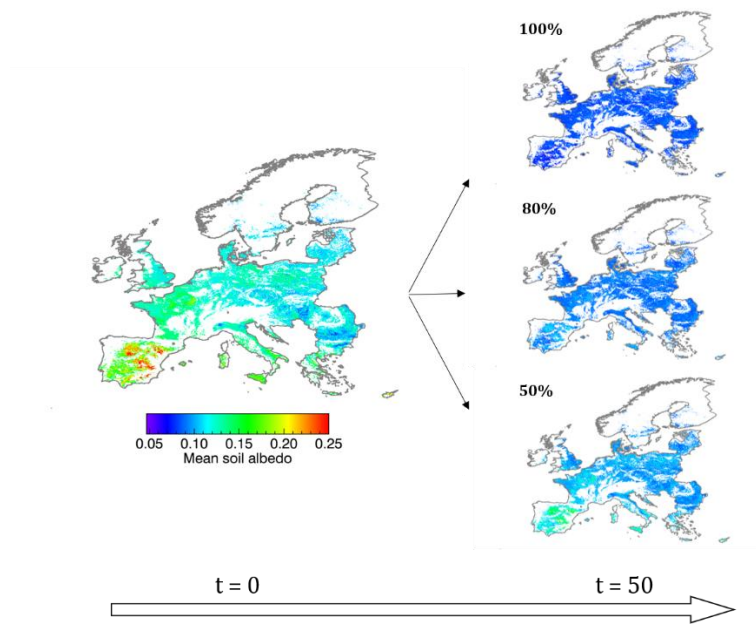


Figure V-5 : On the left, mean annual reference soil albedo at $t=0$ (not yet effected by darkening) and simulated soil albedo after 50 years of CC introduction corresponding to the new SOC content equilibrium.

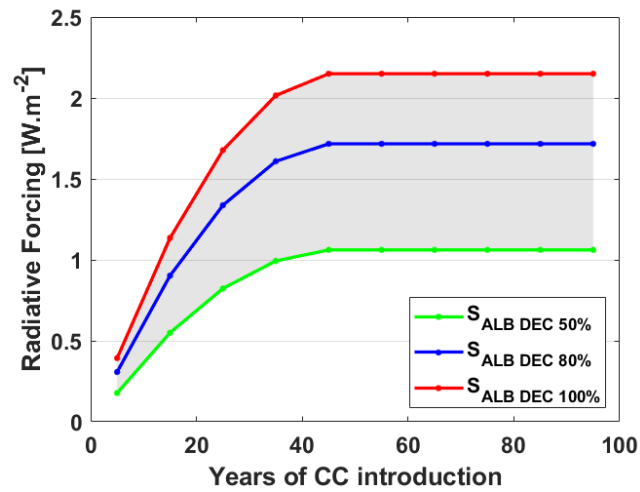


Figure V-6 : Ten-year averaged $\text{RF}\alpha$ simulated with $S_{\text{Alb_dec_50}}$ (green line), $S_{\text{Alb_dec_80}}$ (blue line) and $S_{\text{Alb_dec_100}}$ (red line). $\text{RF}\alpha$ is here expressed by unit of CC introduction area.

2.5. Discussion

In this study, we simulated the surface albedo change and the associated $\text{RF}\alpha$ following the introduction of CC at European scale according to the extension CC scenario defined in Pellerin et al., (2019), *i.e.* implementation of CC in all

agricultural areas whenever it is possible ($S_{CC_extension}$ scenario). A threshold of 30mm of rain the month following the potential CC introduction was required for CC emergence. According to the $S_{CC_extension}$, the CC could induce a $RF\alpha$ of -0.62 W.m^{-2} of introduced CC. In this scenario, we estimate that CC can potentially be introduced over 13.0% of the total surface area of the study (EU28 + Norway + Switzerland) - representing 68.8% of the total agricultural area. In the $S_{CC_extension}$ scenario, CC were introduced during all fallow periods except after a summer crop and before a winter crop (the fallow period is usually too short in this case). Considering that this practice would be maintained over 100 years, the mitigation potential was estimated to be $6.74 \text{ MtCO}_2\text{-eq.yr}^{-1}$. Expressed by area of introduced CC, the mitigation potential is equivalent to $10.8 \text{ gCO}_2\text{.m}^{-2}\text{.yr}^{-1}$. This value per CC surface unit is lower than the first estimates founded by Carrer et al., (2018) (*i.e.* $15.91 \text{ gCO}_2\text{.m}^{-2}\text{.yr}^{-1}$) because CC are here introduced over larger areas but often for shorter periods. Still the cumulated effect is higher than in Carrer et al., (2018).

Since snow-free albedo products were used as input in the proposed approach, a scenario considering the impact of the snow cover on surface albedo was simulated (S_{Snow}). This scenario was inspired from the study of Lugato et al., (2020). Our results suggest that the $RF\alpha$ of CC would decrease by 85% compared to the $S_{CC_extension}$. This result is consistent with Lugato et al., (2020) who found a mitigation potential decrease of 77% when considering the snow cover. However, the impact of CC on snow cover would need further analysis in order to estimate for example the impact of CC on snow melt. Indeed, thanks to in situ data, Hunter et al., (2019) demonstrated that CC introduction over snow-covered areas could induce a cooling effect notably because CC allow the snow cover to remain on the ground longer. Finally, the snow products used in this study are known to overestimate the snow depth (Orsolini et al., 2019a). Other snow products should be used to improve the snow effect in the proposed approach.

Moreover, the decrease in soil albedo resulting from CC biomass incorporation in the soil has been simulated in this study ($S_{Alb_decr_80}$). Considering that agricultural soils would have reached their maximum SOC storage potential after 50 years of CC introduction, and that it would result in 80% decrease in soil albedo compared to the darkest soil observed in the study area, our study shows that this practice would lead to a positive $RF\alpha$ equivalent to 1.53 W.m^{-2} per area unit of CC. Those results suggest that the soil albedo decrease could impact surface albedo at a magnitude at least equivalent to the short-term increase in surface albedo following the introduction of CC (soil coverage effect). This result suggests that once CC are introduced to increase SOC content, soils should be covered permanently by active vegetation or crop residues in order to avoid the influence of soil darkening on the $RF\alpha$.

However, the vegetation indexes used in this study may overestimate the soil darkening effect. Indeed, the climatological vegetation indexes allowing to estimate the total albedo of a pixel (see Eq. V-2), almost never reached 0 nor 1 over the study area. This specificity comes from the Kalman filter approach producing climatological vegetation indices for each land use type that lack of realism concerning the crops. In reality, these indices should be equal to one when the vegetation is fully developed and equal to 0 during fallow periods, over bare soils. As it is not the case for arable lands, the soil albedo always has an impact when estimating the total surface albedo, it thus overestimates the effect of the soil albedo decrease following CC introduction in this scenario. This specificity is accounted for in the reference albedo products which make the surface albedo realistic, but when the soil albedo dynamic is modified, the total albedo is too affected by the latter. A similar exercise based on corrected vegetation indices (ranging from 0 to 1) could result in more accurate results for the $S_{Alb_decr_80}$.

Finally, in their study, Tribouillois et al., (2018) estimated that, compared to bare soil, CC could improve the GHG budget of croplands in France by $31.5 \text{ gCO}_2\text{-eq.m}^{-2}\text{.yr}^{-1}$ in average over 45 years of

simulation considering the impact of CC on C sequestration and on N₂O emissions. They stated that the difference between the two management practices tended to stabilize before 45 years. On a 100-year basis, those estimates would be equivalent to 14.2 gCO₂-eq.m⁻².yr⁻¹, while the impact of albedo change considering the S_{Alb_dec_80} is equivalent to -32.1 gCO₂-eq.m⁻².yr⁻¹. This study shows that the potential effect of soil albedo decrease has to be taken into consideration for implementing more efficient climate change mitigation strategies on the medium or long term once management practices increasing SOC storage are adopted.

2.6 Conclusion

In this study we demonstrated that cover crops introduction at European scale could have a significant mitigation potential. We show that cover crops mitigation potential could reach 6.74 MtCO₂-eq.yr⁻¹ when they are introduced in all favourable fallow periods, and that their effect could be limited to 0.99 MtCO₂-eq.yr⁻¹ by considering an extreme snow scenario. Finally, our study shows that the soil darkening induced by repeated cover crop biomass incorporation in the soil could reverse the cover crop short term cooling albedo effect to a warming effect of about -19.98 MtCO₂-eq.yr⁻¹ at European scale.

Unlike most of the geoengineering technics (Crutzen, 2006; Gray et al., 2008; Latham et al., 2008; Robock et al., 2009; Watson et al., 2008), the proposed approach has several advantages. First this technic could be introduced progressively in order to avoid undesirable effects such as strong climate feedbacks. Then, this agricultural practice, beside its potential benefit climate impact offers a range of ecosystem services. However, our study also alerts on the risk that a decrease in soil albedo following the incorporation of cover crops biomass in the soil represents in terms of albedo antagonist effect at medium term and more generally on the importance of covering the croplands by permanent vegetation or crop residues cover once farming practices increasing soil organic carbon storage are initiated.

♠ Ma contribution

La prise en compte de l'assombrissement du sol a été l'objet d'un stage de master 2 réalisé par Raphaël Garisoain que j'ai co-encadré. Une fois la décroissance d'albédo de sol introduit dans la chaîne, j'ai réalisé les différents scénarii de simulation permettant l'élaboration de l'étude. J'ai ensuite écrit cette ébauche d'article qui aurait dû être soumis pendant la thèse mais le temps ne l'a pas permis. J'ai réalisé toute la rédaction de cet article ainsi que les graphes qui le constitue. J'ai également fait tout le travail d'analyse des résultats et de recherche de perspectives. Cet article devrait être soumis à la fin de ces travaux de thèse.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♣ Le modèle RFCC a été modifié pour i) pouvoir introduire des CI sur toutes les périodes de sol nu où cela était possible, ii) simuler les effets neige et iii) réaliser des simulations sur 100 ans, afin de pouvoir quantifier l'effet de l'assombrissement du sol.
- ♣ Selon le scénario d'extension des cultures intermédiaires et en considérant que cette pratique est maintenue 100 ans, les CI pourraient représenter un potentiel d'atténuation de $6.74 \text{ MtCO}_2\text{-eq.yr}^{-1}$ à l'échelle de l'Europe.
- ♣ La prise en compte de la couverture neigeuse diminuerait de 85% le potentiel d'atténuation mais ce scénario surestime de toute évidence l'effet de la neige.
- ♣ La décroissance d'albédo du sol suivant l'incorporation de matière organique pourrait entraîner une forte diminution d'albédo de surface et donc engendrer un RF positif pouvant contrebalancer l'effet refroidissant des CI.
- ♣ Nous pensons qu'il faut promouvoir une couverture permanente des sols agricoles afin de maximiser l'effet refroidissant des CI sur le climat tout en limitant l'effet de l'assombrissement des sols. Cette recommandation est valable pour toutes les autres pratiques pouvant engendrer un stockage de carbone dans le sol

4. Conclusion de l'article en français

Dans cette étude, nous avons démontré que l'introduction de cultures intermédiaires à l'échelle Européenne pourrait représenter un potentiel d'atténuation significatif. Nous montrons que ce potentiel pourrait atteindre $6.74 \text{ MCO}_2\text{-eq.yr}^{-1}$ en étendant les périodes favorables d'introduction de CI et pourrait tomber à $0.99 \text{ MtCO}_2\text{-eq.yr}^{-1}$ en considérant des facteurs de limitations extrêmes engendrés par la neige. Enfin, notre étude discute aussi de l'effet antagoniste que pourrait représenter l'assombrissement du sol qui semble inverser le signe de l'atténuation, en passant d'un effet refroidissant équivalent à $6.74 \text{ MCO}_2\text{-eq.yr}^{-1}$, à un effet réchauffant de $-19.98 \text{ MCO}_2\text{-eq.yr}^{-1}$.

À l'inverse des autres techniques de géoingénierie (Crutzen, 2006; Gray et al., 2008; Latham et al., 2008; Robock et al., 2009; Watson et al., 2008), l'approche proposée présente plusieurs avantages. Premièrement, cette technique peut être introduite progressivement dans le but d'éviter tout effet indésirable comme de fortes rétroactions climatiques. Ensuite, cette pratique agricole, outre les bénéfices climatiques qu'elle engendre, offrent un grand nombre de services écosystémiques. Toutefois, notre étude alerte sur le risque climatique qu'une décroissance d'albédo du sol représente suite à l'incorporation répétée de biomasse de culture intermédiaires dans le sol et sur l'importance de couvrir les sols agricoles de manière permanente avec une couverture végétale ou des résidus de cultures une fois que des pratiques stockantes ont été mises en œuvre.

5. Conclusion

Le modèle RFCC a été modifié afin de rendre compte de l'impact climatique pouvant être induit par l'utilisation des CI. Un nouveau scénario, inspiré de l'étude 4p1000, a été simulé et permet

d'introduire des CI sur une large partie des zones agricoles Européennes. D'après nos résultats, l'utilisation de CI pourrait entraîner un potentiel d'atténuation de $6.74 \text{ MtCO}_2\text{-eq.yr}^{-1}$ lié au changement d'albédo de surface, sur un horizon de 100 ans. Dans cette nouvelle étude, les interactions entre couverture neigeuse et CI ont été prises en compte. Cet effet pourrait réduire de 85 % le potentiel d'atténuation des CI. Néanmoins, cette prise en compte introduit certaines hypothèses fortes qui tendent à surestimer l'effet de la couverture neigeuse. On pourrait par exemple considérer que les CI ne seraient pas introduits sur des zones soumises et de longues périodes de couverture neigeuse ce qui limiterait la diminution d'albédo de surface de ces zones.

La prise en compte de l'assombrissement du sol est un phénomène qui n'a jamais été pris en compte dans ce genre d'étude (Kaye and Quemada, 2017; Lugato et al., 2020) alors qu'il pourrait impacter l'albédo de surface de façon importante (Meyer et al., 2012). Nous avons montré, dans une première approche, que la prise en compte de ce phénomène entraîne une diminution très importante des albédos pour les sols agricoles très appauvris en matière organique, et que cet effet pourrait contrebalancer l'effet radiatif refroidissant des CI. Cependant, nous suggérons que ce phénomène pourrait être contrôlé par la couverture permanente des sols agricoles, que ce soit avec de la végétation active, ou bien avec des résidus de culture laissés sur les parcelles.

Chapitre VI

Chapitre VI : Discussion

1. Préambule

Le secteur agricole est un contributeur majeur des émissions globales de GES, dont celles du CO₂. Il contribue également à modifier les états de surface (rugosité, albédo) et la répartition des flux d'énergie en surface, participant ainsi très significativement aux changements climatiques actuels. Dans le même temps, la démographie mondiale est en constante augmentation et cette tendance ne devrait pas changer d'ici la fin du siècle (Gerland et al., 2014; Lutz et al., 2001). Le monde agricole va donc devoir s'adapter pour répondre à une demande alimentaire toujours plus grande, tout en limitant son impact environnemental. Dans ce contexte, des outils sont nécessaires pour quantifier l'impact de l'agriculture sur le climat, et notamment l'effet de certains changements de pratiques, afin de pouvoir guider la transition vers des systèmes d'agriculture plus durable. Or, même si des outils, tels que la modélisation, existent aujourd'hui, ils présentent des limites (accès aux données d'entrée des modèles, incertitudes, etc.) rendant difficile l'estimation précise des effets des changements de pratiques sur de grands territoires. Des recherches plus approfondies et des innovations méthodologiques sont par conséquent nécessaires pour que ces outils de modélisation puissent faciliter l'aide à la décision. Ces travaux de thèse se sont donc intéressés à développer des modèles diagnostics spatialisés, permettant d'enrichir nos connaissances concernant le fonctionnement des surfaces agricoles, et permettant d'identifier et de quantifier l'effet de certains leviers d'action.

À ce jour, il n'existe pas d'outil capable d'estimer le bilan de C des parcelles agricoles à l'échelle spatiale de la parcelle et sur de grands territoires avec précision. Il a été vu dans la section I-1 de ce manuscrit que les estimations actuelles sont soit obtenues : i) via des approches inventaires (ou statistiques ; Ciais et al., 2010; Osborne et al., 2010) qui peuvent couvrir de grands territoires mais qui sont entachées de fortes incertitudes, ii) via des approches de modélisation agronomique (Brisson et al., 2003a; Coleman and Jenkinson, 1996b; Diepen et al., 1989a; Duparque et al., 2013; Stöckle et al., 2003a), plus précises mais qui sont difficilement applicables à de grandes zones, du fait, entre autres, de l'hétérogénéité du paysage agricole et de la nécessité d'accéder à un grand nombre d'informations (pratiques agricoles, maladies, effets climatiques, etc.) et iii) via les schémas de surface des modèles globaux (Le Moigne, 2009; Wu et al., 2016) qui permettent de couvrir de grands territoires mais dont la représentation des systèmes de cultures et pratiques reproduit mal la diversité des agroécosystèmes. Il en découle une connaissance incomplète ou imprécise du fonctionnement des parcelles agricoles et de leur contribution aux flux biogéochimiques qui constitue un frein à l'estimation des effets liés à des changements de pratiques. L'assimilation de données satellite pour contraindre les modèles agronomiques permet d'accéder à des informations sur l'état/le développement des cultures de façon fréquente et spatialisée et ainsi de lever une partie des barrières à l'estimation précise des bilans de C des surfaces agricoles.

De plus, il a été vu dans la section 2 de l'introduction générale que l'impact climatique (forçage radiatif net) des parcelles agricoles résultait de la somme des effets biogéochimiques et biogéophysique liés à leur fonctionnement. Or, très peu d'études se sont intéressées aux effets couplés liés à un changement de pratique. La plupart des études s'intéressant aux agroécosystèmes se sont penchées sur les bilans de C (Hollinger et al., 2005; Nishimura et al., 2008; Smith, 2004; Smith et al., 2010; Wang et al., 2015) ou les bilans de GES (Ceschia et al., 2010a; Kutsch et al., 2010; Ma et al., 2013), d'autres, plus rares se sont intéressées aux effets biogéophysiques (Davin et al., 2014; Luyssaert et al., 2014) mais

très peu ont étudié ces deux aspects conjointement (Ceschia et al., 2017; Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a). Or, comme certains effets peuvent entrer en synergie ou être antagonistes, la plupart des études s'intéressant à un seul effet (*e.g.* impact des changements de pratiques sur les flux de chaleur latente) risquent de fournir une vision biaisée des bénéfices climatiques liés aux changements de pratiques, et peuvent aussi mener à prioriser des leviers peu efficaces voire contre productifs.

Pour répondre à ces attentes, deux approches de modélisation ont été développées au cours de ces travaux de thèse. Un volet de la thèse s'est intéressé au développement d'un modèle agro-météorologique permettant de quantifier les productions (biomasse et rendement), ainsi que les composantes des bilans de C et d'eau des parcelles agricoles. Ce modèle permet aussi d'estimer l'impact de certaines pratiques (rotations culturales, CI, export des pailles) sur ces bilans. Un second volet de la thèse a été consacré au développement d'un modèle d'introduction de CI permettant de quantifier le forçage radiatif induit par les changements d'albédo des surfaces agricoles à court et long termes engendrés par les CI, en prenant en compte les effets de la couverture et de l'assombrissement du sol. Le couplage de ces deux approches a permis d'obtenir des estimations couplées des effets biogéochimiques (bilan de C) et biogéophysiques (effet albédo et flux de chaleur latente) liés à l'introduction de CI dans les rotations de cultures.

Les principales conclusions obtenues grâce à ces approches de modélisation sont rappelées dans les sections suivantes puis les avantages tout comme les limites de ces approches sont discutés. Enfin, les perspectives de développement pouvant permettre d'améliorer ces approches ainsi que les possibilités d'application sont abordées à la fin de ce chapitre.

2. Analyse spatialisée des composantes des bilans de C et d'eau

Afin d'estimer les flux de CO₂ et d'eau des parcelles de grande culture, un modèle agro-météorologique a été développé à partir de modèles déjà existants. Le modèle SAFY (Duchemin et al., 2008a) est un modèle agronomique, piloté par télédétection, qui permet d'estimer la biomasse et le rendement des grandes cultures. Cette approche est calibrée avec des produits satellites d'indice de végétation (GAI) afin de s'affranchir de données in situ qui ne sont pas accessibles à grande échelle (dates de semis, phénologie, problèmes de développement, stress abiotiques, etc.). Initialement développé pour le suivi de la culture de blé, cette approche a rapidement été appliquée au maïs, au soja ou encore au tournesol (Claverie et al., 2012; Baup et al., 2015 ; Fieuzal et al., 2017a). Dans un souci de meilleure gestion de la ressource en eau, un module de bilan hydrique, inspiré de la méthode FAO-56 (Allen et al., 1998), a été couplé à SAFY, donnant naissance à un nouveau modèle : SAFY-WB (Duchemin et al., 2015a). Originellement appliqué à la culture de blé, ce modèle a aussi été utilisé pour simuler d'autre culture comme le maïs (Battude et al., 2017a). À partir de ces approches et du modèle de simulation des flux de CO₂, TURC (Ruimy et al., 1996), deux nouveaux modèles ont été développés et appliqués à plusieurs cultures au cours de ces travaux de thèse : SAFY-CO₂ (Pique et al., 2020a) et SAFYE-CO₂ (Pique et al., 2020c). La décision de développer ces nouvelles versions provient du fait que dans les versions antérieures (*i.e.* SAFY, SAFY-WB), l'hypothèse qui était faite concernant le ratio photosynthèse sur respiration autotrophe, constant au cours de la saison, était erronée, ce qui engendrait un risque systématique de sous estimation de la biomasse des cultures, en particulier en fin de cycle.

La majeure partie de la thèse a donc été consacrée au développement du modèle SAFY-CO₂. Ce modèle fait intervenir des formalismes simples permettant d'estimer, au pas de temps journalier, les

productions ainsi que la photosynthèse, la respiration autotrophe, la respiration hétérotrophe ainsi que le flux net de CO₂ des grandes cultures. Sa simplicité lui permet de ne requérir qu'un nombre limité de paramètres, issus de la littérature scientifique, de mesures in situ ou déduits d'un processus de calibration, basé sur la comparaison des GAI simulés avec ceux dérivés des images satellites. Cette approche rend le modèle applicable sur de larges zones, et ne nécessite que très peu d'informations concernant les pratiques, à savoir : l'espèce cultivée (disponible via le RPG), les pratiques relatives à la gestion des pailles et aux amendements organiques. Ce modèle a été validé localement pour la culture de blé grâce à 8 années de mesures de flux de CO₂ acquises sur les sites instrumentés d'Auradé et de Lamasquère. Il a notamment été montré que le modèle était capable de reproduire, en moyenne, le flux net de CO₂ intégré à l'année avec une erreur inférieure à 20%. Pour cette même culture, l'approche a également été validée de manière spatialisée grâce à des données de biomasse et de rendement, qu'elle a réussi à reproduire avec des erreurs respectives de 27% et 21% (201 et 102 g.m⁻²) et des corrélations de 0.90 et 0.78. En comparaison à d'autres approches de modélisation, souvent plus complexes ou nécessitant un grand nombre de données in-situ (pratiques, propriétés de sols, etc.), SAFY-CO₂ offre des performances similaires concernant l'estimation des biomasses pour la culture de blé. Dans leur étude Brisson et al., (2002) ont estimé, à l'aide du modèle STICS, des biomasses de blé avec un R² de 0.78 et une erreur de 266 g.m⁻². En revanche, le modèle de culture spécifique à la culture de blé APSIM-wheat (Asseng et al., 1998b) a permis d'estimer les biomasses avec une meilleure précision (R² = 0.90) et une erreur très faible (0.101 g.m⁻²). SAFY-CO₂ étant un modèle pouvant simuler plusieurs types de culture (et non spécifique à celle du blé) et nécessitant très peu de données sur les pratiques, les performances actuellement atteintes sont donc très satisfaisantes. Ces résultats, qui constituent la section I-4, ont démontré le potentiel lié à l'assimilation des produits satellites GAI hautes résolutions dans SAFY-CO₂ pour la simulation spatialisée des composantes des bilans de C.

Afin de simuler des rotations culturales, l'approche a ensuite été appliquée aux cultures de maïs et de tournesol. La paramétrisation actuelle pour la culture de maïs nécessitera des validations supplémentaires car des problèmes sur les données de flux de CO₂ ont été identifiés. Toutefois, le modèle a pu simuler les biomasses et les rendements avec des précisions respectives de 21% (387 g.m⁻²) et 22% (226 g.m⁻²) (comparaison avec des données issues de campagnes terrains spatialisées). La paramétrisation pour la culture de tournesol a, quant à elle, pu être complètement validée dans SAFY-CO₂. Le modèle a été capable de reproduire le flux net de CO₂, acquis sur 2 années culturales, avec une bonne précision (R² = 0.87) et peu d'erreur (RMSE = 0.81 gC.m⁻².j⁻¹). La simulation de ces deux nouvelles espèces dans SAFY-CO₂ a nécessité la modification de certains formalismes spécifiques aux cultures (voir section I-6 et I-7). Des rotations de cultures peuvent donc désormais être simulées avec le modèle, donnant accès aux bilans de C pluriannuel et permettant d'étudier l'effet de ces rotations sur les stocks de C des sols agricoles.

La simulation des cultures de blé et de tournesol à l'aide de SAFY-CO₂ a permis de démontrer que les parcelles cultivées en blé se comportaient la plupart du temps comme des puits de CO₂ et avaient des bilans C proches de l'équilibre, tandis que celles cultivées en tournesol se comportaient généralement comme des sources de CO₂ et avaient un bilan C positif. En effet, la fixation de CO₂ est plus importante sur le blé (meilleure efficacité d'utilisation de la lumière et moins soumis au stress hydrique) que pour le tournesol, et la période de végétation du blé est bien plus longue que celle du tournesol ce qui induit une plus longue période où le flux net de CO₂ (GPP – R_{ECO}) est dirigé vers la parcelle.

L'analyse des flux de CO₂ acquis sur les parcelles de Lamasquère et d'Auradé avait permis de pointer l'importance d'une meilleure prise en compte des périodes d'intercultures pour la simulation des bilans de C pluriannuels. Ces périodes étaient initialement considérées comme des périodes de sol nu

pendant lesquelles seule la respiration du sol était simulée comme flux de CO_2 . Or ces périodes sont caractérisées par des alternances de sol nu et de végétation, pendant lesquelles peuvent se développer repousses, adventices ou CI. Une paramétrisation générique a donc été introduite dans le modèle afin de simuler ces végétations d'interculture, et ainsi améliorer les estimations de flux de CO_2 et de bilans annuels de C. Une seule paramétrisation a été définie car il est pour le moment impossible d'identifier la nature de la végétation d'interculture par télédétection. Cette paramétrisation générique permet toutefois d'estimer l'impact de la végétation d'interculture sur les flux de CO_2 sans aucune information, hormis celle du satellite. Il a ainsi été montré (voir section I-4.5.2.1) que la prise en compte de cette végétation permettait de diminuer largement l'erreur faite sur le flux net annuel de CO_2 .

Dans la perspective d'améliorer les estimations de flux de CO_2 , d'eau et les besoins en eau des cultures, mais aussi d'évaluer, à terme, l'impact des CI sur la ressource en eau, le modèle SAFY- CO_2 a été couplé au modèle de bilan hydrique de SAFY-WB, donnant naissance à un nouveau modèle : SAFYE- CO_2 . Ce couplage, au-delà de permettre d'estimer les flux d'évaporation et de transpiration, intégrait initialement un processus de rétroaction du contenu en eau du sol sur la GPP (stress hydrique) permettant de limiter le développement de la culture en situation de manque d'eau. Toutefois, nos analyses ont montré que la prise en compte du manque d'eau dans le sol n'améliorait pas les simulations des biomasses, rendements, flux de CO_2 , etc. En effet, les impacts des stress, notamment hydriques mais aussi ceux liés à la disponibilité en éléments minéraux, sur le développement de la végétation sont déjà implicitement pris en compte (au moins partiellement) via l'information apportée par l'imagerie satellite. Ce constat a été démontré par les estimations précises de SAFY- CO_2 lors de périodes de stress hydrique (voir section II-6.2).

Le modèle SAFYE- CO_2 a été appliqué en priorité au tournesol (voir section II-4). Localement et sur deux années culturales, le modèle a reproduit les biomasses et les rendements avec une faible erreur (respectivement 66 et 54 g.m^{-2}) qui se situe là aussi dans la gamme des erreurs fournies par d'autres approches. Todorovic et al., (2009) ont comparé plusieurs modèles de cultures et ont montré que les erreurs dans l'estimation des biomasses de tournesol étaient comprises entre 63 (WOFOST) et 204 (AquaCrop) g.m^{-2} , et celles dans l'estimation des rendements comprises entre 70 (AquaCrop) et 94 (CropSyst) g.m^{-2} . Des comparaisons supplémentaires avec d'autres modèles sont disponibles section II-4.6.1. Concernant les flux de CO_2 et d'eau acquis sur le site d'Auradé, l'approche a permis d'estimer correctement la NEE ($R^2 = 0.83$ et $\text{RMSE} = 0.97 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) et l'ETR ($R^2 = 0.79$ et $\text{RMSE} = 0.68 \text{ mm.j}^{-1}$). Néanmoins, l'application du modèle à plus grande échelle a fait apparaître certaines limites. En effet, l'estimation de l'ETR requiert une connaissance précise des propriétés de rétention d'eau du sol. Lorsque le modèle est appliqué localement, sur des sites instrumentés, des données in-situ de sol sont utilisées pour estimer la réserve utile, ce qui permet une estimation précise du contenu en eau du sol et par conséquent des flux d'ETR avec le modèle. En revanche, lorsque le modèle est utilisé pour simuler des parcelles pour lesquelles aucune mesure de sol in situ n'est disponible, les propriétés de sol sont déduites de produits cartographiques comme GSM ou SoilGrids. Or les produits sol existant ont pour le moment une résolution spatiale trop grossière (250 et 90m pour ceux utilisés dans ces travaux) et une précision encore trop faible pour répondre aux besoins d'une telle approche. Le modèle SAFYE- CO_2 a également été appliqué à la culture de blé, et il a permis d'obtenir des estimations correctes d'évapotranspiration sur les 8 années de mesure de flux ($R^2 = 0.68$ et $\text{RMSE} = 0.65 \text{ mm.j}^{-1}$).

À l'issue de ces travaux, l'approche proposée permet donc de simuler des rotations de culture entre le blé, le maïs et le tournesol ainsi que la végétation d'interculture, et d'analyser l'impact de ces rotations ou des phénomènes de repousses sur les productions, les flux de CO_2 et d'eau, et donc sur les bilans de C et d'eau.

2.1. Intérêts et avantages de l'approche

Le couplage du modèle à des produits GAI satellites constitue l'atout majeur de l'approche de modélisation proposée dans ces travaux. En effet, le principal frein à l'application d'approches de modélisation précise à grande échelle est la disponibilité en informations in situ telles que les pratiques de gestion. Comme SAFY(E)-CO₂ est forcé à reproduire ce que 'voit' le satellite, ces informations (dates de semis/récolte) sont indirectement dérivées des acquisitions régulières d'images, lors du processus de calibration du modèle. Les produits satellites permettent également de prendre indirectement en compte l'effet de certains stress. Lorsqu'une plante est stressée, son développement est ralenti, phénomène impactant la dynamique de GAI. En reproduisant ce qui est observé par satellite, le modèle reproduira un développement pouvant avoir été impacté par un stress. Ces particularités confèrent à l'approche une capacité d'application à grande échelle, très attendue aujourd'hui, permettant d'obtenir des estimations précises des composantes du bilan de C des parcelles agricoles.

L'utilisation de produits satellites permet également de détecter et de simuler la végétation pouvant se développer pendant les phases d'intercultures. Ces événements ont un impact fort sur les flux d'eau et de CO₂, et donc sur les bilans de C et d'eau. Or certains de ces phénomènes, comme les repousses et les adventices, ne sont jamais considérés dans les études basées sur d'autres approches de modélisation car la prise en compte de ces événements n'est rendue possible que par l'utilisation de la télédétection. La possibilité de quantifier l'effet de ces développements de végétation sur les bilans de C et d'eau apparaît donc comme un atout majeur comparé à d'autres approches de modélisation.

Enfin, la simplicité de l'approche offre également un avantage de taille en comparaison à d'autres approches de modélisation agronomique (*e.g.* STICS). Le nombre limité de paramètres permet en effet d'introduire de nouvelles espèces relativement facilement. La plupart des paramètres sont suffisamment génériques pour être extraits de la littérature scientifique, et le frein principal à l'introduction d'une nouvelle espèce dans le modèle est la disponibilité en données de validation (flux et biomasses/rendements spatialisés). Malgré cette simplicité de formalisme et d'application, le modèle SAFY-CO₂ offre des performances similaires voire meilleures par rapport à d'autres approches de modélisation (voir section I-4.8.3).

2.2. Inconvénients de l'approche proposée et voies d'améliorations possibles

La Figure VI-1 résume les principaux freins liés à l'utilisation du modèle SAFYE-CO₂ ainsi qu'à l'estimation, à grande échelle, des bilans de C. Ces freins sont schématisés par les flèches vertes. Pour chaque frein, une perspective, représentée par un octogone est proposée. Les sections suivantes détaillent ces freins et ces perspectives.

2.2.1. Estimation des bilans de C

Outre l'estimation des productions et des flux de CO₂, le calcul des bilans de C requiert la connaissance de certaines pratiques de gestion :

- Export ou non des pailles à la récolte, en particulier pour les céréales à pailles (blé, orge, seigle...) car il est fréquent que leurs pailles soient récoltées. Concernant la culture de maïs, le maïs grain se distingue facilement par satellite du maïs ensilage, et la distinction entre les différents types de maïs est également faite dans le RPG. Il est rare que les tiges de colza ou de tournesol soient exportées.

- Application d'amendements organiques (type et quantité).

Ces informations étaient très difficilement accessibles à la parcelle sur de grands territoires jusqu'à présent (Fig. VI-1). Il en découlait une forte incertitude sur les bilans de C. Toutefois, elles commencent à être accessibles via la mise en place d'API (interface de programmation d'application) permettant de récupérer automatiquement des données agriculteurs centralisées, via des logiciels de gestion des données d'exploitation (FMIS, *e.g.* MesP@rnelles¹⁴). Ces méthodes de récupération de données sont en train de se standardiser, et le CESBIO est impliqué dans plusieurs projets (*e.g.* Quantica labellisé par le CNES dans le cadre du Space Climate Observatory, projet H2020 NIVA) qui permettront à court terme de faire remonter ces informations dans SAFYE-CO₂.

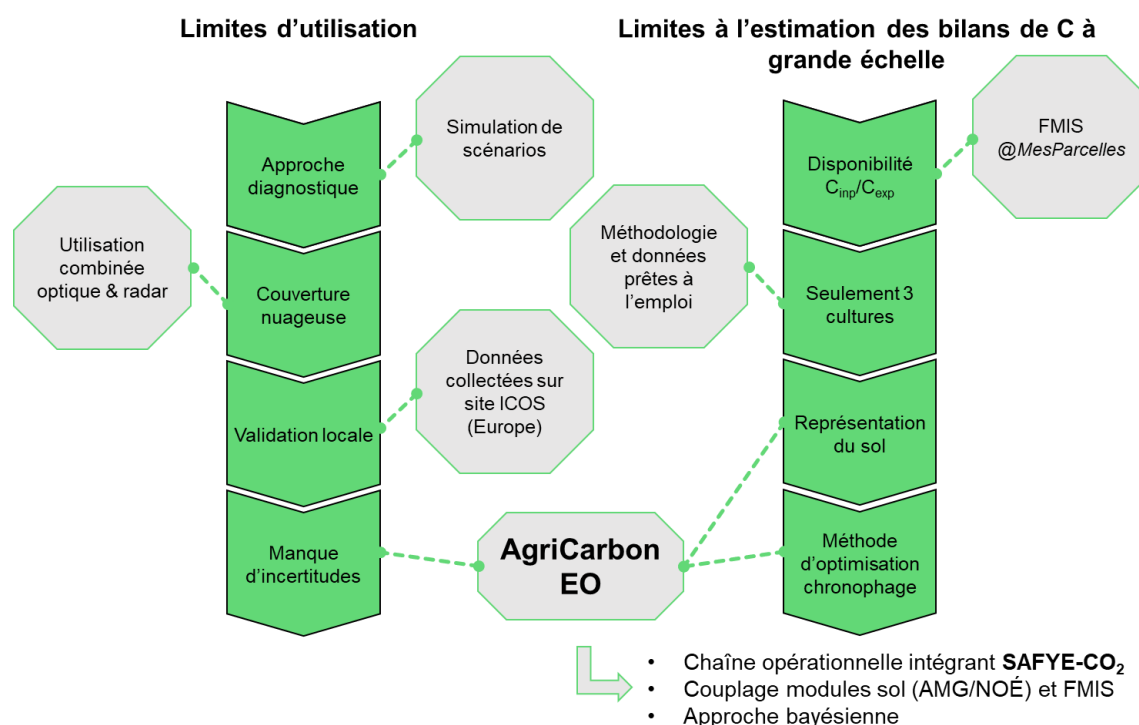


Figure VI-1 : Principaux freins (flèches) et principales perspectives associées (octogones) liés à l'utilisation du modèles SAFYE-CO₂ (gauche) et à l'estimation des bilans de carbone à grande échelle (droite).

Actuellement, la respiration du sol constitue une autre faiblesse de l'approche. Elle est représentée de manière très simple dans SAFYE-CO₂, via une équation de type Q_{10} dépendant de la température du sol (Fig. VI-1). Or la respiration hétérotrophe dépend d'autres facteurs (contenu en matière organique du sol, contenu en eau du sol, etc.) et des pratiques (amendements organiques, incorporation de couverts végétaux et pailles dans le sol, etc.) qui ne sont pas pris en compte actuellement dans le modèle. Ce choix a été fait car :

- Cette représentation simple de la respiration hétérotrophe fournissait des performances satisfaisantes sur les sols appauvris en matière organique de notre région (forte teneur en argile, faible teneur en MO, etc.) ce qui a pu être confirmé notamment par des mesures effectuées récemment sur un autre site flux mis en place en 2019 à Pibrac dans le cadre du projet Naturellement Popcorn.

¹⁴ <https://mesparcelles.fr/>

- Les données de pratiques (amendement organique, export des pailles, etc.) n'étaient jusqu'alors pas disponibles spatialement.
- La simplicité du formalisme, ne dépendant que de la température du sol, confère une simplicité de spatialisation qui est un point clé de l'approche,
- La respiration du sol représente pour une année culturale le plus petit terme composant la NEE (Moureaux, 2008), ce qui nous a mené à travailler en priorité sur les estimations de GPP et R_a puisque l'objectif était d'établir des bilans annuels de C.

Les estimations de R_h ne seraient donc probablement pas très précises à l'échelle d'une rotation culturale ou au-delà, mais elles le sont tout de même suffisamment pour estimer la NEP à l'année de manière satisfaisante sur notre zone d'étude. Des études appliquées à plusieurs années culturales, nécessiteront donc une meilleure représentation de la respiration du sol. Par exemple, cette méthode pourrait être améliorée en considérant un paramètre R_{10} dépendant de la teneur en carbone organique de surface comme le proposent Delogu et al., (2017). Une autre voie d'amélioration possible est la représentation du *priming effect* (Guenet et al., 2012; Kuzyakov et al., 2000a) lié à l'incorporation de matière organique comme celle des CI. Un travail de couplage de SAFYE-CO₂ avec deux modèles d'évolution de la matière organique du sol est actuellement en cours ou prévu dans le cadre des thèses de Taeken Wijmer avec le modèle AMGv2 (Clivot, 2019) et de Nicolas Breil avec RothC (Coleman and Jenkinson, 1996b), respectivement. Il peut toutefois en résulter une difficulté d'application à grande échelle. En effet, cette approche couplée offre des estimations précises lors d'applications locales, *i.e.* lorsque des analyses de sol précises et récentes sont disponibles. Toutefois, pour des applications à large échelle, la qualité des produits sol disponibles (GSM, SoilGrids) risque de ne pas être suffisante (voir section II-4.5). En effet, les modèles sol possèdent une forte sensibilité à certains paramètres d'entrée, tels que le pH ou la disponibilité en azote, qui sont entachés de fortes incertitudes à grande échelle, entraînant des estimations peu précises de minéralisation du sol. De manière générale, l'incertitude associée aux données sol disponibles représente un réel frein à l'estimation précise des flux /bilans d'eau et de CO₂, notamment. Des travaux sont réalisés depuis quelques années pour estimer les propriétés de sol par télédétection à haute résolution (Vaudour et al., 2019a), ce qui constitue une piste prometteuse pour améliorer les simulations spatialisées de la respiration du sol.

Une autre voie d'amélioration de notre approche concerne la méthodologie de calibration. Le processus d'assimilation des données GAI actuel, basé sur une inversion des paramètres de SAFYE-CO₂ utilise actuellement une méthode Simplex avec recherche globale qui demanderait beaucoup de ressources de calcul pour des applications spatialisées à de grands territoires. L'application du modèle à de larges échelles (régionale et nationale) – l'*upscaling* – est donc difficilement envisageable avec cette méthode (Fig. VI-1). De plus, la procédure d'inversion ne fournit actuellement pas d'évaluation des incertitudes associées aux variables simulées. Ces valeurs sont pourtant nécessaires dans un souci de rigueur scientifique, mais aussi car elles peuvent impacter le calcul des primes versées aux agriculteurs (ex. dans le cadre du Label Bas Carbone). Pour pallier ces deux problèmes, un outil d'assimilation et de modélisation, la chaîne AgriCarbon-EO, a récemment été développée au CESBIO (*Quantification of yield, water and carbon budget at intra-field scale using the AgriCarbon-EO tool* – Abstract EGU 2021). Cette chaîne inclut une méthode probabiliste d'inversion associé à deux modèles physiques, à savoir, un modèle de transfert radiatif (ProSail ; Jacquemoud et al., 2009) et le modèle SAFYE-CO₂ (Pique et al., 2020c). Elle permet la propagation des incertitudes de l'acquisition satellite jusqu'à la production de bilans de carbone, des flux d'eau et de la biomasse en sortie. L'utilisation de procédures de calcul parallèle et de partage de simulation très adaptés aux inversions Bayésiennes permet un gain de performance considérable. À titre d'exemple, une dizaine de parcelles peut être simulée en une vingtaine de minutes et ce, à l'échelle du pixel (10-20 m de résolution) avec cette chaîne de traitement, alors que

cela demanderait des mois de calcul avec la méthode Simplex globale. Enfin, cette chaîne permettra le couplage de SAFYE-CO₂ avec un modèle d'évolution de la matière organique dans le sol permettant l'amélioration de la respiration du sol comme expliqué précédemment mais également, à plus long terme, d'un modèle d'estimation des flux de N₂O (e.g. NOÉ) permettant ainsi de réaliser des bilans de GES complets.

2.2.2. Introduction de nouvelles espèces

Afin de pouvoir simuler des rotations culturales diverses, l'approche nécessite la paramétrisation du modèle pour plusieurs espèces (Fig. VI-1), et dans l'idéal des paramétrisations spécifiques aux végétations d'intercultures (notamment les CI).

La culture de maïs a seulement été validée avec des données de biomasses et de rendements, les données de flux de CO₂ et d'eau ne pouvant pas être exploitées (voir section I-6). Un travail de validation de cette culture face à des mesures de flux devra donc être réalisé. Des données de flux sont justement acquises depuis 1 an sur la culture de maïs dans le cadre du projet 'Naturellement Popcorn'¹⁵. Ces mesures ainsi que celles collectées actuellement par le CESBIO sur d'autres sites flux en Europe vont permettre de consolider ou valider la paramétrisation actuelle du maïs (et des autres cultures) dans SAFYE-CO₂.

Le colza représente une part importante des surfaces agricoles et requiert donc d'être pris en compte en priorité dans l'approche. De la même manière que pour la culture de maïs, des données spatialisées de biomasse et de rendement ont été acquises dans le cadre du projet 'Colza Digital'¹⁶ porté par Terres Inovia. Avec les données flux disponibles sur le site d'Auradé (3 années), elles vont permettre de calibrer et valider la culture de colza avec un large jeu de données d'observation.

Jusqu'à présent la végétation se développant pendant l'interculture était simulée de la même manière peu importe la nature de la végétation (repousse, adventices, CI). Or le comportement de cette végétation (capacités photosynthétiques, production de biomasse, etc.) varie évidemment avec sa nature. Pour affiner les estimations actuelles, il faudrait pouvoir déterminer la nature de cette végétation mais aussi avoir une paramétrisation spécifique. Cela semble très compliqué à réaliser à court terme du fait de la rareté des données de validation et de la complexité des végétations d'intercultures (mélanges d'espèces, hétérogénéité de développement, etc.). Dans un premier temps une paramétrisation propre aux CI sera établie, et la présence des CI pourra être déterminée grâce à des logiciels comme MesP@rcelles. Les repousses/adventices seront simulées avec la paramétrisation de la culture précédente et des bornes des paramètres à calibrer adaptées.

2.2.3. Apport de la télédétection

Comme l'approche présentée ici est couplée avec des données de télédétection, elle est par conséquent seulement diagnostique. Il n'est pas possible d'utiliser cette approche de façon prévisionnelle à la différence des modèles agronomiques ou des schémas de surface des modèles globaux. En revanche, les impacts de certaines pratiques, comme l'export des pailles ou la présence de CI, peuvent être simulés (possibilité d'analyser des scénarii).

Un second inconvénient lié à l'utilisation de données satellites dans l'approche proposée est la disponibilité en images. En effet, une trop longue période sans image, notamment pendant des phases clés du développement de la culture (émergence, début de sénescence, etc.), limite considérablement

¹⁵ <https://www.popcorn.fr/actualites/consortium-sur-le-projet-naturellement-popcorn/>

¹⁶ <https://www.terresinovia.fr/web/institutionnel/nos-actions/ameliorer-la-competitivite-du-colza>

l'utilisation du modèle. Toutefois, ce problème qui rendait parfois impossible la simulation de certaines années culturales par le passé (cas de l'année 2007-2008 à Auradé) tend à devenir moins problématique avec le temps, grâce aux nouvelles missions spatiales. Les missions Sentinel offrent en effet une bien meilleure fréquence d'acquisition (5 jours) que précédemment.

Enfin, l'approche actuelle pourrait être couplée à d'autres produits satellites. En effet, des données radar (Fieuzal et al., 2011b) et thermiques (Labbé et al., 2012b) pourraient apporter des informations complémentaires à la donnée optique, et ainsi permettre de mieux représenter/contraindre le développement des cultures ou de mieux simuler certains processus. Ainsi, la donnée radar qui est moins sensible au phénomène de saturation du signal pourrait pallier aux problèmes de saturation du GAI satellite. Aussi les données radar ne sont pas sensibles à la couverture nuageuse ce qui permettrait d'obtenir des informations sur le développement des cultures par tous temps. L'assimilation combinée de données optique et radar a déjà été utilisée pour piloter des modèles de cultures (Fieuzal et al., 2011; Fieuzal et al., 2017; Revill et al., 2013). La donnée thermique pourrait également être utilisée pour renseigner sur de potentiels stress hydriques rencontrés par les cultures. Enfin, certaines informations concernant les pratiques qui sont aujourd'hui seulement disponibles localement car fournies directement par les agriculteurs, comme le labour/non labour, le maintien des résidus de culture ou encore la présence de CI pourraient devenir accessibles beaucoup plus facilement et sur de grands territoires via le couplage (API) à des logiciels de gestion des exploitations comme MesP@rcelles. Aussi, très prochainement (fin 2021/début 2022) un service opérationnel Copernicus Land Surface High Resolution « Agriculture¹⁷ » devrait fournir des informations via les satellites Sentinel 1&2 concernant les pratiques (CI, travail du sol, date de récolte) qui pourraient être exploitées pour la modélisation spatialisée des cultures.

2.2.4. Transposabilité

Dans ces travaux de thèse, le modèle SAFYE-CO₂ a seulement été appliqué à des parcelles agricoles situées dans le sud-ouest de la France, sur la zone de l'OSR. Autrement dit, les paramétrisations actuelles du modèle sont valides pour des zones aux conditions pédoclimatiques similaires à celles du sud-ouest de la France (Fig VI-1). L'application du modèle à des contextes climatiques et pédologiques variés nécessitera d'adapter la paramétrisation des cultures et des processus relatifs au sol, et notamment les bornes des paramètres à optimiser. Par exemple, les dates de semis et de récolte d'une même culture vont varier en fonction de la situation géographique, ce qui implique que les paramètres régissant la phénologie des cultures soient adaptés. Néanmoins, la transposabilité des modèles précurseurs à SAFYE-CO₂ a déjà été testée sur des contextes pédoclimatiques très variés. Par exemple, le modèle SAFY a été appliqué en France, au Mexique et au Maroc (Claverie et al., 2012; Duchemin et al., 2015, 2008).

3. Analyse de l'effet albédo des cultures intermédiaires

Partant du constat que la végétation a généralement un albédo plus élevé que le sol nu (Carrer et al., 2014; Ferlicoq and Ceschia, 2015), une approche de modélisation permettant d'estimer le forçage radiatif induit par les changements d'albédo des surfaces agricoles suite à l'introduction de CI a été mise en place à l'échelle de l'Europe. Alors qu'il avait été montré sur forêts (Betts, 2000; O'Halloran et al., 2012; Rotenberg and Yakir, 2010) et cultures (Ferlicoq, 2016) que les effets biogéophysiques pouvaient avoir un impact de même amplitude que les effets biogéochimiques, peu d'études se sont penchées sur

¹⁷ <https://land.copernicus.eu/fr>

les effets liés aux changements d'albédo des surfaces agricoles (Davin et al., 2014; Genesio et al., 2020; Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a; Meyer et al., 2012a; Ridgwell et al., 2009). Il en résulte une absence de prise en compte des effets albédo dans les stratégies d'atténuation des changements climatiques, qu'il est primordial de corriger afin d'obtenir des estimations plus précises des effets climatiques nets liés aux pratiques actuelles ainsi qu'aux changements de pratiques.

Plusieurs pratiques permettent d'augmenter l'albédo des parcelles agricoles. Parmi elles, on trouve le maintien des pailles en surface qui pourrait être plus efficace que les CI pour augmenter l'albédo des surfaces agricoles (Davin et al., 2014). Néanmoins, le maintien des pailles ne permet pas de stocker du carbone dans les sols, et peut également entraîner des effets antagonistes au refroidissement de surface lié au changement d'albédo. En effet, il a été montré que cette pratique pouvait impacter les flux de chaleur en augmentant notamment la température de surface et les flux de chaleur sensible au détriment des flux de chaleur latente, diminuant ainsi l'effet refroidissant lié à l'augmentation d'albédo. Dans le cadre de cette thèse, il a donc été choisi d'étudier les effets d'une pratique agricole présentant des synergies d'atténuation sur les effets biogéophysiques mais également sur les effets biogéochimiques.

Parmi les pratiques ayant un impact fort sur l'albédo de surface et contribuant aussi à l'atténuation via le stockage de carbone, la mise en place de cultures intermédiaires a été identifiée comme une pratique pouvant être généralisée à de grands territoires. S'appuyant sur de récents travaux (Carrer et al., 2014) fournissant des produits albédo à une résolution spatiale de $1/20^\circ$ à l'échelle Européenne, un modèle d'estimation du forçage radiatif induit par le changement d'albédo de surfaces agricoles suite à l'introduction de CI a été développé dans le cadre d'une collaboration entre le CESBIO et le CNRM (voir section III-2).

Ce modèle a dans un premier temps été mis en place pour simuler un scénario d'introduction de CI pendant une durée de 3 mois, ce qui correspond classiquement à la mise en place de CIPAN pour limiter la lixiviation des nitrates. Ces premiers résultats (section III-4, Carrer et al., 2018) ont permis de montrer que les CI pourraient être introduites sur 4.17% de la surface Européenne, ce qui pourrait augmenter l'albédo des surfaces agricoles de 0.0025. Cette variation d'albédo induirait un forçage radiatif de -0.15 W.m^{-2} équivalent à $3.16 \text{ MtCO}_2\text{-}\text{eq.an}^{-1}$, en considérant que la pratique est maintenue pendant une durée de 100 ans. En considérant une durée d'introduction des CI de 6 mois, cet effet d'atténuation serait augmenté de 27%. Ces premières estimations ont toutefois été obtenues sur des durées de simulations courtes par rapport aux effets étudiés. En effet, la durée des simulations était ici de 3 ans, alors que la pratique est considérée comme devant être maintenue pendant une centaine d'années pour maintenir cet effet. Par ailleurs, les scénarii d'introductions simulés considéraient que les CI pouvaient être introduites seulement après une culture d'hiver et avant une culture d'été, alors qu'elles peuvent en réalité être introduites sur d'autres phases d'interculture (Pellerin et al., 2019).

Le modèle RFCC a donc été modifié pour pouvoir effectuer des simulations sur de plus longues périodes (100 ans), et des périodes d'introduction de CI supplémentaires (ex. entre deux cultures d'été) ont été considérées. Par ailleurs, un seuil de précipitation (30 mm) le mois suivant l'introduction potentielle des CI a été appliqué pour limiter la mise en place des CI. La prise en compte de ce seuil, ainsi que des nouvelles périodes d'introduction des CI a montré que le forçage radiatif induit par cette pratique pourrait être plus important, de l'ordre de -0.62 W.m^{-2} (voir section V-2.4.1.1).

L'effet de la couverture neigeuse, pouvant engendrer une modification de l'albédo de surface en présence de CI, a aussi été pris en compte. En effet, selon les hypothèses considérées, les CI pourraient soit faire baisser l'albédo de surface (Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a), lorsqu'elles sont

mises en place sur des zones couvertes d'une couche de neige, soit n'avoir aucun effet (voire un effet bénéfique sur le maintien du manteau neigeux selon Hunter et al., 2019) s'il est considéré que la couverture neigeuse est totalement couvrante. La prise en compte de cette couverture neigeuse a montré dans le premier cas que le forçage radiatif serait diminué mais toujours refroidissant : -0.06 W.m^{-2} (voir section V-3.4.1.2). Cet effet semble toutefois peu réaliste compte tenu de la qualité des produits neige utilisés (surestimation des périodes et de l'épaisseur de la couverture neigeuse) ainsi que des formalismes introduits pour considérer l'impact du manteau neigeux sur l'albédo de surface (voir section V-2.5).

Enfin, il a été décidé d'étudier l'effet de la décroissance de l'albédo de sol nu pouvant suivre l'incorporation répétée de matière organique fraîche dans le sol via les CI, ainsi que l'effet net des CI sur le RF_{α} . À notre connaissance, aucune étude portant sur les CI n'avait encore évalué l'effet de l'assombrissement du sol suivant leur mise en œuvre, ce qui apparaissait pourtant comme un risque fort de perte de l'effet d'atténuation net. En effet, Meyer et al., (2012) ont montré que l'assombrissement du sol lié à l'application de biochar pouvait entraîner des forçages radiatifs locaux compris entre 2.6 et 3.1 W.m^{-2} (fort effet « réchauffant »). La prise en compte de cet effet a permis d'alerter sur l'impact que pourrait avoir l'augmentation des stocks de C organique des sols sur l'albédo de surface. Ce travail de thèse a permis de démontrer que ce phénomène d'assombrissement des sols suivant l'introduction de CI pourrait venir contrebalancer l'effet refroidissant lié à la présence de végétation pendant les phases d'interculture (voir section V-2.4.1.3). Les premières années de simulation sont tout de même caractérisées par un forçage refroidissant, mais rapidement la tendance s'inverse car la diminution d'albédo de sol devient vite prépondérante face à l'effet couverture du sol des CI, entraînant ainsi une diminution de l'albédo total de surface. Le moment de basculement d'un forçage refroidissant à réchauffant est dépendant du scénario simulé, et varie entre quelques années pour les scénarii les plus pessimistes à une quinzaine d'années pour les scénarii les plus réalistes. Dans tous les cas, l'assombrissement du sol et par conséquent l'effet réchauffant qu'il induit se renforce au cours du temps et atteint son potentiel maximum au bout de 50 ans. Il deviendrait donc nécessaire de couvrir le sol de manière permanente une fois les CI introduits dans les rotations (ou d'autres pratiques stockantes d'un point de vue C). Ces résultats soulignent l'importance des analyses couplées biogéochimiques et biogéophysiques pour éviter les effets antagonistes, et ainsi proposer des stratégies d'atténuation du changement climatique plus efficaces.

3.1. Intérêts et avantages d'une telle approche

L'approche développée dans ces travaux de thèse a été rendue possible grâce aux produits albédo à $1/20^{\circ}$ disponibles depuis peu (Carrer et al., 2014). Ces produits offrent pour chaque pixel et tous les 8 jours, une valeur d'albédo de sol nu, et, pour les différents types de végétation présents dans ce pixel ; un albédo de végétation, un indice de végétation et une fraction d'occupation du sol. Ces données ont permis d'estimer des changements d'albédo des surfaces agricoles pouvant être induits par la mise en place de CI à l'échelle Européenne.

Par ailleurs, puisque très peu d'études portent sur l'estimation du forçage radiatif des parcelles agricoles suivant un changement de pratique, ces travaux constituent un apport important de connaissances sur le sujet.

Aussi, ces travaux permettent de quantifier à grande échelle des phénomènes observés localement via des mesures in situ. Ces analyses spatialisées sont nécessaires à la promotion de cette pratique à grande échelle. En effet, en plus de constituer une méthode d'atténuation des changements climatiques efficace (sous réserve de couverture permanente des sols), les CI rendent un grand nombre de services

écosystémiques (Justes et al., 2012) et font donc de cette pratique une option de choix dans les stratégies d'atténuation du changement climatique.

Ces travaux pourront à l'avenir être valorisés via la mise en œuvre d'études sur les effets climatiques nets des CI (avec prise en compte des rétroactions) via l'utilisation de modèles de climat. Jusqu'à présent les modèles du GIEC (ex. les modèles français IPSL-CM6A-LR ; Boucher et al., (2020) et CNRM-CM5 ; Voldoire et al., (2013)) ne considéraient pas l'effet des changements de pratiques culturales dans leurs simulations car il a longtemps été considéré que ces effets étaient négligeables (notamment leurs effets albédo). Cependant, lors du récent colloque portant sur les stratégies d'atténuation du climat via la gestion de l'albédo de surface (<http://albedo.cc.lscce.ipsl.fr/index.php>), où les travaux de cette thèse ont été présentés, plusieurs modélisateurs du climat ont exprimé le souhait d'inclure l'effet des CI dans leur schéma de surface (e.g. ORCHIDEE-crop).

3.2. Inconvénients et améliorations possibles

La Figure VI-2 présente les principaux freins liés à aux données d'entrée du modèle RFCC ainsi la méthodologie associée au modèle. Ces freins sont schématisés par les flèches oranges. Pour chaque frein, une perspective, représentée par un octogone est proposée. Les sections suivantes détaillent ces freins et ces perspectives.

3.2.1. Spécificités et évolution des produits satellites

Actuellement la résolution des produits albédo utilisés est de $1/20^\circ$ ce qui correspond, sur la zone d'étude, à des pixels de 18 à 25 km². À cette résolution, un pixel couvre un grand nombre de parcelles (et de types d'occupations du sol), ce qui nous amène à faire certaines hypothèses, comme sur la proportion de cultures d'hiver/été en rotation (Fig. VI-2). De plus, le processus de désagrégation induit des compensations entre les variables de sortie (indice de végétation, albédo de sol/végétation) qui les rendent peu précises, notamment lorsque les fractions de culture dans le pixel sont faibles. Cette spécificité des produits satellites a posé problème lors de l'estimation de l'impact de la décroissance de l'albédo du sol suite à l'augmentation des stocks de MO suivant l'incorporation des CI. En effet, les indices de végétation n'étant presque jamais égaux à 1, l'albédo du sol a toujours un poids dans l'estimation de l'albédo total, ce qui n'est en réalité pas le cas lorsque la végétation est totalement couvrante.

Pour tenter de résoudre ce problème d'amplitude limitée des indices de végétation plusieurs tests ont été réalisés. Ces indices ont été modifiés de façon à les faire varier entre 0 et 1. La première modification a consisté à forcer les indices à 0 ou à 1 en fonction de la présence ou non de végétation à partir des dates de semis et de récolte. La seconde modification, plus réaliste, a été d'étirer les indices entre 0 et 1 tout en conservant leur dynamique temporelle. Les simulations de la décroissance d'albédo du sol avec ces indices de végétation limitaient effectivement le poids de l'albédo de sol sur les forçages. Néanmoins, des simulations sans introduction de CI (cas de référence) ont montré que la modification des indices entraînait, elle-même, des forçages qu'il était ensuite difficile de distinguer des forçages induits par la présence de CI.

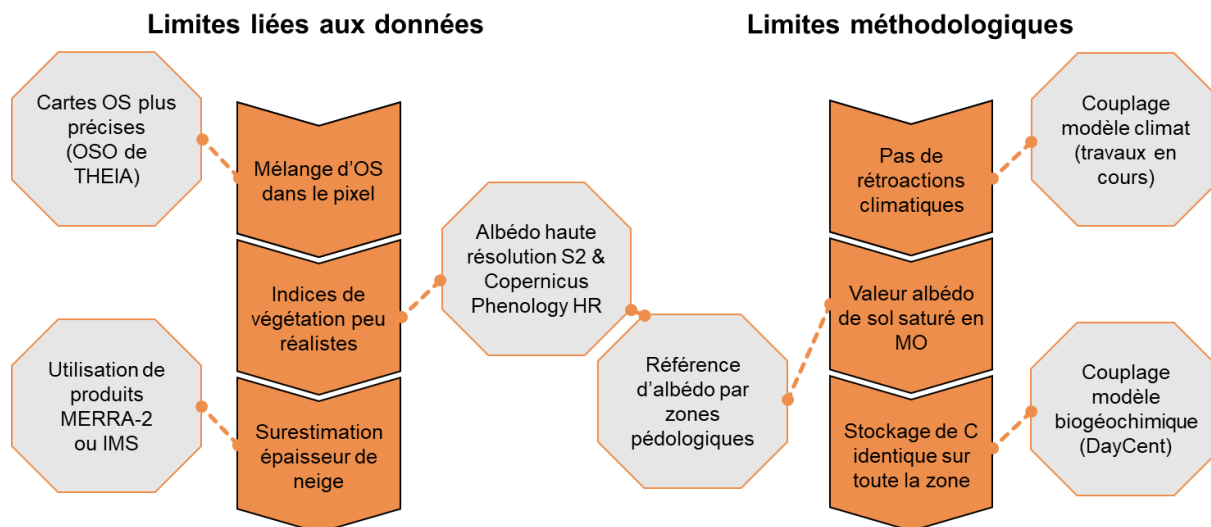


Figure VI-2 : Principaux freins (flèches) et principales perspectives associées (octogones) liés à l'utilisation aux données d'entrée du modèle RFCC (gauche) et à la méthodologie associée au modèle (droite).

La possibilité d'appliquer l'approche à une résolution plus fine pourrait rendre les estimations d'effets albédo liés aux changements de pratiques beaucoup plus précises. Il serait par exemple possible d'utiliser des cartes d'occupation du sol, comme le produit OSO de THEIA¹⁸, ainsi que des produits albédo à 10-20 m de résolution issus de données Sentinel 2 qui sont en cours de développement (Roujean et al., 2019). La haute résolution, qui est notamment apportée par les missions Sentinel, permettra également d'obtenir des indices de végétation plus réalistes (en dynamique et intensité) et donc de mieux représenter certains processus comme l'assombrissement du sol. Le futur service Copernicus Phenology HR (voir section VI.2.2.3 et Fig. VI-2) qui sera opérationnel en Juin 2021 fournira ces données d'indice de végétation à 10m de résolution, et permettra d'identifier avec précision les périodes d'interculture sur lesquelles peuvent être introduites les CI, mais également de réaliser des cartes de présence/typologie de CI (travaux en cours au CESBIO) qui permettront là aussi d'affiner les estimations actuelles. Aussi, les récents travaux sur l'estimation des propriétés de sol par télédétection à l'aide des missions Sentinel (Vaudour et al., 2019a) vont permettre de suivre l'évolution de la MO du sol, et ainsi de mieux représenter et simuler le lien entre MO et albédo du sol.

Enfin, la prise en compte de l'assombrissement du sol montre certaines limites qu'il faudra lever dans les études à venir (Fig VI-2). Tout d'abord, il a été considéré que toutes les CI introduites sur la zone d'étude étaient enfouies et que le stockage de C dans le sol suivait la même dynamique. Or le stockage de C dans le sol dépend évidemment des conditions météorologiques (température, précipitation, etc.) et pédologiques (texture, contenu initial de C, etc.) qui sont très variables au sein de la zone d'étude. Enfin, la référence qui a été choisie pour définir l'albédo qu'atteindrait tout sol saturé en C correspond au sol le plus sombre de toute la zone d'étude. Cette référence est donc sans doute trop basse pour certains sols Européens dont la texture et la composition ne permettrait pas d'atteindre de si basse valeur d'albédo, même une fois « saturé » en C. Une première voie d'amélioration possible pour simuler la décroissance d'albédo du sol consistera à choisir un albédo de référence par zone géographique partageant les mêmes caractéristiques pédoclimatiques. Cela permettra de prendre en compte l'hétérogénéité de la zone d'étude. Une seconde voie d'amélioration est l'utilisation de la haute

¹⁸ <http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/~oso/>

résolution satellite pour déterminer, via l'observation, des valeurs cibles d'albédo de sol à atteindre une fois le sol saturé en MO. Enfin, la vitesse de stockage du C dans le sol pourrait être estimée via l'utilisation d'autres modèles de type biogéochimique, comme DayCent. Pour ce faire la même méthodologie mise en place par Lugato et al., (2020) pourrait être appliquée.

3.2.2. Prise en compte de la couverture neigeuse

Les produits de neige ERA-5, utilisés en entrée du modèle RFCC, sont connus pour surestimer l'épaisseur de la couche neigeuse (Orsolini et al., 2019a). Il a également été constaté dans ces travaux que les produits ERA-5 surestimaient les périodes de couverture neigeuse. Par exemple, selon ces produits, les sites d'Auradé et de Lamasquère seraient en moyenne sur 10 ans (2001-2010) concernés par une couverture neigeuse de près d'un mois par ans (29.5 et 32.3 jours respectivement) dont l'épaisseur moyenne serait d'environ 8 mm (7.6 et 8.7 mm respectivement). De plus, les hypothèses faites pour prendre en compte la couche neigeuse sont fortes et donnent trop de poids à cette dernière. Par exemple, on considère que l'albédo des surfaces agricoles est de 0.65 (albédo de la neige) dès qu'il y a 1 mm de couverture neigeuse (comme c'est le cas pour les sites d'Auradé et Lamasquère avec les produits ERA-5). D'autres produits devront donc être utilisés (*e.g.* MERRA-2 ou IMS) et d'autres formalismes devront être introduits dans l'approche afin de mieux représenter l'impact de la neige sur l'albédo de surface en présence de CI.

Par ailleurs, l'impact radiatif des CI introduites sur des surfaces enneigées fait aujourd'hui débat. Lorsque la neige est totalement couvrante il est admis qu'aucun forçage n'est induit puisque l'albédo de surface est inchangé (= albédo de la neige avec ou sans CI). En revanche, lorsque la neige ne couvre pas totalement les CI, l'albédo de surface pourrait diminuer à cause de la présence des CI (Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a). Aussi, Lombardozzi et al., (2018) affirment que l'introduction de CI pendant l'hiver pourrait augmenter la température de surface jusqu'à 3°C en considérant que la mise en place de CI diminuerait systématiquement l'albédo de surface en présence de neige et en ne considérant qu'une introduction limitée aux trois mois d'hiver. Plus récemment, Hunter et al., (2019) ont démontré, grâce notamment à des données in situ que ces affirmations étaient hautement improbables et qu'à l'inverse les CI induiraient un effet refroidissant même en présence de neige car ils avaient tendance à maintenir la neige sur place. Il reste donc beaucoup d'effort à fournir avant de modéliser finement les interactions neige et CI sur le forçage radiatif. Nos résultats concernant les effets combinés neige et CI sont donc à considérer avec beaucoup de précautions.

3.2.3. Perspectives de simulation

D'autres scénarii d'introduction de CI pourront également être simulés. Pour l'instant, l'albédo des surfaces agricoles a été modifié en simulant le développement des CI présentant des caractéristiques des espèces communément utilisées. Néanmoins, des CI déficientes en chlorophylle, ayant un albédo beaucoup plus élevé (Genesio et al., 2020; Sakowska et al., 2018a) pourraient être considérées. Notons néanmoins qu'étant déficient en chlorophylle, ce type de CI produirait moins de biomasse (environ 20% selon Lugato et al., 2020) et l'effet de stockage des CI en serait ainsi diminué. L'outil de modélisation RFCC peut également permettre de simuler d'autres pratiques ayant un impact sur l'albédo de surface. En effet, un moyen de lutter efficacement contre les changements climatiques par l'utilisation des surfaces agricoles est la couverture permanente des sols. Elle est atteinte par l'utilisation de CI mais aussi par le maintien des résidus de culture en surface. Afin de modéliser ce nouveau scénario, des données d'albédo déjà acquises sur résidus de culture (Davin et al., 2014 ; Ferlicoq, 2016) pourraient être exploitées en complément des analyses des effets albedos liés au CI.

4. Vers des analyses couplées des effets biogéochimiques et biogéophysiques

Luyssaert et al., (2014) ont montré que les effets biogéophysiques liés aux changements d'occupation des sols étaient de même amplitude que les effets liés à des changements de pratiques de gestion. Aussi, bien que la plupart des études portant sur le potentiel d'atténuation des changements climatiques associés aux changements de pratiques se soient exclusivement intéressées aux effets biogéochimiques, plusieurs études ont montré l'importance de prendre en compte les effets biogéophysiques dans ce genre d'approche (Betts, 2000; Bright et al., 2015; O'Halloran et al., 2012). Ces derniers peuvent entrer en synergie avec les effets biogéochimiques, mais ils peuvent aussi être antagonistes, notamment via les effets albédo (Meyer et al., 2012a). Pourtant, encore peu d'études ont été menées concernant les effets couplés biogéochimiques et biogéophysique induits par des changements de pratiques (Kaye and Quemada, 2017a; Lugato et al., 2020a).

Le chapitre V de ce manuscrit a démontré l'importance de considérer les effets biogéochimiques et biogéophysiques de manière couplée lorsqu'on étudie un changement de pratique. En effet, un bénéfice à court terme lié à la mise en place de CI pourrait être contrebalancé par la conséquence d'un effet biogéochimique (augmentation des stocks de C qui fait baisser l'albédo du sol). Des effets biogéophysiques peuvent également entrer en concurrence entre eux. Dans leur étude, Davin et al., (2014) ont ainsi démontré que, l'effet refroidissant lié à l'augmentation d'albédo induit par le maintien des résidus de culture en surface pouvait être atténué par la réduction des flux d'évapotranspiration via un effet mulch.

5. Perspectives

Ces travaux de thèse ont permis de mettre en place des outils de modélisation capables d'estimer de manière spatialisée les effets biogéochimiques et biogéophysiques liés à des changements de pratiques comme les changements de rotations culturales ou l'introduction de CI. Ces modèles requièrent toutefois des développements supplémentaires afin de pouvoir obtenir des estimations plus complètes et précises des phénomènes étudiés ainsi que de pouvoir simuler de plus grandes zones géographiques.

Comme précisé dans la section précédente, la version du modèle SAFYE-CO₂ utilisée durant la thèse faisait intervenir un processus d'optimisation des paramètres basé sur une méthode globale Simplex avec contrainte, ce qui ne permettait pas d'envisager des simulations sur de grands territoires et de quantifier les incertitudes sur les variables simulées. Le modèle SAFYE-CO₂ a donc récemment été intégré dans la chaîne de traitement opérationnelle AgriCarbon-EO (*Quantification of yield, water and carbon budget at intra-field scale using the AgriCarbon-EO tool & Assessing the impact of cover crops as a GHG mitigation solution at intra-field scale using the AgriCarbon-EO tool* - Abstracts EGU 2021). Cette chaîne, dont le développement dépasse le cadre de ma thèse, a pour objectif de fournir une solution *end-to-end* pour l'assimilation des données d'observation satellite optique dans SAFYE-CO₂. Ce nouvel outil basé sur une approche Bayésienne permet, en plus d'offrir des incertitudes pour chaque variable simulée (liées aux données satellites et aux paramètres du modèle), de fonctionner au pixel sur des calculateurs haute performance (HPC) et sur de grands territoires (plusieurs tuiles Sentinel). Cette chaîne offre donc d'importantes perspectives d'application du modèle, à des contextes pédoclimatiques variés, et devrait permettre de simuler un grand nombre de scénarii.

La chaîne AgriCarbon-EO a été développée dans une optique d'aide à la décision. En effet, cet outil doit servir à guider les pratiques agricoles en fonction des indicateurs estimés par SAFYE-CO₂. Récemment, le Ministère de la transition écologique et solidaire a créé le Label Bas Carbone qui vise à accompagner la transition agroécologique, via le financement de projets permettant une réduction des émissions de GES, comme la séquestration du carbone dans les sols agricoles en changeant les pratiques. Ce label doit apporter des garanties, aux porteurs des projets (agriculteurs, coopératives, etc.) comme aux financeurs, et permettre de quantifier la compensation carbone. Pour apporter ces garanties, des outils diagnostiques sont nécessaires à l'évaluation des bilans de C des parcelles agricoles. Un outil comme AgriCarbon-EO pourra donc venir en soutien à ce type d'initiative.

Il est également envisagé de coupler la chaîne de traitement AgriCarbon-EO à la plateforme Sen4CAP¹⁹ de suivis des déclarations de la PAC via les satellites Sentinel 1&2 à l'échelle Européenne. Sen4CAP intègre plusieurs outils permettant la production d'indicateurs (type de culture, date d'émergence, cycle de LAI, etc.) pouvant être utilisés en entrée d'AgriCarbon-EO. À terme, AgriCarbon-EO a donc vocation à devenir un des outils de référence dans Sen4CAP pour le calcul des bilans de C à l'échelle parcellaire pour différents états membres de l'UE dans le contexte Green Deal (action en cours dans le cadre du projet H2020 NIVA). Enfin, via AgriCarbon-EO un certain nombre d'autres indicateurs agro-environnementaux pourraient être calculés (*e.g.* risque de lixiviation des nitrates ; Bockstaller et al. sous presse dans Innovations Agronomiques) permettant le versement de subventions aux agriculteurs dans le cadre du second pilier de la PAC. Néanmoins, un investissement soutenu sera nécessaire pour résoudre les verrous scientifiques mentionnés en début de ce chapitre avant de répondre aux objectifs opérationnels.

Les travaux de modélisation développés aux cours de cette thèse seront donc probablement très utiles pour guider la transition agroécologique et identifier les pratiques à mettre en place afin de conserver la pérennité de l'agriculture tout en limitant son impact climatique. Les surfaces agricoles peuvent même être utilisées comme moyen raisonné d'atténuation des changements climatiques. En effet, en comparaison à d'autres techniques de géoingénierie, les pratiques agricoles potentiellement bénéfiques pour le climat peuvent être mises en place progressivement et ainsi anticiper d'éventuels contre-effets, ce qui n'est pas le cas avec d'autres techniques de géoingénierie.

¹⁹ The Sentinels for Common Agricultural Policy

Conclusion générale

Conclusion générale

Ces travaux de thèse ont permis d'enrichir nos connaissances sur le fonctionnement des surfaces agricoles, via le développement de deux approches de modélisation spatialisées, s'appuyant sur l'utilisation de séries temporelles de données de télédétection. Ces approches ont permis de quantifier les composantes des bilans de C et d'eau des parcelles de grande culture, ainsi que les effets climatiques d'ordre biogéochimiques (stockage de C) et biogéophysiques (effet albédo) induits par l'introduction de cultures intermédiaires dans les rotations de cultures.

Le modèle spatialisé agro-météorologique SAFYE-CO₂ a été développé pour estimer les productions (biomasses, rendements), les flux de CO₂ et d'eau ainsi que les bilans de C et d'eau, sur un ensemble de parcelles allouées aux grandes cultures dans le sud-ouest de la France. Ce modèle assimile des produits satellites (GAI) à hautes résolutions spatiale et temporelle, lui permettant de simuler avec précision le développement des cultures, sans avoir recours à des informations sur les pratiques culturales. Par la suite, un modèle d'estimation de forçage radiatif induit par des changements d'albédo de surface a été développé afin de rendre compte de l'impact radiatif lié à la mise en place de cultures intermédiaires à l'échelle Européenne.

Le modèle SAFY-CO₂ (identique à SAFYE-CO₂ mais sans module de bilan hydrique) a dans un premier temps été appliqué à la culture de blé. Sur deux parcelles agricoles équipées de dispositifs de mesure des flux de surface et situées au sein de l'Observatoire Spatial Régional - Sud-Ouest, le modèle a permis de reproduire avec précision les productions ainsi que les dynamiques de flux de CO₂, et d'évaluer les bilans de carbone de 8 années culturales de blé, avec des pratiques et conditions climatiques contrastées. Il a également fourni des estimations précises de production de blé de manière spatialisée. Ce modèle a prouvé sa capacité à prendre en compte, de manière implicite, l'effet de différents stress sur le développement de la végétation, et à simuler les développements végétatifs d'intercultures qui impactent significativement les flux de CO₂ et les bilans de C des parcelles de grande culture. Dans le but d'estimer des bilans de C pluriannuels (*i.e.* variation des stocks de C organique du sol), la culture de maïs a également été introduite dans le modèle. Elle n'a néanmoins pas pu être totalement validée, puisque les données de flux acquises sur cette culture n'ont pas pu être exploitées. En revanche, les flux de CO₂ acquis sur la culture de tournesol étant exploitables, cette culture a pu être simulée et totalement validée, via les données des sites flux et des mesures spatialisées de biomasses et de rendements acquises sur plusieurs années. Des premières simulations spatialisées de flux de CO₂ et de bilans de C pluriannuels ont pu être réalisées, suite aux travaux de validations complètes du modèle sur les cultures de blé et de tournesol. Elles ont permis de quantifier l'impact de la végétation pouvant se développer pendant l'interculture (cultures intermédiaires, repousses, adventices) sur ces variables. Ces périodes étant toujours considérées comme étant en sol nu par les approches de modélisation globale (*e.g.* modèles IPCC) et les modèles agronomiques ne considérant généralement pas les développements d'adventice et/ou de repousses, les flux de CO₂ liés à la photosynthèse ainsi qu'à la respiration autotrophe des végétations d'intercultures ne sont jamais ou mal simulés. Cela peut entraîner d'important biais sur les flux net de CO₂ et bilans C des parcelles de grande culture. Grâce à l'assimilation de données de télédétection dans SAFY-CO₂, il sera donc sans doute possible d'estimer avec plus de précision les bilans de C spatialisés à l'échelle des rotations de cultures.

Par la suite le modèle SAFY-CO₂ a été couplé au module de bilan hydrique basé sur la méthode FAO-56, ce qui a permis d'estimer le contenu en eau du sol et ainsi les flux d'évaporation et de

transpiration. Ce couplage a donné naissance au modèle SAFYE-CO₂, les résultats mettent en évidence que l'effet du stress hydrique étaient déjà implicitement pris en compte via l'assimilation des séries temporelles d'indices de végétation issues du satellite. Parallèlement, il a été constaté que la qualité des produits sols existants (SoilGrids et GSM), nécessaires à l'estimation des propriétés de rétention d'eau du sol, n'était pas suffisante pour répondre aux objectifs de spatialisation de l'approche dans le cas d'une application à l'échelle parcellaire. Il a donc été conclu que le modèle SAFYE-CO₂ devrait être utilisé avec des données sols acquises à la parcelle, pour une estimation précise des besoins en eau des cultures, et que la fonction de stress hydrique impactant la photosynthèse devrait être désactivée.

Des améliorations sont encore à apporter à cette approche, notamment concernant 1) une meilleure représentation des mécanismes de minéralisation de la matière organique du sol (un couplage avec un modèle sol est envisagé), 2) l'utilisation de données satellitales radar pour combler les trous dans les observations satellitales optiques dues à de longues périodes ennuagées et 3) la mise en œuvre d'une paramétrisation spécifique pour les cultures intermédiaires. Enfin, la transposabilité du modèle à des conditions pédoclimatiques plus contrastées devra être testée, et de nouvelles cultures devront être paramétrées dans le modèle pour pouvoir simuler un plus grand nombre de rotations de cultures.

Une seconde approche de modélisation a été développée dans le cadre de la thèse, pour rendre compte à large échelle des effets albédo sur les forçages radiatifs que pourraient engendrer les cultures intermédiaires lorsqu'elles sont introduites dans les rotations de cultures. Ainsi, le modèle RFCC a permis de fournir des estimations à court terme du changement d'albédo de surface et du forçage radiatif associé, liés à la mise en place des cultures intermédiaires à l'échelle Européenne. Initialement développé pour simuler des introductions de cultures intermédiaires après une culture d'hiver et avant une culture d'été, ce modèle a permis de fournir des estimations de l'effet albédo refroidissant des cultures intermédiaires. Ces premiers résultats confirmant les conclusions des rares travaux traitant de l'effet albédo des couverts, le modèle a été modifié pour tester de nouveaux scénarii d'introduction (allongement et extension des cultures intermédiaires à d'autres périodes d'intercultures) et prendre en compte l'effets d'autres facteurs, comme la pluie et la neige. Dans un objectif de quantification de l'impact climatique (biogéochimique et biogéophysique) pouvant être induit par l'utilisation de cultures intermédiaires, un exercice d'application des modèles SAFYE-CO₂ et RFCC a été mis en place sur une zone située dans le sud-ouest de la France. Il a été montré que les cultures intermédiaires permettaient d'augmenter significativement les capacités de puits de C ainsi que l'albédo des parcelles agricoles et que, ces deux effets entrant en synergie, les cultures intermédiaires avaient un fort potentiel d'atténuation des changements climatiques. Il a également été démontré que la durée d'introduction des cultures intermédiaires avait un impact sur les flux d'eau et par conséquent sur la disponibilité de la ressource hydrique pour la culture suivante.

Enfin, certains phénomènes ayant des effets sur des temps longs (décennie voire siècle) n'avaient pas été considérés jusque-là car les durées de simulation ne permettaient pas leur prise en compte. Ainsi, l'assombrissement du sol suite à l'incorporation de matière organique fraîche dans le sol via l'enfouissement des cultures intermédiaires a rapidement été identifié comme facteur pouvant avoir un fort impact radiatif. Le modèle RFCC a donc été modifié pour simuler 100 ans d'introduction de cultures intermédiaires et la décroissance d'albédo de sol lié à l'augmentation des contenus en matière organique du sol a été prise en compte dans le calcul du forçage radiatif. Il a été montré que l'assombrissement du sol pouvait largement contrebalancer les effets refroidissant (stockage de C, effet albédo lié à la couverture du sol) des cultures intermédiaires, et qu'il était donc important de promouvoir une couverture permanente des sols (maintien de végétation ou de pailles en surface) afin d'éviter cet effet antagoniste.

Ces travaux de thèse ont donc permis de développer des outils capables 1) de simuler de manière très réaliste le développement de la végétation et de quantifier les composantes du bilan de C et 2) de quantifier les effets albédo des parcelles agricoles sur de grands territoires. L'apport de la télédétection dans ces approches est crucial puisqu'elle permet de mettre en œuvre les modèles à large échelle. Aussi, il a été démontré l'importance des analyses couplées des effets biogéochimiques et biogéophysiques liés à des changements de pratiques afin d'obtenir des estimations précises de leur impact climatique. Ce point est essentiel afin de pouvoir guider la transition agricole et de lutter plus efficacement contre les changements climatiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Aguiar, R., Page, J., 1999. Chapter 3 ESRA Handbook European Solar Radiation Atlas ed W Palz, J Greif and J Scharmer 3rd edn (Brussels: Springer).
- Aillery, F., Antoni, V., Aouir, C., Arnaud, M., Bonnet, A., Besancon, M., Bonnard, P., Boughaba, J., Colas, S., Denoyer, G., Dubois, A., Duvernoy, J., Fèvre, C., Garcia, B., Gendre, C., Ghewy, X., Giroux, G., Grevet, A., Grassart, L., Gomez, S., Hébrail, V., Hirschler, O., Irz, P., Jédor, B., Moullec, A.L., Leenhardt, S., Lemarquis, D., Levêque, A., Lorge, A., Magnier, C., Molinié, L., Morard, V., Pasquier, J.-L., Pautard, E., Pons, C., Siniscalco, S., Soleilhavoup, M., Triquenot, A., Thual, J., Vey, F., Veyrac, C., n.d. Environnement & agriculture - Les chiffres clés – Édition 2018 124.
- Akbari, H., Menon, S., Rosenfeld, A., 2009. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change* 94, 275–286.
- Albergel, C., 2012. Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment* 12.
- Ali, I., Greifeneder, F., Stamenkovic, J., Neumann, M., Notarnicola, C., 2015. Review of Machine Learning Approaches for Biomass and Soil Moisture Retrievals from Remote Sensing Data. *Remote Sensing* 7, 16398–16421.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 15.
- Ameline, M., Fieuzal, R., Betbeder, J., Berthoumieu, J.-F., Baup, F., 2018. Estimation of Corn Yield by Assimilating SAR and Optical Time Series Into a Simplified Agro-Meteorological Model: From Diagnostic to Forecast. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11, 4747–4760.
- Amelung, W., Bossio, D., de Vries, W., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Amundson, R., Bol, R., Collins, C., Lal, R., Leifeld, J., Minasny, B., Pan, G., Paustian, K., Rumpel, C., Sanderman, J., van Groenigen, J.W., Mooney, S., van Wesemael, B., Wander, M., Chabbi, A., 2020. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nat Commun* 11, 5427.
- Amos, B., Walters, D.T., 2006. Maize Root Biomass and Net Rhizodeposited Carbon. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1489.
- Amthor, J., 2000. The McCree–de Wit–Penning de Vries–Thornley Respiration Paradigms: 30 Years Later. *Annals of Botany* 86, 1–20.
- Amthor, J.S., 1989. *Respiration and Crop Productivity*. Springer US, New York, NY.
- Anderson-Teixeira, K.J., Snyder, P.K., Twine, T.E., Cuadra, S.V., Costa, M.H., DeLucia, E.H., 2012. Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the Americas. *Nature Climate Change* 2, 177–181.
- Arkin, G.F., 1977. The future role of a crop model in large area yield estimation.
- Arnaud, M., Leroy, M., 1991. SPOT 4: a new generation of SPOT satellites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 46, 205–215.
- Arrhenius, S., 1897. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Earth. *PASP* 9, 14.
- Asseng, S., Keating, B.A., Fillery, I.R.P., Gregory, P.J., Bowden, J.W., Turner, N.C., Palta, J.A., Abrecht, D.G., 1998a. Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia. *Field Crops Research* 57, 163–179.
- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, Ü., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A.S., Martin, P.H., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grünwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R., Vesala, T., 1999a. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology. In: *Advances in Ecological Research*. Elsevier, pp. 113–175.
- Aubinet, M., Moureaux, C., Bodson, B., Dufranne, D., Heinesch, B., Suleau, M., Vancutsem, F., Vilret, A., 2009. Carbon sequestration by a crop over a 4-year sugar beet/winter wheat/seed potato/winter wheat rotation cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 407–418.

- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D. (Eds.), 2012a. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis, Springer atmospheric sciences. Springer, Dordrecht.
- Baker, D.N., Hesketh, J.D., Duncan, W.G., 1972. Simulation of Growth and Yield in Cotton: I. Gross Photosynthesis, Respiration, and Growth¹. *Crop Sci.* 12, 431–435.
- Baldocchi, D.D., 2003a. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9, 479–492.
- Baldock, J.A., Skjemstad, J.O., 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry* 31, 697–710.
- Bange, M.P., Hammer, G.L., Rickert, K.G., 1998. Temperature and Sowing Date Affect the Linear Increase of Sunflower Harvest Index. *Agronomy Journal* 90, 324.
- Bao, L., Trachtenberg, M.C., 2006. Facilitated transport of CO₂ across a liquid membrane: Comparing enzyme, amine, and alkaline. *Journal of Membrane Science* 280, 330–334.
- 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., 2007a. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION. *Remote Sensing of Environment* 110, 275–286.
- Baret, F., Olioso, A., Luciani, J.L., 1992. Root biomass fraction as a function of growth degree days in wheat. *Plant and Soil* 140, 137–144.
- Battude, M., Al Bitar, A., Brut, A., Tallec, T., Huc, M., Cros, J., Weber, J.-J., Lhuissier, L., Simonneaux, V., Demarez, V., 2017a. Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. *Agricultural Water Management* 189, 123–136.
- Battude, M., Al Bitar, A., Morin, D., Cros, J., Huc, M., Marais Sicre, C., Le Dantec, V., Demarez, V., 2016a. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 184, 668–681.
- Baup, F., Ameline, M., Fieuzal, R., Frappart, F., Corgne, S., Berthoumieu, J.-F., 2019. Temporal Evolution of Corn Mass Production Based on Agro-Meteorological Modelling Controlled by Satellite Optical and SAR Images. *Remote Sensing* 11, 1978.
- Baup, F., Fieuzal, R., Betbeder, J., 2015. Estimation of soybean yield from assimilated optical and radar data into a simplified agrometeorological model. In: 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Presented at the IGARSS 2015 - 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Milan, Italy, pp. 3961–3964.
- Baveye, P.C., Berthelin, J., Tessier, D., Lemaire, G., 2018a. The “4 per 1000” initiative: A credibility issue for the soil science community? *Geoderma* 309, 118–123.
- Beringer, J., Chapin, F.S., Thompson, C.C., McGuire, A.D., 2005. Surface energy exchanges along a tundra-forest transition and feedbacks to climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 131, 143–161.
- Berjón, A.J., Cachorro, V.E., Zarco-Tejada, P.J., de Frutos, A., 2013. Retrieval of biophysical vegetation parameters using simultaneous inversion of high resolution remote sensing imagery constrained by a vegetation index. *Precision Agriculture* 14, 541–557.
- Berrisford, P., 2011. Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuentes, M., ... & Simmons, A. (2011). The ERA-Interim archive, version 2.0. *Journal of Climate* 26, 7876–7901.
- Berrisford, P., Kållberg, P., Kobayashi, S., Dee, D., Uppala, S., Simmons, A.J., Poli, P., Sato, H., 2011. Atmospheric conservation properties in ERA-Interim: Atmospheric Conservation Properties in ERA-Interim. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 137, 1381–1399.
- Betbeder, J., Fieuzal, R., Baup, F., 2016. Assimilation of LAI and Dry Biomass Data From Optical and SAR Images Into an Agro-Meteorological Model to Estimate Soybean Yield. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9, 2540–2553.
- Betts, R.A., 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* 408, 187–190.
- Betts, R.A., Falloon, P.D., Goldewijk, K.K., Ramankutty, N., 2007. Biogeophysical effects of land use on climate: Model simulations of radiative forcing and large-scale temperature change. *Agricultural and Forest Meteorology* 142, 216–233.
- Béziat, P., Ceschia, E., Dedieu, G., 2009a. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1628–1645.

- Béziat, P., Rivalland, V., Tallec, T., Jarosz, N., Boulet, G., Gentine, P., Ceschia, E., 2013. Evaluation of a simple approach for crop evapotranspiration partitioning and analysis of the water budget distribution for several crop species. *Agricultural and Forest Meteorology* 177, 46–56.
- Bholowalia, P., n.d. EBK-Means: A Clustering Technique based on Elbow Method and K-Means in WSN. *International Journal of Computer Applications* 105, 8.
- Bird, D.N., Kunda, M., Mayer, A., Schlamadinger, B., Canella, L., Johnston, M., 2008. Incorporating changes in albedo in estimating the climate mitigation benefits of land use change projects. *Biogeosciences Discuss.* 5, 1511–1543.
- Bonan, G.B., 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320, 1444–1449.
- Bondeau, A., Smith, P.C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B., 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biol* 13, 679–706.
- Bonfils, C., Lobell, D., 2007. Empirical evidence for a recent slowdown in irrigation-induced cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 13582–13587.
- Boucher, O., Myhre, G., Myhre, A., 2004. Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Climate Dynamics* 22, 597–603.
- Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A.L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., Bekki, S., Bonnet, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., D'Andrea, F., Davini, P., Lavergne, C., Denvil, S., Deshayes, J., Devilliers, M., Ducharne, A., Dufresne, J., Dupont, E., Éthé, C., Fairhead, L., Falletti, L., Flavoni, S., Foujols, M., Gardoll, S., Gastineau, G., Ghattas, J., Grandpeix, J., Guenet, B., Guez, L., E., Guilyardi, E., Guimberteau, M., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Joussaume, S., Kageyama, M., Khodri, M., Krinner, G., Lebas, N., Levvasseur, G., Lévy, C., Li, L., Lott, F., Lurton, T., Luyssaert, S., Madec, G., Madeleine, J., Maignan, F., Marchand, M., Marti, O., Mellul, L., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Ottlé, C., Peylin, P., Planton, Y., Polcher, J., Rio, C., Rochetin, N., Rousset, C., Sepulchre, P., Sima, A., Swingedouw, D., Thiéblemont, R., Traore, A.K., Vancoppenolle, M., Vial, J., Vialard, J., Viovy, N., Vuichard, N., 2020. Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 12.
- Bouman, B.A.M., van Keulen, H., van Laar, H.H., Rabbinge, R., 1996a. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* 52, 171–198.
- Bright, R.M., 2015. Metrics for Biogeophysical Climate Forcings from Land Use and Land Cover Changes and Their Inclusion in Life Cycle Assessment: A Critical Review. *Environmental Science & Technology* 49, 3291–3303.
- Bright, R.M., O'Halloran, T.L., 2019. Developing a monthly radiative kernel for surface albedo change from satellite climatologies of Earth's shortwave radiation budget: CACK v1.0. *Geoscientific Model Development* 12, 3975–3990.
- Bright, R.M., Zhao, K., Jackson, R.B., Cherubini, F., 2015. Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities. *Global Change Biology* 21, 3246–3266.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2009). Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quae.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003a. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy* 18, 309–332.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., 2009. Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2009). Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quae.
- Brisson, N., Levraut, F., 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces. *Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007–2010)*, ADEME.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.M., Del colle, R., 1998. STICS: a generic model for the

- simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.-H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E., 2002a. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69–92.
- Brown, S.C.M., Quegan, S., Morrison, K., Bennett, J.C., Cookmartin, G., 2003. High-resolution measurements of scattering in wheat canopies-implications for crop parameter retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 1602–1610.
- Bsaibes, A., Courault, D., Baret, F., Weiss, M., Oliso, A., Jacob, F., Hagolle, O., Marloie, O., Bertrand, N., Desfond, V., Kzemipour, F., 2009. Albedo and LAI estimates from FORMOSAT-2 data for crop monitoring. *Remote Sensing of Environment* 113, 716–729.
- Burel, E., 2018. Modélisation des hétérogénéités de la réserve utile et du développement des cultures au sein d'un sous-bassin versant en Midi-Pyrénées 303.
- Caldeira, K., Bala, G., Cao, L., 2013. The Science of Geoengineering. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 41, 231–256.
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J.-L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Oliso, A., Wigneron, J.-P., 1998. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 92, 73–95.
- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998. Introduction to environmental biophysics, 2nd ed. ed. Springer, New York.
- Carrer, D., Meurey, C., Ceamanos, X., Roujean, J.-L., Calvet, J.-C., Liu, S., 2014. Dynamic mapping of snow-free vegetation and bare soil albedos at global 1km scale from 10-year analysis of MODIS satellite products. *Remote Sensing of Environment* 140, 420–432.
- Carrer, D., Pique, G., Ferlicoq, M., Ceamanos, X., Ceschia, E., 2018. What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops. *Environmental Research Letters* 13, 044030.
- Carrer, D., Roujean, J.-L., Meurey, C., 2010. Comparing operational MSG/SEVIRI land surface albedo products from Land SAF with ground measurements and MODIS 17.
- Casadebaig, P., Guilioni, L., Lecoq, J., Christophe, A., Champolivier, L., Debaeke, P., 2011a. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of the sunflower crop in contrasting environments. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 163–178.
- Castaldi, F., Hueni, A., Chabrilat, S., Ward, K., Buttafuoco, G., Bomans, B., Vreys, K., Brell, M., van Wesemael, B., 2019. Evaluating the capability of the Sentinel 2 data for soil organic carbon prediction in croplands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 147, 267–282.
- Ceschia, E., Béziat, P., Dejoux, J.F., Aubinet, M., Bernhofer, Ch., Bodson, B., Buchmann, N., Carrara, A., Cellier, P., Di Tommasi, P., Elbers, J.A., Eugster, W., Grünwald, T., Jacobs, C.M.J., Jans, W.W.P., Jones, M., Kutsch, W., Lanigan, G., Magliulo, E., Marloie, O., Moors, E.J., Moureaux, C., Oliso, A., Osborne, B., Sanz, M.J., Saunders, M., Smith, P., Soegaard, H., Wattenbach, M., 2010a. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 363–383.
- Ceschia, E., Mary, B., Ferlicoq, M., Pique, G., Carrer, D., Dejoux, J.-F., Dedieu, G., 2017. Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires.
- Chabbi, A., Lehmann, J., Ciais, P., Loescher, H.W., Cotrufo, M.F., Don, A., SanClements, M., Schipper, L., Six, J., Smith, P., Rumpel, C., 2017a. Aligning agriculture and climate policy. *Nature Climate Change* 7, 307–309.
- Champolivier, L., 2011. Pourquoi irriguer le tournesol.pdf. Champolivier, L., Debaeke, P., & Merrien, A. (2011). Pourquoi irriguer le tournesol, une culture réputée tolérante à la sécheresse?. *Innovations Agronomiques*, 14, 151-164.
- Champolivier, L., Debaeke, P., Dejoux, J.F., Dizien, C., Micheneau, A., Colombet, C., Gibrin, H., Pontet, C., Al Bitar, A., Trépos, R., Ansart, A., Marais Sicre, C., Garric, B., Mestries, E., Casadebaig, P., Fernandez-Diclo, Y., 2019. Outils, références et méthodes pour la construction d'un simulateur pour la prévision du rendement et de la qualité du tournesol à l'échelle territoriale mobilisant la télédétection satellitaire. *Innovations Agronomiques* 71, 15-34.

- Chang, J., n.d. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands 10.
- Chern, J.-S., Ling, J., Weng, S.-L., 2008. Taiwan's second remote sensing satellite. *Acta Astronautica* 63, 1305–1311.
- Cherubini, F., Bright, R.M., Strømman, A.H., 2012. Site-specific global warming potentials of biogenic CO₂ for bioenergy: contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. *Environ. Res. Lett.* 7, 045902.
- Choudhury, B.J., 2000. A sensitivity analysis of the radiation use efficiency for gross photosynthesis and net carbon accumulation by wheat. *Agricultural and Forest Meteorology* 101, 217–234.
- Ciais, P., Wattenbach, M., Vuichard, N., Smith, P., Piao, S.L., Don, A., Luyssaert, S., Janssens, I.A., Bondeau, A., Dechow, R., Leip, A., Smith, P., Beer, C., Van Der Werf, G.R., Gervois, S., Van Oost, K., Tomelleri, E., Freibauer, A., Schulze, E.D., CARBOEUROPE SYNTHESIS TEAM, 2010a. The European carbon balance. Part 2: croplands. *Global Change Biology* 16, 1409–1428.
- Cicek, H., Sunohara, M., Wilkes, G., McNairn, H., Pick, F., Topp, E., Lapen, D.R., 2010. Using vegetation indices from satellite remote sensing to assess corn and soybean response to controlled tile drainage. *Agricultural Water Management* 98, 261–270.
- Cierniewski, J., Ceglarek, J., Karnieli, A., Ben-Dor, E., Królewicz, S., Kaźmierowski, C., 2018. Shortwave Radiation Affected by Agricultural Practices. *Remote Sensing* 10, 419.
- Claverie, M., Demarez, V., Duchemin, B., Hagolle, O., Ducrot, D., Marais-Sicre, C., Dejoux, J.-F., Huc, M., Keravec, P., Béziat, P., Fieuzal, R., Ceschia, E., Dedieu, G., 2012a. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 124, 844–857.
- Clivot, H., 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling and Software* 15.
- Clivot, H., Mouny, J.-C., Duparque, A., Dinh, J.-L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S., Mary, B., 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software* 118, 99–113.
- Coleman, K., Jenkinson, D.S., 1996a. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 237–246.
- Cong, R., Wang, X., Xu, M., Ogle, S.M., Parton, W.J., 2014. Evaluation of the CENTURY Model Using Long-Term Fertilization Trials under Corn-Wheat Cropping Systems in the Typical Croplands of China. *PLoS ONE* 9, e95142.
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., Therond, O., 2015. The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology* 206, 55–68.
- Crutzen, P.J., 2006. Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Climatic Change* 77, 211–220.
- D. P. Swaney, J. W. Jones, W. G. Boggess, G. G. Wilkerson, J. W. Mishoe, 1983. Real-Time Irrigation Decision Analysis Using Simulation. *Transactions of the ASAE* 26, 0562–0568.
- da Rocha, H.R., Manzi, A.O., Cabral, O.M., Miller, S.D., Goulden, M.L., Saleska, S.R., R.-Coupe, N., Wofsy, S.C., Borma, L.S., Artaxo, P., Vourlitis, G., Nogueira, J.S., Cardoso, F.L., Nobre, A.D., Kruijt, B., Freitas, H.C., von Randow, C., Aguiar, R.G., Maia, J.F., 2009. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *J. Geophys. Res.* 114, G00B12.
- Daughtry, C.S.T., Doraiswamy, P.C., Hunt, E.R., Stern, A.J., McMurtrey, J.E., Prueger, J.H., 2006. Remote sensing of crop residue cover and soil tillage intensity. *Soil and Tillage Research* 91, 101–108.
- Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165–173.
- Davies, J.A., Idso, S.B., 1979. Estimating the surface radiation balance and its components modifications of the Aerial Environment of Crops ed B J Barfield and J F Gerber (MO: ASAE St. Joseph) pp 183–210.

- Davin, E.L., de Noblet-Ducoudré, N., Friedlingstein, P., 2007. Impact of land cover change on surface climate: Relevance of the radiative forcing concept: IMPACT OF LAND COVER CHANGE ON CLIMATE. *Geophys. Res. Lett.* 34, n/a-n/a.
- Davin, E.L., Seneviratne, S.I., Ciais, P., Olivos, A., Wang, T., 2014. Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 9757–9761.
- de F. Forster, P.M., Blackburn, M., Glover, R., Shine, K.P., 2000. An examination of climate sensitivity for idealised climate change experiments in an intermediate general circulation model. *Climate Dynamics* 16, 833–849.
- de Noblet-Ducoudré, N., Gervois, S., Ciais, P., Viovy, N., Brisson, N., Seguin, B., Perrier, A., 2004. Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie* 24, 397–407.
- de Rosnay, P., Calvet, J.-C., Kerr, Y., Wigneron, J.-P., Lemaître, F., Escorihuela, M.J., Sabater, J.M., Saleh, K., Barrié, J., Bouhours, G., Coret, L., Cherel, G., Dedieu, G., Durbe, R., Fritz, N.E.D., Froissard, F., Hoedjes, J., Kruszewski, A., Lavenue, F., Suquia, D., Waldteufel, P., 2006. SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 102, 377–389.
- de Wit, c;t, 1965. Photosynthesis of leaf canopies.
- de Witt, T., Brouwer, R., n.d. The simulation of photosynthetic systems 24.
- Debaeke, P., Casadebaig, P., Haquin, B., Mestries, E., Palleau, J.-P., Salvi, F., 2010. Simulation de la réponse variétale du tournesol à l'environnement à l'aide du modèle SUNFLO. *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 17, 143–151.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 137, 553–597.
- Delgoulet, É., 2014. La disponibilité future de la ressource en eau en France : quelle place pour le secteur agricole ?
- Delogu, E., 2013; Modélisation de la respiration du sol dans les agrosystèmes, Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- Delogu, E., Le Dantec, V., Mordelet, P., Ceschia, E., Aubinet, M., Buysse, P., Pattey, E., 2017a. Improved methodology to quantify the temperature sensitivity of the soil heterotrophic respiration in croplands. *Geoderma* 296, 18–29.
- Demarez, V., Duthoit, S., Baret, F., Weiss, M., Dedieu, G., 2008a. Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 644–655.
- Diepen, C.A., Wolf, J., Keulen, H., Rappoldt, C., 1989a. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5, 16–24.
- Diffenbaugh, N.S., Singh, D., Mankin, J.S., Horton, D.E., Swain, D.L., Touma, D., Charland, A., Liu, Y., Haugen, M., Tsiang, M., Rajaratnam, B., 2017. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events. *Proc Natl Acad Sci USA* 114, 4881–4886.
- Dimassi, B., Mary, B., Fontaine, S., Perveen, N., Revaillet, S., Cohan, J.-P., 2014. Effect of nutrients availability and long-term tillage on priming effect and soil C mineralization. *Soil Biology and Biochemistry* 78, 332–339.
- Doughty, C.E., Field, C.B., McMillan, A.M.S., 2011. Can crop albedo be increased through the modification of leaf trichomes, and could this cool regional climate?: A letter. *Climatic Change* 104, 379–387.
- Duan, S.-B., Li, Z.-L., Wu, H., Tang, B.-H., Ma, L., Zhao, E., Li, C., 2014. Inversion of the PROSAIL model to estimate leaf area index of maize, potato, and sunflower fields from unmanned aerial vehicle hyperspectral data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 26, 12–20.

- Duchemin, B., Fieuzal, R., Rivera, M., Ezzahar, J., Jarlan, L., Rodriguez, J., Hagolle, O., Watts, C., 2015a. Impact of Sowing Date on Yield and Water Use Efficiency of Wheat Analyzed through Spatial Modeling and FORMOSAT-2 Images. *Remote Sensing* 7, 5951–5979.
- Duchemin, B., Maisongrande, P., Boulet, G., Benhadj, I., 2008a. A simple algorithm for yield estimates: Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environmental Modelling & Software* 23, 876–892.
- Duncan, W.G., Loomis, R.S., Williams, W.A., Hanau, R., 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities.
- Duncan, W.G., McCloud, D.E., McGraw, R.L., Boote, K.J., 1978. Physiological Aspects of Peanut Yield Improvement ¹. *Crop Sci.* 18, 1015–1020.
- Duparque, A., Dinh, J.-L., Mary, B., Bouthier, A., Blin, B., Denoroy, P., Ganteil, F., Houot, S., Levert, M., Sagot, S., Trochard, R., 2013. AMG: a simple SOC balance model used in France for decision support 7.
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993a. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology* 18, 65–71.
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993b. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology* 18, 65–71.
- Eugster, W., Moffat, A.M., Ceschia, E., Aubinet, M., Ammann, C., Osborne, B., Davis, P.A., Smith, P., Jacobs, C., Moors, E., Le Dantec, V., Béziat, P., Saunders, M., Jans, W., Grünwald, T., Rebmann, C., Kutsch, W.L., Czerný, R., Janouš, D., Moureaux, C., Dufranne, D., Carrara, A., Magliulo, V., Di Tommasi, P., Olesen, J.E., Schelde, K., Oliso, A., Bernhofer, C., Cellier, P., Larmanou, E., Loubet, B., Wattenbach, M., Marloie, O., Sanz, M.-J., Sogaard, H., Buchmann, N., 2010a. Management effects on European cropland respiration. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 346–362.
- Falloon, P., Smith, P., 2003. Accounting for changes in soil carbon under the Kyoto Protocol: need for improved long-term data sets to reduce uncertainty in model projections. *Soil Use and Management* 19, 265–269.
- Falloon, P., Smith, P., 2006. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. *Soil Use and Management* 18, 101–111.
- Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A.T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E., Le Moigne, P., 2013a. ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geosci. Model Dev.* 6, 563–582.
- Farquhar, G.D., n.d. A Biochemical Model of Photosynthetic CO₂ Assimilation in Leaves of C₃ Species 13.
- Ferlicoq, M., Ceschia, E., 2015. Ferlicoq M., Ceschia E., 2015. La gestion de l'albédo des surfaces cultivées. In: Evaluer et agir par Bourges Bernard, Gourdon Thomas, Broc Jean-Sébastien (Coord). Presses des MINES, collection Développement durable, 2015. 386 pp. ISBN: 9782356712332.M.
- Ferrant, S., Gascoin, S., Veloso, A., Salmon-Monviola, J., Claverie, M., Rivalland, V., Dedieu, G., Demarez, V., Ceschia, E., Probst, J.-L., Durand, P., Bustillo, V., 2014. Agro-hydrology and multi-temporal high-resolution remote sensing: toward an explicit spatial processes calibration. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 5219–5237.
- Fieuzal, R., Duchemin, B., Jarlan, L., Zribi, M., Baup, F., Merlin, O., Hagolle, O., Garatuza-Payan, J., 2011a. Combined use of optical and radar satellite data for the monitoring of irrigation and soil moisture of wheat crops. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 1117–1129.
- Fieuzal, Remy, Marais Sicre, C., Baup, F., 2017a. Estimation of Sunflower Yield Using a Simplified Agrometeorological Model Controlled by Optical and SAR Satellite Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 10, 5412–5422.
- Fieuzal, R., Marais Sicre, C., Baup, F., 2017a. Estimation of corn yield using multi-temporal optical and radar satellite data and artificial neural networks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 57, 14–23.

- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., 2008. Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., Van Velthuisen, H. T., Verelst, L., & Wiberg, D. (2008). Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 10.
- Forster, P., 2007. Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D. W., ... & Nganga, J. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2. In *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. 2007.
- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Jones, C., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H.D., Raddatz, T., Rayner, P., Reick, C., Roeckner, E., Schnitzler, K.-G., Schnur, R., Strassmann, K., Weaver, A.J., Yoshikawa, C., Zeng, N., 2006. Climate–Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. *Journal of Climate* 19, 3337–3353.
- G. F. Arkin, R. L. Vanderlip, J. T. Ritchie, 1976. A Dynamic Grain Sorghum Growth Model. *Transactions of the ASAE* 19, 0622–0626.
- G. G. Wilkerson, J. W. Jones, K. J. Boote, K. T. Ingram, J. W. Mishoe, 1983a. Modeling Soybean Growth for Crop Management. *Transactions of the ASAE* 26, 0063–0073.
- G. Hoogenboom, J. W. Jones, K. J. Boote, 1992. Modeling Growth, Development, and Yield of Grain Legumes using Soygro, Pnutgro, and Beangro: A Review. *Transactions of the ASAE* 35, 2043–2056.
- Gabrielle, B., Denoroy, P., Gosse, G., Justes, E., Andersen, M.N., 1998. A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Research* 57, 209–222.
- Gabrielle, B., Laville, P., Duval, O., Nicoullaud, B., Germon, J.C., Hénault, C., 2006. Process-based modeling of nitrous oxide emissions from wheat-cropped soils at the subregional scale: REGIONAL N₂O EMISSIONS FROM ARABLE SOILS. *Global Biogeochemical Cycles* 20, n/a-n/a.
- Genesio, L., Bright, R.M., Alberti, G., Peressotti, A., Delle Vedove, G., Incerti, G., Toscano, P., Rinaldi, M., Muller, O., Miglietta, F., 2020. A chlorophyll-deficient, highly reflective soybean mutant: radiative forcing and yield gaps. *Environ. Res. Lett.* 15, 074014.
- Genesio, L., Miglietta, F., Lugato, E., Baronti, S., Pieri, M., Vaccari, F.P., 2012. Surface albedo following biochar application in durum wheat. *Environ. Res. Lett.* 9.
- Gerland, P., Raftery, A.E., ev ikova, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B.K., Chunn, J., Lalic, N., Bay, G., Buettner, T., Heilig, G.K., Wilmoth, J., 2014. World population stabilization unlikely this century. *Science* 346, 234–237.
- Gervois, S., Ciais, P., de Noblet-Ducoudré, N., Brisson, N., Vuichard, N., Viovy, N., 2008a. Carbon and water balance of European croplands throughout the 20th century: CARBON BALANCE OF EUROPEAN CROPLANDS. *Global Biogeochemical Cycles* 22, n/a-n/a.
- Gholinezhad, E., Aynaband, A., Hassanzade, A., Noormohamadi, G., Bernousi, I., 2009. Study of the Effect of Drought Stress on Yield, Yield Components and Harvest Index of Sunflower Hybrid Iroflor at Different Levels of Nitrogen and Plant Population 10.
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujean, J.-L., Jarlan, L., Los, S.O., 2006. Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products. *J. Geophys. Res.* 111, D18102.
- Goedkoop, M., n.d. Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A. M., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). ReCiPe. A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators At the Midpoint and the Endpoint Level; Report I: Characterisation.
- Govindasamy, B., Duffy, P.B., Caldeira, K., 2001. Land use changes and northern hemisphere cooling. *Geophys. Res. Lett.* 28, 291–294.
- Grant, R.F., Arkebauer, T.J., Dobermann, A., Hubbard, K.G., Schimelfenig, T.T., Suyker, A.E., Verma, S.B., Walters, D.T., 2007. Net Biome Productivity of Irrigated and Rainfed Maize–Soybean Rotations: Modeling vs. Measurements. *Agronomy Journal* 99, 1404.
- Gray, D.J., Trigliano, R.N., 2011. Towards a More Sustainable Agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences* 30, 1–1.
- Gray, M.L., Champagne, K.J., Fauth, D., Baltrus, J.P., Pennline, H., 2008. Performance of immobilized tertiary amine solid sorbents for the capture of carbon dioxide. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2, 3–8.

- Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P.W., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., Schlesinger, W.H., Shoch, D., Siikamäki, J.V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R.T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M.R., Herrero, M., Kiesecker, J., Landis, E., Laestadius, L., Leavitt, S.M., Minnemeyer, S., Polasky, S., Potapov, P., Putz, F.E., Sanderman, J., Silvius, M., Wollenberg, E., Fargione, J., 2017. Natural climate solutions. *Proc Natl Acad Sci USA* 114, 11645–11650.
- Guenet, B., Juarez, S., Bardoux, G., Abbadie, L., Chenu, C., 2012. Evidence that stable C is as vulnerable to priming effect as is more labile C in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 52, 43–48.
- Guo, L., Falloon, P., Coleman, K., Zhou, B., Li, Y., Lin, E., Zhang, F., 2007. Application of the RothC model to the results of long-term experiments on typical upland soils in northern China. *Soil Use and Management* 23, 63–70.
- Hadria, R., Duchemin, B., Jarlan, L., Dedieu, G., Baup, F., Khabba, S., Olioso, A., Le Toan, T., 2010a. Potentiality of optical and radar satellite data at high spatio-temporal resolutions for the monitoring of irrigated wheat crops in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12, S32–S37.
- Hagolle, O., Sylvander, S., Huc, M., Claverie, M., Clesse, D., Dechoz, C., Lonjou, V., Poulain, V., 2015. SPOT-4 (Take 5): Simulation of Sentinel-2 Time Series on 45 Large Sites. *Remote Sensing* 7, 12242–12264.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., 1997a. Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res.* 102, 6831–6864.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lacis, A., Asamoah, K., Beckford, K., Borenstein, S., Brown, E., Cairns, B., Carlson, B., Curran, B., de Castro, S., Druyan, L., Etwarrow, P., Ferde, T., Fox, M., Gaffen, D., Glascoe, J., Gordon, H., Hollandsworth, S., Jiang, X., Johnson, C., Lawrence, N., Lean, J., Lerner, J., Lo, K., Logan, J., Luckett, A., McCormick, M.P., McPeters, R., Miller, R., Minnis, P., Ramberran, I., Russell, G., Russell, P., Stone, P., Tegen, I., Thomas, S., Thomason, L., Thompson, A., Wilder, J., Willson, R., Zawodny, J., 1997b. Forcings and chaos in interannual to decadal climate change. *J. Geophys. Res.* 102, 25679–25720.
- Heady, E.O., 1957. An Econometric Investigation of the Technology of Agricultural Production Functions 21.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B.M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M.N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M.A., Vargas, R., MacMillan, R.A., Batjes, N.H., Leenaars, J.G.B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., Kempen, B., 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE* 12, e0169748.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* qj.3803.
- Hirsch, A.L., Wilhelm, M., Davin, E.L., Thiery, W., Seneviratne, S.I., 2017. Can climate-effective land management reduce regional warming? *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 2269–2288.
- Hollinger, D.Y., Kelliher, F.M., Schulze, E.-D., Bauer, G., Arneth, A., Byers, J.N., Hunt, J.E., McSeveny, T.M., Kobak, K.I., Milukova, I., Sogatchev, A., Tatarinov, F., Varlargin, A., Ziegler, W., Vygodskaya, N.N., 1998. Forest–atmosphere carbon dioxide exchange in eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology* 90, 291–306.
- Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., 2005. Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. *Tree Physiology* 25, 873–885.
- Hollinger, S.E., Bernacchi, C.J., Meyers, T.P., 2005. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States. *Agricultural and Forest Meteorology* 130, 59–69.
- Hoyaux, J., Moureaux, C., Tourneur, D., Bodson, B., Aubinet, M., 2008. Extrapolating gross primary productivity from leaf to canopy scale in a winter wheat crop. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 668–679.

- Huang, Y., Yu, Y., Zhang, W., Sun, W., Liu, S., Jiang, J., Wu, J., Yu, W., Wang, Y., Yang, Z., 2009. Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 106–129.
- Hugues, L., 2000. Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in ecology & evolution*, 15(2), 56–61.
- Hunter, M.C., White, C.M., Kaye, J.P., Kemanian, A.R., 2019. Ground-Truthing a Recent Report of Cover Crop-Induced Winter Warming. *Agric. environ. lett.* 4, 190007.
- J. R. Williams, C. A. Jones, J. R. Kiniry, D. A. Spinel, 1989a. The EPIC Crop Growth Model. *Transactions of the ASAE* 32, 0497–0511.
- Jacobson, M.Z., Ten Hoeve, J.E., 2012. Effects of Urban Surfaces and White Roofs on Global and Regional Climate. *Journal of Climate* 25, 1028–1044.
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C., Ustin, S.L., 2009a. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment* 113, S56–S66.
- Jones, C.A., Kiniry, J.R., Dyke, P.T., 1986a. CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235–265.
- Joos, F., Prentice, I.C., Sitch, S., Meyer, R., Hooss, G., Plattner, G.-K., Gerber, S., Hasselmann, K., 2001. Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Emission Scenarios. *Global Biogeochemical Cycles* 15, 891–907.
- Joos, F., Roth, R., Fuglestad, J.S., Peters, G.P., Enting, I.G., von Bloh, W., Brovkin, V., Burke, E.J., Eby, M., Edwards, N.R., Friedrich, T., Frölicher, T.L., Halloran, P.R., Holden, P.B., Jones, C., Kleinen, T., Mackenzie, F.T., Matsumoto, K., Meinshausen, M., Plattner, G.-K., Reisinger, A., Segsneider, J., Shaffer, G., Steinacher, M., Strassmann, K., Tanaka, K., Timmermann, A., Weaver, A.J., 2013. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 2793–2825.
- Joshi, M., Shine, K., Ponater, M., Stuber, N., Sausen, R., Li, L., 2003. A comparison of climate response to different radiative forcings in three general circulation models: towards an improved metric of climate change. *Climate Dynamics* 20, 843–854.
- Justes, E., Beaudoin, N., Bertuzzi, P. [et al], 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques 416.
- Justes, E., Richard, G., 2017. Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services 16.
- Kasampalis, D., Alexandridis, T., Deva, C., Challinor, A., Moshou, D., Zalidis, G., 2018. Contribution of Remote Sensing on Crop Models: A Review. *J. Imaging* 4, 52.
- Kätterer, T., Reichstein, M., Andrén, O., Lomander, A., 1998. Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils* 27, 258–262.
- Kaye, J.P., Quemada, M., 2017a. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37.
- Kiehl, J.T., Trenberth, K.E., 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 12.
- Kirschbaum, M.U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 753–760.
- Kislev, M.E., Weiss, E., Hartmann, A., 2004. Impetus for sowing and the beginning of agriculture: Ground collecting of wild cereals. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101, 2692–2695.
- Klein Tank, A.M.G., Wijngaard, J.B., Können, G.P., Böhm, R., Demarée, G., Gocheva, A., Mileta, M., Pashiardis, S., Hejkrlik, L., Kern-Hansen, C., Heino, R., Bessemoulin, P., Müller-Westermeier, G., Tzanakou, M., Szalai, S., Pálsdóttir, T., Fitzgerald, D., Rubin, S., Capaldo, M., Maugeri, M.,

- Leitass, A., Bukantis, A., Aberfeld, R., van Engelen, A.F.V., Forland, E., Mietus, M., Coelho, F., Mares, C., Razuvaev, V., Nieplova, E., Cegnar, T., Antonio López, J., Dahlström, B., Moberg, A., Kirchhofer, W., Ceylan, A., Pachaliuk, O., Alexander, L.V., Petrovic, P., 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment: EUROPEAN TEMPERATURE AND PRECIPITATION SERIES. *Int. J. Climatol.* 22, 1441–1453.
- Kodinariya, T., Makwana, P., 2013. Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering 1, 6.
- Krinner, G., Viovy, N., Noblet-Ducoudré, N. de, Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I.C., 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19.
- Kutsch, W.L., Aubinet, M., Buchmann, N., Smith, P., Osborne, B., Eugster, W., Wattenbach, M., Schrumpf, M., Schulze, E.D., Tomelleri, E., Ceschia, E., Bernhofer, C., Béziat, P., Carrara, A., Di Tommasi, P., Grünwald, T., Jones, M., Magliulo, V., Marloie, O., Moureaux, C., Olioso, A., Sanz, M.J., Saunders, M., Søgaard, H., Ziegler, W., 2010. The net biome production of full crop rotations in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 336–345.
- Kuzyakov, Y., Friedel, J.K., Stahr, K., 2000a. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology* 14.
- Laar, H.V., Goudriaan, J.V., Keulen, H.V., 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. As applied to spring wheat.
- Labbé, S., Lebourgeois, V., Jolivot, A., Marti, R., 2012a. Thermal infra-red remote sensing for water stress estimation in agriculture 11.
- LaFrance, B., Lenot, X., Ruffel, C., Cao, P., Rabaute, T., 2012. Outils de prétraitements des images optiques KALIDEOS. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection* 197, 10–16.
- Lagarias, J.C., Reeds, J.A., Wright, M.H., Wright, P.E., 1998. Convergence Properties of the Nelder--Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal on Optimization* 9, 112–147.
- Lal, R., 2002. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution* 10.
- Lal, R., 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304, 1623–1627.
- Lal, R., 2007. Carbon Management in Agricultural Soils. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 12, 303–322.
- Lal, R., 2016a. Beyond COP 21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. *Journal of Soil and Water Conservation* 71, 20A–25A.
- Latham, J., Rasch, P., Chen, C.-C., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K., Choularton, T., 2008. Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 366, 3969–3987.
- Le Moigne, P.L., 2009. SURFEX SCIENTIFIC DOCUMENTATION 211.
- Le service de l'observation et des statistiques (SOeS), 2017. Les prélèvements d'eau douce en France : les grands usages en 2013 et leur évolution depuis 20 ans.
- Lehuger, S., Gabrielle, B., Cellier, P., Loubet, B., Roche, R., Béziat, P., Ceschia, E., Wattenbach, M., 2010. Predicting the net carbon exchanges of crop rotations in Europe with an agro-ecosystem model. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 384–395.
- Lehuger, S., Gabrielle, B., Oijen, M. van, Makowski, D., Germon, J.-C., Morvan, T., Hénault, C., 2009. Bayesian calibration of the nitrous oxide emission module of an agro-ecosystem model. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133, 208–222.
- Lenton, T.M., Vaughan, N.E., 2009a. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmos. Chem. Phys.* 23.
- Li, C., Frolking, S., Frolking, T.A., 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97, 9759–9776.
- Li, C., Frolking, S., Harriss, R., 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles* 8, 237–254.
- Li, C., Frolking, S., Xiao, X., Moore, B., Boles, S., Qiu, J., Huang, Y., Salas, W., Sass, R., 2005. Modeling impacts of farming management alternatives on CO₂, CH₄, and N₂O emissions: A

- case study for water management of rice agriculture of China: WATER MANAGEMENT AND CHINA PADDY GREENHOUSE GAS FLUXES. *Global Biogeochemical Cycles* 19.
- Liu, J., Pattey, E., Miller, J.R., McNairn, H., Smith, A., Hu, B., 2010. Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model. *Remote Sensing of Environment* 114, 1167–1177.
- Lobell, D.B., Asner, G.P., Ortiz-Monasterio, J.I., Benning, T.L., 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 94, 205–220.
- Lohila, A., Aurela, M., Regina, K., Laurila, T., n.d. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type 15.
- Lombardozzi, D.L., Bonan, G.B., Wieder, W., Grandy, A.S., Morris, C., Lawrence, D.L., 2018. Cover Crops May Cause Winter Warming in Snow-Covered Regions. *Geophys. Res. Lett.* 45, 9889–9897.
- Lugato, E., Cescatti, A., Jones, A., Ceccherini, G., Duveiller, G., 2020a. Maximising climate mitigation potential by carbon and radiative agricultural land management with cover crops. *Environ. Res. Lett.* 15, 094075.
- Lutz, W., Sanderson, W., Scherbov, S., 2001. The end of world population growth. *Nature* 412, 543–545.
- Luyssaert, S., Jammot, M., Stoy, P.C., Estel, S., Pongratz, J., Ceschia, E., Churkina, G., Don, A., Erb, K., Ferlicoq, M., Gielen, B., Grünwald, T., Houghton, R.A., Klumpp, K., Knohl, A., Kolb, T., Kuemmerle, T., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., McGrath, M.J., Meyfroidt, P., Moors, E.J., Naudts, K., Novick, K., Otto, J., Pilegaard, K., Pio, C.A., Rambal, S., Rebmann, C., Ryder, J., Suyker, A.E., Varlagin, A., Wattenbach, M., Dolman, A.J., 2014. Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature. *Nature Clim Change* 4, 389–393.
- Ma, T., Zeng, W., Li, Q., Yang, X., Wu, J., Huang, J., 2017a. Shoot and Root Biomass Allocation of Sunflower Varying with Soil Salinity and Nitrogen Applications. *Agronomy Journal* 109, 2545.
- Ma, Y.C., Kong, X.W., Yang, B., Zhang, X.L., Yan, X.Y., Yang, J.C., Xiong, Z.Q., 2013. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice–wheat rotations with integrated soil–crop system management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164, 209–219.
- Mahmood, R., Pielke, R.A., Hubbard, K.G., Niyogi, D., Dirmeyer, P.A., McAlpine, C., Carleton, A.M., Hale, R., Gameda, S., Beltrán-Przekurat, A., Baker, B., McNider, R., Legates, D.R., Shepherd, M., Du, J., Blanken, P.D., Frauenfeld, O.W., Nair, U.S., Fall, S., 2014. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate: LAND COVER CHANGES AND THEIR BIOGEOPHYSICAL EFFECTS ON CLIMATE. *Int. J. Climatol.* 34, 929–953.
- Mahmoudkhani, M., Keith, D.W., 2009. Low-energy sodium hydroxide recovery for CO₂ capture from atmospheric air—Thermodynamic analysis. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 3, 376–384.
- Mary, B., Clivot, H., Blaszczyk, N., Labreuche, J., Ferchaud, F., 2020. Soil carbon storage and mineralization rates are affected by carbon inputs rather than physical disturbance: Evidence from a 47-year tillage experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 299, 106972.
- Masson, V., Champeaux, J.L., Chauvin, F., Meriguet, C., Pigeon, G., n.d. ECOCLIMAP: A GLOBAL DATABASE OF LAND SURFACE PARAMETERS AT 1-KM RESOLUTION IN METEOROLOGICAL AND CLIMATE MODELS 4.
- Masson, V.R., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C., Lacaze, R., 2003. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. *JOURNAL OF CLIMATE* 16, 22.
- Matthews, H.D., Caldeira, K., 2008. Stabilizing climate requires near-zero emissions. *Geophys. Res. Lett.* 35, L04705.
- Matthews, T.K.R., Wilby, R.L., Murphy, C., 2017. Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proc Natl Acad Sci USA* 114, 3861–3866.
- McCarty, J.P., 2001. Ecological Consequences of Recent Climate Change. *Conservation Biology* 15, 320–331.

- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M., 1996. APSIM: a Novel Software System for Model Development, Model Testing and Simulation in Agricultural Systems Research 19.
- McCree, K.J., 1974. Equations for the Rate of Dark Respiration of White Clover and Grain Sorghum, as Functions of Dry Weight, Photosynthetic Rate, and Temperature. *Crop Science* 14, 509.
- McKinion, J.M., Baker, D.N., Whisler, F.D., Lambert, J.R., 1989. Application of the GOSSYM/COMAX system to cotton crop management. *Agricultural Systems* 31, 55–65.
- Meinke, H., Hammer, G.L., 1997. Forecasting regional crop production using SOI phases: an example for the Australian peanut industry. *Aust. J. Agric. Res.* 48, 789.
- Merlin, O., Chehbouni, G., Kerr, Y., Njoku, E.G., Entekhabi, D., 2005. A combined modeling and multipectral/multiresolution remote sensing approach for disaggregation of surface soil moisture: Application to SMOS configuration 36.
- Meyer, S., Bright, R.M., Fischer, D., Schulz, H., Glaser, B., 2012a. Albedo Impact on the Suitability of Biochar Systems To Mitigate Global Warming. *Environmental Science & Technology* 46, 12726–12734.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017a. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86.
- Minasny, B., McBratney, A.B., 2010. Methodologies for Global Soil Mapping. In: Boettinger, J.L., Howell, D.W., Moore, A.C., Hartemink, A.E., Kienast-Brown, S. (Eds.), *Digital Soil Mapping*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 429–436.
- Moncrieff, J.B., Massheder, J.M., de Bruin, H., Elbers, J., Friborg, T., Heusinkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Soegaard, H., Verhoef, A., 1997a. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology* 188–189, 589–611.
- Monteith, J.L., Moss, C.J., 1977a. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 281, 277–294.
- Moureaux, C., 2008. Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné d'une rotation de quatre cultures 186.
- Mulder, V.L., 2016. National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France 19.
- Muñoz, I., Campa, P., Fernández-Alba, A.R., 2010. Including CO₂-emission equivalence of changes in land surface albedo in life cycle assessment. *Methodology and case study on greenhouse agriculture. The International Journal of Life Cycle Assessment* 15, 672–681.
- Myhre, G., Shindell, D., Pongratz, J., 2014. Myhre, G., Shindell, D., & Pongratz, J. (2014). Anthropogenic and natural radiative forcing. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* 659–740.
- Nishimura, S., Yonemura, S., Sawamoto, T., Shirato, Y., Akiyama, H., Sudo, S., Yagi, K., 2008. Effect of land use change from paddy rice cultivation to upland crop cultivation on soil carbon budget of a cropland in Japan. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 125, 9–20.
- O'Halloran, T.L., Law, B.E., Goulden, M.L., Wang, Z., Barr, J.G., Schaaf, C., Brown, M., Fuentes, J.D., Göckede, M., Black, A., Engel, V., 2012. Radiative forcing of natural forest disturbances. *Global Change Biology* 18, 555–565.
- Oke, T.R., 2002. *Boundary layer climates*. Routledge.
- Ollier, C., Utz, H., 2008. *Agriculture and fisheries* 4.
- Orsolini, Y., Wegmann, M., Dutra, E., Liu, B., Balsamo, G., Yang, K., de Rosnay, P., Zhu, C., Wang, W., Senan, R., Arduini, G., 2019a. Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations. *The Cryosphere* 13, 2221–2239.
- Osborne, B., Saunders, M., Walmsley, D., Jones, M., Smith, P., 2010a. Key questions and uncertainties associated with the assessment of the cropland greenhouse gas balance. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 293–301.
- Otterman, J., 1977. Anthropogenic impact on the albedo of the earth. *Climatic Change* 1, 137–155.

- Panda, S.S., Ames, D.P., Panigrahi, S., 2010. Application of Vegetation Indices for Agricultural Crop Yield Prediction Using Neural Network Techniques. *Remote Sensing* 2, 673–696.
- Parton, W.J., Hartman, M., Ojima, D., Schimel, D., 1998. DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. *Global and Planetary Change* 19, 35–48.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V., Ojima, D.S., 1987. Analysis of Factors Controlling Soil Organic Matter Levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51, 1173–1179.
- Paw U, K.T., Baldocchi, D.D., Meyers, T.P., Wilson, K.B., 2000. Correction Of Eddy-Covariance Measurements Incorporating Both Advective Effects And Density Fluxes. *Boundary-Layer Meteorology* 97, 487–511.
- Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Doelsch, I.B., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Darroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., Gilbert, D., Graux, A.-I., Guenet, B., Houot, S., Klumpp, K., Letort, E., Litrico, I., Martin, M., Menasseri-Aubry, S., Meziere, D., Morvan, T., Mosnier, C., Roger-Estrade, J., Saint-André, L., Sierra, J., Therond, O., Viaud, V., Grateau, R., Perchec, S.L., Savini, I., Rechauchère, O., 2019. Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût? 118.
- Penning de Vries, F.W.T., 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. IRRI ; Pudoc, Los Baños; Wageningen.
- Peters, G.P., Andrew, R.M., Boden, T., Canadell, J.G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M.R., Wilson, C., 2013. The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Clim Change* 3, 4–6.
- Pielke, R.A., 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Global Change Biology* 15.
- Pielke, R.A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmood, R., McAlpine, C., Hossain, F., Goldewijk, K.K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P., de Noblet, N., 2011. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence: Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Clim Change* 2, 828–850.
- Pique, G., Fieuzal, R., Al Bitar, A., Veloso, A., Tallec, T., Brut, A., Ferlicoq, M., Zawilski, B., Dejoux, J.-F., Gibrin, H., Ceschia, E., 2020a. Estimation of daily CO₂ 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.
- Pique, G., Fieuzal, R., Ceschia, E., 2020b. Estimation of biomass and CO₂ fluxes of sunflower by assimilating HSTR data in a simple crop model.
- Pique, G., Fieuzal, R., Debaeke, P., Al Bitar, A., Tallec, T., Ceschia, E., 2020c. Combining High-Resolution Remote Sensing Products with a Crop Model to Estimate Carbon and Water Budget Components: Application to Sunflower. *Remote Sensing* 12, 2967.
- Pique, G., Wijmert, T., Fieuzal, R., Ceschia, E., 2020d. Estimation of crop production and CO₂ fluxes using remote sensing: Application to a winter wheat/sunflower rotation 3, 7.
- Poepflau, C., Don, A., 2015a. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, 33–41.
- Poulton, P., Johnston, J., Macdonald, A., White, R., Powlson, D., 2018a. Major limitations to achieving “4 per 1000” increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Global Change Biology* 24, 2563–2584.
- Powlson, D.S., Stirling, C.M., Thierfelder, C., White, R.P., Jat, M.L., 2016. Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 220, 164–174.
- Pringle, H., 1998. NEOLITHIC AGRICULTURE: The Slow Birth of Agriculture. *Science* 282, 1446–1446.
- Qu, Y., Liang, S., Liu, Q., He, T., Liu, S., Li, X., 2015. Mapping Surface Broadband Albedo from Satellite Observations: A Review of Literatures on Algorithms and Products. *Remote Sensing* 7, 990–1020.

- Rasmussen, I.S., Dresbøll, D.B., Thorup-Kristensen, K., 2015. Winter wheat cultivars and nitrogen (N) fertilization—Effects on root growth, N uptake efficiency and N use efficiency. *European Journal of Agronomy* 68, 38–49.
- Rasmussen, I.S., Thorup-Kristensen, K., 2016. Does earlier sowing of winter wheat improve root growth and N uptake? *Field Crops Research* 196, 10–21.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W., 2004. Life cycle assessment. *Environment International* 30, 701–720.
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grunwald, T., Havrankova, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J.-M., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., Valentini, R., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11, 1424–1439.
- Revill, A., Sus, O., Barrett, B., Williams, M., 2013a. Carbon cycling of European croplands: A framework for the assimilation of optical and microwave Earth observation data. *Remote Sensing of Environment* 137, 84–93.
- Ridgwell, A., Singarayer, J.S., Hetherington, A.M., Valdes, P.J., 2009. Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-geoengineering. *Current Biology* 19, 146–150.
- Ritchie, J.T., Otter, S., 1984. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model 12.
- Robock, A., Marquardt, A., Kravitz, B., Stenchikov, G., 2009. Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophys. Res. Lett.* 36, L19703.
- Roderick, M.L., Farquhar, G.D., Berry, S.L., Noble, I.R., 2001. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia* 129, 21–30.
- Román Dobarco, M., Bourennane, H., Arrouays, D., Saby, N.P.A., Cousin, I., Martin, M.P., 2019. Uncertainty assessment of GlobalSoilMap soil available water capacity products: A French case study. *Geoderma* 344, 14–30.
- Román Dobarco, Mercedes, Cousin, I., Le Bas, C., Martin, M.P., 2019. Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma* 336, 81–95.
- Rotenberg, E., Yakir, D., 2010. Contribution of Semi-Arid Forests to the Climate System. *Science* 327, 451–454.
- Roujean, J.-L., Olioso, A., Ceschia, E., Hagolle, O., Weiss, M., Tallec, T., Brut, A., Ferlicoq, M., 2019. A SURFACE ALBEDO PRODUCT AT HIGH SPATIAL RESOLUTION FROM A COMBINATION OF SENTINEL-2 AND LANDSAT-8 DATA: THE ROLE OF SURFACE RADIATIVE FORCING FROM AGRICULTURE AREAS AS A MAJOR CONTRIBUTOR TO AN ABATEMENT OF CARBON EMISSION. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-3/W6, 59–61.
- Ruimy, A., Dedieu, G., Saugier, B., 1996. TURC: A diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles* 10, 269–285.
- Runck, B.C., Khoury, C.K., Ewing, P.M., Kantar, M., 2020. The hidden land use cost of upscaling cover crops. *Commun Biol* 3, 300.
- Running, S.W., Thornton, P.E., Nemani, R., Glassy, J.M., 2000. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System. In: Sala, O.E., Jackson, R.B., Mooney, H.A., Howarth, R.W. (Eds.), *Methods in Ecosystem Science*. Springer New York, New York, NY, pp. 44–57.
- Saadi, S., Simonneaux, V., Boulet, G., Raimbault, B., Mougenot, B., Fanise, P., Ayari, H., Lili-Chabaane, Z., 2015. Monitoring Irrigation Consumption Using High Resolution NDVI Image Time Series: Calibration and Validation in the Kairouan Plain (Tunisia). *Remote Sensing* 7, 13005–13028.
- Saffih-Hdadi, K., Mary, B., 2008. Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 594–607.

- Sakowska, K., Alberti, G., Genesio, L., Peressotti, A., Delle Vedove, G., Gianelle, D., Colombo, R., Rodeghiero, M., Panigada, C., Juszczak, R., Celesti, M., Rossini, M., Haworth, M., Campbell, B.W., Mevy, J.-P., Vescovo, L., Cendrero-Mateo, M.P., Rascher, U., Miglietta, F., 2018a. Leaf and canopy photosynthesis of a chlorophyll deficient soybean mutant: photosynthesis of a Chl-deficient mutant. *Plant Cell Environ* 41, 1427–1437.
- Schmidt, M., Reichenau, T.G., Fiener, P., Schneider, K., 2012. The carbon budget of a winter wheat field: An eddy covariance analysis of seasonal and inter-annual variability. *Agricultural and Forest Meteorology* 165, 114–126.
- Schwalm, C.R., Glendon, S., Duffy, P.B., 2020. RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. *Proc Natl Acad Sci USA* 117, 19656–19657.
- Serbin, G., Hunt, E.R., Daughtry, C.S., McCarty, G., Doraiswamy, P., 2009. An Improved ASTER Index for Remote Sensing of Crop Residue. *Remote Sensing* 1, 971–991.
- Shanahan, J.F., Schepers, J.S., Francis, D.D., Varvel, G.E., Wilhelm, W.W., Tringe, J.M., Schlemmer, M.R., Major, D.J., 2001. Use of Remote-Sensing Imagery to Estimate Corn Grain Yield. *Agronomy Journal* 93, 583.
- Sibley, A.M., Grassini, P., Thomas, N.E., Cassman, K.G., Lobell*, D.B., 2014. Testing Remote Sensing Approaches for Assessing Yield Variability among Maize Fields. *Agronomy Journal* 106, 24.
- Sieber, P., Ericsson, N., Hansson, P.-A., 2019. Climate impact of surface albedo change in Life Cycle Assessment: Implications of site and time dependence. *Environmental Impact Assessment Review* 77, 191–200.
- Siebert, S., Portmann, F.T., Döll, P., 2010. Global Patterns of Cropland Use Intensity. *Remote Sensing* 2, 1625–1643.
- Singarayer, J.S., Davies-Barnard, T., 2012. Regional climate change mitigation with crops: context and assessment. *Phil. Trans. R. Soc. A* 370, 4301–4316.
- Skinner, J.A., Lewis, K.A., Bardon, K.S., Tucker, P., Catt, J.A., Chambers, B.J., 1997. An Overview of the Environmental Impact of Agriculture in the U.K. *Journal of Environmental Management* 50, 111–128.
- Smith, J., Smith, P., Wattenbach, M., Zaehle, S., Hiederer, R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Ewert, F., 2005. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990-2080. *Global Change Biol* 11, 2141–2152.
- Smith, P., 2004. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy* 20, 229–236.
- Smith, P., Andren, O., Karlsson, T., Perala, P., Regina, K., Rounsevell, M., Wesemael, B., 2005. Carbon sequestration potential in European croplands has been overestimated. *Global Change Biology* 11, 2153–2163.
- Smith, P., Lanigan, G., Kutsch, W.L., Buchmann, N., Eugster, W., Aubinet, M., Ceschia, E., Béziat, P., Yeluripati, J.B., Osborne, B., Moors, E.J., Brut, A., Wattenbach, M., Saunders, M., Jones, M., 2010. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 302–315.
- Smith, P., Smith, J.U., Powlson, D.S., McGill, W.B., Arah, J.R.M., Chertov, O.G., Coleman, K., Franko, U., Frolking, S., Jenkinson, D.S., Jensen, L.S., Kelly, R.H., Klein-Gunnewiek, H., Komarov, A.S., Li, C., Molina, J.A.E., Mueller, T., Parton, W.J., Thornley, J.H.M., Whitmore, A.P., 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81, 153–225.
- Smith, S.J., Rasch, P.J., 2013. The long-term policy context for solar radiation management. *Climatic Change* 121, 487–497.
- Soares, J.V., Bernard, R., Taconet, O., Vidal-Madjar, D., Weill, A., 1988a. Estimation of bare soil evaporation from airborne measurements. *Journal of Hydrology* 99, 281–296.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009a. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal* 101, 426.
- Stephens, G.L., O'Brien, D., Webster, P.J., Pilewski, P., Kato, S., Li, J., 2015. The albedo of Earth: The Albedo of Earth. *Rev. Geophys.* 53, 141–163.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003a. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289–307.

- Sun, Q., 2017. Evaluation of the global MODIS 30 arc-second spatially and temporally complete snow-free land surface albedo and reflectance anisotropy dataset. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14.
- Sus, O., Heuer, M.W., Meyers, T.P., Williams, M., 2013. A data assimilation framework for constraining upscaled cropland carbon flux seasonality and biometry with MODIS. *Biogeosciences* 10, 2451–2466.
- Szczypta, C., Calvet, J.-C., Maignan, F., Dorigo, W., Baret, F., Ciais, P., 2014. Suitability of modelled and remotely sensed essential climate variables for monitoring Euro-Mediterranean droughts. *Geosci. Model Dev.* 7, 931–946.
- Szczypta, C., Decharme, B., Carrer, D., Calvet, J.-C., Lafont, S., Somot, S., Faroux, S., Martin, E., 2012. Impact of precipitation and land biophysical variables on the simulated discharge of European and Mediterranean rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 3351–3370.
- Talleg, T., Béziat, P., Jarosz, N., Rivalland, V., Ceschia, E., 2013a. Crops' water use efficiencies in temperate climate: Comparison of stand, ecosystem and agronomical approaches. *Agricultural and Forest Meteorology* 168, 69–81.
- Thornton, P.K., Bowen, W.T., Ravelo, A.C., Wilkens, P.W., Farmer, G., Brock, J., Brink, J.E., 1997. Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modelling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology* 83, 95–112.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 20260–20264.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M.-T.A., Stöckle, C., Steduto, P., 2009a. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agronomy Journal* 101, 509.
- Tribouillois, H., Constantin, J., Justes, E., 2018a. Cover crops mitigate direct greenhouse gases balance but reduce drainage under climate change scenarios in temperate climate with dry summers. *Global Change Biology* 24, 2513–2529.
- van der Werf, H.M.G., Petit, J., 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 93, 131–145.
- van Ittersum, M.K., 2003. On approaches and applications of the Wageningen cropmodels.
- van Laar, H.H., n.d. Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations: as applied to spring wheat. Van Laar, H. H., Goudriaan, J., & Van Keulen, H. (1992). Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations: as applied to spring wheat (No. 27). CABO-DLO.
- Van't Hoff, n.d. SANZ-COBENA_2014.pdf. Van't Hoff, J.H. (1898) Lectures on Theoretical and Physical Chemistry. Part I. Chemical Dynamics (translated by R. A. Lehfeldt), pp. 224–229. Edward Arnold, London.
- Vaudour, E., Gomez, C., Fouad, Y., Lagacherie, P., 2019a. Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperate and Mediterranean agroecosystems. *Remote Sensing of Environment* 223, 21–33.
- Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Planells, M., Dejoux, J.-F., Ceschia, E., 2017. Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment* 199, 415–426.
- Villalobos, F.J., Hall, A.J., Ritchie, J.T., Orgaz, F., 1996. OILCROP-SUN: A Development, Growth, and Yield Model of the Sunflower Crop. *Agronomy Journal* 88, 403.
- Virto, I., Barré, P., Burlot, A., Chenu, C., 2012. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. *Biogeochemistry* 108, 17–26.
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., Chauvin, F., 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Clim Dyn* 40, 2091–2121.

- Wang, X., Ma, M., Huang, G., Veroustraete, F., Zhang, Z., Song, Y., Tan, J., 2012. Vegetation primary production estimation at maize and alpine meadow over the Heihe River Basin, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 17, 94–101.
- Wang, Y., Hu, C., Dong, W., Li, X., Zhang, Y., Qin, S., Oenema, O., 2015. Carbon budget of a winter-wheat and summer-maize rotation cropland in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 206, 33–45.
- Watson, A., Boyd, P., Turner, S., Jickells, T., Liss, P., 2008. Designing the next generation of ocean iron fertilization experiments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 364, 303–309.
- Wattenbach, M., Sus, O., Vuichard, N., Lehuger, S., Gottschalk, P., Li, L., Leip, A., Williams, M., Tomelleri, E., Kutsch, W.L., Buchmann, N., Eugster, W., Dietiker, D., Aubinet, M., Ceschia, E., Béziat, P., Grünwald, T., Hastings, A., Osborne, B., Ciais, P., Cellier, P., Smith, P., 2010. The carbon balance of European croplands: A cross-site comparison of simulation models. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 419–453.
- West, T.O., Brandt, C.C., Baskaran, L.M., Hellwinckel, C.M., Mueller, R., Bernacchi, C.J., Bandaru, V., Yang, B., Wilson, B.S., Marland, G., Nelson, R.G., Ugarte, D.G.D.L.T., Post, W.M., 2010. Cropland carbon fluxes in the United States: increasing geospatial resolution of inventory-based carbon accounting. *Ecological Applications* 20, 1074–1086.
- Wiegand, C.L., Richardson, A.J., Kanemasu, E.T., 1979. Leaf Area Index Estimates for Wheat from LANDSAT and Their Implications for Evapotranspiration and Crop Modeling ¹. *Agron.j.* 71, 336–342.
- Williams, M., Rastetter, E.B., Fernandes, D.N., Goulden, M.L., Wofsy, S.C., Shaver, G.R., Melillo, J.M., Munger, J.W., Fan, S.-M., Nadelhoffer, K.J., 1996. Modelling the soil-plant-atmosphere continuum in a Quercus-Acer stand at Harvard Forest: the regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties. *Plant, Cell and Environment* 19, 911–927.
- Wolanin, A., Camps-Valls, G., Gómez-Chova, L., Mateo-García, G., van der Tol, C., Zhang, Y., Guanter, L., 2019. Estimating crop primary productivity with Sentinel-2 and Landsat 8 using machine learning methods trained with radiative transfer simulations. *Remote Sensing of Environment* 225, 441–457.
- Wu, S., Huang, J., Liu, X., Fan, J., Ma, G., Zou, J., 2012. Assimilating MODIS-LAI into Crop Growth Model with EnKF to Predict Regional Crop Yield. In: Li, D., Chen, Y. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture V*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 410–418.
- Wu, X., Vuichard, N., Ciais, P., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Wang, X., Magliulo, V., Wattenbach, M., Vitale, L., Tommasi, P.D., Moors, E.J., Jans, W., Elbers, J., Ceschia, E., Tallec, T., Bernhofer, C., Grünwald, T., Moureaux, C., Manise, T., Ligne, A., Cellier, P., Loubet, B., Larmanou, E., Ripoche, D., 2016. ORCHIDEE-CROP (v0), a new process-based agro-land surface model: model description and evaluation over Europe. *Geosci. Model Dev.* 17.
- Yin, X., n.d. sampling-notes.pdf. Yin, X., & van Laar, H. H. (2005). *Crop Systems Dynamics: An Ecophysiological Model of Genotype-by-Environment Interactions (GECROS)*. Wageningen. Summary.
- Yu, P., Li, X., White, P.J., Li, C., 2015. A Large and Deep Root System Underlies High Nitrogen-Use Efficiency in Maize Production. *PLOS ONE* 10, e0126293.
- Zhai, J., Liu, R., Liu, J., Zhao, G., Huang, L., 2014. Radiative forcing over China due to albedo change caused by land cover change during 1990–2010. *J. Geogr. Sci.* 24, 789–801.
- Zhan, M., Liska, A.J., Nguy-Robertson, A.L., Suyker, A.E., Pelton, M.P., Yang, H., 2019. Modeled and Measured Ecosystem Respiration in Maize–Soybean Systems Over 10 Years. *Agronomy Journal* 111, 49.
- Zheng, B., Campbell, J.B., de Beurs, K.M., 2012. Remote sensing of crop residue cover using multi-temporal Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 7.

Liste des illustrations

Liste des figures

- Figure 1 : Haut : anomalies de température globale depuis 1850 (les couleurs représentant des jeux de données différents). Bas : concentration globale de certains gaz à effet de serre (*i.e.* CO₂, CH₄ et N₂O). Extrait du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014). 14
- Figure 2 : Composantes du forçage radiatif observé entre 1750 et 2011, d'origines anthropiques et naturelles. Extrait du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014). 15
- Figure 3 : Distribution des émissions totales de gaz à effet de serre par secteur. Source : FAOSTAT (2017, <http://www.fao.org/faostat/>). 16
- Figure 4 : Interactions des agrosystèmes avec l'atmosphère. Les effets biogéochimiques se décomposent généralement entre le bilan de C et les autres émissions de GES (cadre de gauche). Les effets biogéophysiques concernent les effets radiatifs courtes et longues longueurs d'onde et non radiatif, *i.e.* flux de chaleur (cadre de droite). 20
- Figure 5 : Flux de CO₂ sur agroécosystème. NEE : flux net de CO₂. GPP : photosynthèse. NPP : production primaire nette. TER : respiration totale de l'écosystème. Ra : respiration autotrophe aérienne. Rab : respiration autotrophe racinaire. Rh : respiration hétérotrophe. Extrait de Moureau et al., (2008). 21
- Figure 6 : Répartition et distribution de l'énergie provenant du soleil à la surface de la Terre. Les quantités sont exprimées en W.m⁻². Extrait de Kiehl and Trenberth, 1997. 28
- Figure 7 : Localisation des sites instrumentés d'Auradé et Lamasquère en France. Le carré vert représente l'emprise du satellite SPOT (2001-2012). 37
- Figure 8 : Dispositifs instrumentaux de Lamasquère et d'Auradé. 37
- Figure 9 : Zone d'application du modèle d'introduction de CI, RFCC. La zone comprend les 28 pays de l'Union Européenne ainsi que la Suisse et la Norvège. 39
- Figure 10 : Localisation des mesures faites au cours des différentes campagnes. 42
- Figure I-1 : Distribution des composantes du bilan de carbone et de GES sur les grandes cultures. Moyennes Européenne et coefficient de variation. Extrait de Osborne et al., 2010a. 49
- Figure I-2 : Mesures de photosynthèse (gauche) et de respiration autotrophe (droite) réalisées sur des feuilles de blé au cours d'une saison en Belgique en 2004. Extrait de Hoyaux et al., 2008. 51
- Figure I-3 : The upper right corner shows the location of the study site in southwestern France, as well as the footprint of Formosat-2 (green square) and Spot (orange square) images (in 2014 and 2012, respectively). The SPOT-4 false color image used as the background shows the flux sites of FR-Aur and FR-Lam (zoomed areas), the network of fields sampled for biomass and yield during the 2011 field campaign (yellow points), and the SAFRAN meteorological grid (black crosses). 56
- Figure I-4 : Surface texture measurements (FR-Lam in red, FR-Aur in blue and field campaign in black) displayed on USDA classification, with the following classes: clay (Cl), silty clay (SiCl), sandy clay (SaCl), clay loam (ClLo), silty clay loam (SiClLo), sandy clay loam (SaClLo), loam (Lo), silty loam (SiLo), sandy loam (SaLo), silt (Si), loamy sand (LoSa), sand (Sa). 57
- Figure I-5 : Timeline of the images acquired by Formosat-2 (green) and SPOT-2/4/5 (orange). 60
- Figure I-6 : Schematic representation of the assimilation procedure of GAI derived from high resolution satellite optical images for the calibration of the agro-meteorological model SAFY-CO₂ by

- minimizing difference between satellite derived (SAT) and simulated (SIM) GAI. Also, the figure shows the procedure for estimating the crop biomass, the components of the net CO₂ fluxes (GPP, R_{eco}, NEE) and the annual carbon budgets (NECB) over a cropping season (see Tables 2 to 6 and equations 1 to 11.3.1 for more details concerning the processes simulated and the parameters)..... 62
- Figure I-7 : Statistical performances (relative root mean square errors and coefficients of determination correspond to the bars and dots, respectively) associated with the estimation of the GAI (green) and DAM (red) for winter wheat at the Auradé (even-numbered years) and Lamasquère (odd-numbered years) sites. 69
- Figure I-8 : Comparison between the observed and the estimated crop variables (GAI, DAM and yield) over the crop period. Sites refer to FR-Lam and FR-Aur..... 69
- Figure I-9 : Statistical performances (root mean square errors and coefficients of determination are bars and dots, respectively) associated with the estimations of the daily GPP, R_{eco} and NEE for the 8 winter wheat cropping years (October 1st to September 30th) at FR-Aur (even-numbered years) and FR-Lam (odd-numbered years). 70
- Figure I-10 : Boxplot of the pluriannual determination coefficients (R²) and the pluriannual root mean square errors (RMSEs) of the simulated GPP, R_{eco} and NEE in the before-crop, crop-growth, crop-senescence, and post-harvest periods for the 8 cropping years of winter wheat at AUR and LAM. Only the years with post-harvest vegetative events (2006-2009-2011-2013) are considered for the boxplot of the post-harvest GPP..... 71
- Figure I-11 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red or red dashed lines) GPP, R_{eco} and NEE for 2 site-years (AUR2006 and LAM2009). The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for re-growth and weed events. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year..... 73
- Figure I-12 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red or red dashed lines) cumulated GPP, R_{eco} and NEE for LAM2013. The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for the cover crop. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year..... 74
- Figure I-13 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red and red dashed lines) daily values of the GPP, R_{eco} and NEE for 2 site-years: a) AUR2006 and b) LAM2009. The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for re-growth and weed events. The yellow envelope represents the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller GAI RMSE)..... 75
- Figure I-14 : Relationship between the ELUE and the ratio between diffuse (R_{df}) and global (R_g) radiation measured at 5 European flux sites (Lonzée, Grignon, Oensingen, Lamasquère & Auradé). 83
- Figure I-15 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for LAM2007. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year. 84
- Figure I-16 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for AUR2010. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year. 85
- Figure I-17 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red or red dashed lines) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for LAM2011. The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for re-growth and weed events. The yellow envelopes

represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error).	86
Figure I-18 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red lines) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for AUR2012. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year.	87
Figure I-19 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red or red dashed lines) cumulated NEE for LAM2013. The red/red dashed lines represent the simulations that do/do not account for re-growth and weed events. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error).	88
Figure I-20 : Temporal evolution of the measured (in blue) and estimated (in red lines) GPP, R_{eco} and NEE, top, and cumulated NEE, bottom, for AUR2014. The yellow envelopes represent the daily standard deviation of the 10 (/30) best simulations (i.e. smaller RMSE GAI error). The vertical dashed lines define the cropping year.	89
Figure I-21 : Cumulated NEE simulated by 5 different models (CERES-EGC, DNDC, SPA, ORCHIDEE-STICS and SAFY-CO ₂ with and without accounting for post-harvest vegetation events) at the Auradé site during the 2006 cultural year (winter wheat).	90
Figure I-22 : ELUE estimée à partir des données météorologiques et de GPP acquises à Lamasquère en fonction du ratio rayonnement diffus sur rayonnement direct. Les paramètres de la régression sont indiqués dans l'encadré de gauche.	93
Figure I-23 : Evolution temporelle 1) du GAI – simulé par SAFY-CO ₂ (trait vert), issu des données satellites (point vert plein) et des données in situ destructives (cercle vert) – et 2) du ratio biomasse aérienne sur biomasse racinaire – dérivé de Amos and Walter (2006) (trait marron), dérivé de Yu et al., 2015 (trait pointillé marron) et observé (données in situ, point marron).	94
Figure I-24 : Haut : Scatter plots de la biomasse totale estimée à partir des flux de CO ₂ en abscisses et de la biomasse aérienne obtenue par mesures destructives en ordonnées. Bas : Biomasse totale dérivée des flux de CO ₂ en trait bleu et biomasses aériennes destructives avec incertitudes. Les 2 graphes de gauche concernent la culture de blé et les 2 graphes de droite concernent la culture de maïs.	96
Figure I-25 : Résultats d'inversion de SAFY-CO ₂ sur le GAI satellite et sur les biomasses in-situ pour les années en maïs à FR-Lam. Scatterplot du GAI (gauche), de la biomasse (centre) et distribution du paramètre optimisé ELUEa issu de la meilleure optimisation et des 10 premières optimisations (sur 30).	97
Figure I-26 : Biomasse aérienne (gauche) et rendement (droite) de maïs estimés par SAFY-CO ₂ face aux observations acquises sur 14 ESUs (6 en 2014 et 8 en 2015).	98
Figure I-27 : ELUE estimée à partir des données météorologiques et de GPP acquises à Auradé en 2007 en fonction du ratio rayonnement diffus sur rayonnement direct. Les paramètres de la régression sont indiqués dans l'encadré de gauche.	100
Figure I-28 : Evolution temporelle 1) du GAI – simulé par SAFY-CO ₂ (trait vert), issu des données satellite (point vert plein) et des données destructives (cercle vert) – et 2) du ratio biomasse aérienne sur biomasse racinaire – issus de Ma et al., 2017 (ombrage marron) et simulé (trait marron).	101
Figure I-29 : Scatter plot entre GAI (gauche) et biomasse (droite) observé et simulé avec SAFY-CO ₂ . Les observations de GAI sont dérivées des mesures satellites, tandis que les biomasses observées sont obtenues par mesures destructives sur le site d'Auradé.	102
Figure I-30 : Evolutions temporelles des observations (rouge) et des simulations (bleu) de GPP (haut), de R_{eco} (milieu) et de NEE (bas) pour les années culturales 2007 et 2016 de tournesol à Auradé.	104
Figure II-1 : Prélèvement d'eau en France en 2013 par secteur. Exprimé en milliard de m ³	109

Figure II-2 : Prélèvements d'eau en France en 2013 par sous-bassins hydrographiques. Exprimé en million de m ³ .	110
Figure II-3 : Evapotranspiration de référence ET_0 , évapotranspiration des cultures en condition optimale de ressource en eau du sol (ET_C) et en condition de stress hydrique (ET_{Cadj}). Extrait de Allen et al., (1998).	111
Figure II-4 : Valeur de la pente α en fonction de ET_0 . α correspond au coefficient directeur de la fonction affine interpolant le rapport ETR/ET_0 en fonction de l'humidité relative du sol.	115
Figure II-5 : Evapotranspiration cumulée estimée à partir des mesures (en bleu), de l'équation de la FAO (Eq. II-17, en rouge) et de la nouvelle équation d'évaporation (New – Eq. II-18, en orange) sur les périodes de sol nu et scatter plots entre ETR observée et estimée à partir des deux équations suscitées pour les sites de Lamasquère (à gauche) et Auradé (à droite).	115
Figure II-6 : Top left: Fr-Aur field and the location of the measurement station; Top-right: Location of the study area in France; Bottom: Location of the fields in which biomass and yield data were collected in 2013, 2014 and 2015, as well as the selected area for the model's upscaling (see section 4.3.3).	121
Figure II-7 : Soil type distribution derived from GlobalSoilMap (left) and SoilGrids (right) products based on the USDA classification system. The red, black and blue circles respectively correspond to fields in the 2013, 2014 and 2015 seasons.	124
Figure II-8 : Timeline of images for each year of study and each sensor.	125
Figure II-9 : Summary of the validation strategy in terms of upscaling the SAFY-CO ₂ and SAFYE-CO ₂ models. IS is in situ, GSM is GlobalSoilMap and SG is SoilGrids.	130
Figure II-10 : Scatter plots of the observed and simulated GAI (A), DAM (B), GPP (C), R_{ECO} (D), NEE (E) and ETR (F) for the two crop years of sunflower at FR-Aur and mean statistic over the 2 crop years.	131
Figure II-11 : RMSE and R^2 values for the main model's output for CY-07 (a) and CY-16 (b) at FR-Aur via SAFY-CO ₂ (orange bars) or SAFYE-CO ₂ run with <i>in situ</i> soil data (SAFYE-CO ₂ ^{IS} , green bars), GlobalSoilMap data (SAFYE-CO ₂ ^{GSM} , red bars) and SoilGrids data (SAFYE-CO ₂ ^{SG} , blue bars).	133
Figure II-12 : Components of the net ecosystem carbon budget for CY-07 (a) and CY-16 (b) at FR-Aur for the SAFYE-CO ₂ IS (green bars), SAFYE-CO ₂ GSM (red bars), SAFYE-CO ₂ SG (blue bars) and SAFY-CO ₂ (orange bars) models compared to observed value (black bars).	134
Figure II-13 : Scatter plots of simulated and observed DAM (left) and YLD (right) obtained with SAFYE-CO ₂ ^{GSM} (A-B), SAFYE-CO ₂ ^{SG} (C-D) and SAFY-CO ₂ (E-F) model.	135
Figure II-14 : TWC of the fields simulated in this study derived from GSM and SG and of 45 fields within the study area estimated with <i>in situ</i> (IS) measurements.	136
Figure II-15 : The annual carbon budget (NECB) and its component, NEP and Cexp, simulated for 200 fields with SAFY-CO ₂ inside the study area for CY-15. Digital elevation model from <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> is displayed in the background.	136
Figure II-16 : Comparaison entre ETR observée sur les sites flux d'Auradé et de Lamasquère et ETR simulée avec la méthode FAO (gauche) et avec la nouvelle équation de l'évaporation (droite) pour 8 années culturales de blé.	142
Figure II-17 : ETR cumulée estimée par SAFYE-CO ₂ avec la nouvelle formulation de l'évaporation (bleu clair) et observée (bleu foncé) pour 8 années culturales de blé à Auradé et Lamasquère.	142
Figure II-18 : RMSE (colonne de gauche) et R^2 (colonne de droite) obtenus sur le GAI, la biomasse (DAM), la photosynthèse (GPP), la respiration de l'écosystème (R_{ECO}) et l'échange net de CO ₂ avec l'atmosphère (NEE) avec SAFY-CO ₂ (rouge) et SAFYE-CO ₂ (bleu).	143
Figure II-19 : Haut : GPP estimée par SAFY-CO ₂ (vert), par SAFYE-CO ₂ (bleu) et observée (noir) à Lamasquère durant l'année culturale 2010-2011. Bas : ETR estimée par SAFYE-CO ₂ (bleu) et	

observée (noir) sur le même site et la même année culturale. Les zones en rouge délimitent les périodes de stress simulées par le modèle.	144
Figure III-1 : Représentation schématique de la chaîne de traitement du modèle RFCC permettant de simuler les gains d'albédo et forçages radiatifs induits par l'introduction de CI dans les rotations de cultures à l'échelle Européenne. Abréviations : C3 & C4 correspondent aux cultures à métabolisme photosynthétique C3 et C4, F = fraction de culture dans le pixel, R = fraction de culture en rotation dans le pixel, $RF\alpha$ = forçage radiatif induit par la modification d'albédo de surface.	151
Figure III-2 : Représentation schématique des systèmes de rotations de cultures en Europe. H et E correspondent aux cultures d'hiver et d'été, respectivement. L'abréviation CI indique les périodes d'introduction potentielles des cultures intermédiaires.	152
Figure III-3 : Exemple d'allocation des cultures d'été et d'hiver en rotation	154
Figure III-4 : Exemple de dynamiques de végétation et d'albédo d'une rotation HE (B et D) reconstruites à partir des dynamiques de végétation (A et C) et d'albédo des cultures en C3 et en C4 pour le pixel englobant la parcelle d'Auradé. Les traits en pointillés représentent les dynamiques reconstruites sans (B) et avec (D) CI.	156
Figure III-5 : Mean bare soil albedo in August 2008 (a) and, December 2008 (b) and soil types from the HWSD database (c). The black rectangle delimitates the chernozems area (dark blue). A picture of this soil is shown in (d).....	165
Figure III-6 : (a) Starting date in days after the 1st of January and (b) duration in months of the 2008–2009 fallow period for the winter– summer crop rotation (between year 1 and year 2, figure 1 and table 1). (c) Mean cumulative precipitation during the month following the starting date of the fallow period (or the seeding of the cover crop) see (a).	166
Figure III-7 : Mean daily value of (a) $Ta * SWin$ ($W.m^{-2}$), (b) the increase in the surface albedo with the introduction of a cover crop, and (c) the radiative forcing ($RF\Delta\alpha$) due to the introduction of a cover crop for the 3 months after the winter crop harvest in 2008 (in $W.m^{-2}$).	167
Figure IV-1 : Localisation de la parcelle flux d'Auradé et des 111 parcelles (> 5 ha) concernées par une rotation blé/tournesol en 2014-2015 et simulées avec SAFY-CO ₂ . Le relief (altitude en m) est affiché en arrière-plan (source : SRTM).....	177
Figure IV-2 : Frise chronologique des images satellites utilisées pour simuler la rotation blé-tournesol avec SAFY-CO ₂ . Sur la parcelle d'Auradé en 2006-2007 et sur les 111 parcelles de la zone d'étude en 2014-2015. Les couleurs des points correspondent aux satellites d'observation utilisés (voir légende).	178
Figure IV-3 : Evolutions temporelles de la photosynthèse, de la respiration de l'écosystème et du flux net de CO ₂ . Les simulations correspondant à la culture de blé, au sol nu, aux repousses et au tournesol sont respectivement représentées par les courbes jaune, marron, marron pointillée et vert. Les observations sont présentées en noir.	178
Figure IV-4 : Evolution temporelle du flux net de CO ₂ cumulé pendant l'interculture 2006-2007 à Auradé. Les observations correspondent à la courbe noire. Les courbes correspondantes aux simulations sans et avec prise en compte des repousses sont respectivement en marron et marron pointillée.	180
Figure IV-5 : Distribution spatiale de la productivité nette de l'écosystème (NEP) simulée sur 111 parcelles sans prise en compte des EVI (A) et différence avec la prise en compte des EVI (B)	180
Figure IV-6 : Présentation de la zone d'application des modèles SAFYE-CO ₂ et RFCC. Le parcellaires culturale de la zone est présenté en fond (source RPG 2009).	184

Figure IV-7 : Méthode Elbow appliquée aux profils de NDVI correspondant à l'interculture des parcelles en monoculture d'été (gauche) et en rotation culture d'hiver/culture d'été, obtenus sur 3 tuiles Sentinel ; T31TCJ, T31TCH et T30TYP.	185
Figure IV-8 : Dynamiques de GAI sur lesquelles SAFYE-CO ₂ a été optimisé pour simuler les scénarii d'introduction des CI.	186
Figure IV-9 : Protocole de simulation appliqué au modèle SAFYE-CO ₂ pour simuler l'introduction de CI hivernales à l'échelle régionale.	187
Figure IV-10 : Protocole de simulation appliqué au modèle RFCC pour simuler l'introduction de CI sur les rotations HIV/ETE et ETE/ETE.	187
Figure IV-11 : Distribution des rendements simulés par SAFYE-CO ₂ . Les rotations auxquelles correspondent les parcelles sont indiquées en légende. Pour la rotation T/T, les parcelles correspondent soit à l'année culturale 1 (2008-2009), soit à l'année culturale 2 (2009-2010).	189
Figure IV-12 : Distribution de la NEP simulée par SAFYE-CO ₂ . Les rotations auxquelles correspondent les parcelles sont indiquées en légende. Pour la rotation T/T, les parcelles correspondent soit à l'année 1 (2008-2009), soit à l'année 2 (2009-2010).	189
Figure IV-13 : Distribution de la NEP simulée par SAFYE-CO ₂ pour les 4 scénarii d'interculture appliqués aux 250 parcelles concernées par une rotation blé/tournesol : sol nu, CIPAN, CI peu développées et CI bien développées.	190
Figure IV-14 : Distribution de la NEP simulée par SAFYE-CO ₂ pour les 3 scénarii d'interculture appliqués aux 5 parcelles concernées par une rotation tournesol/tournesol : sol nu, CI peu développées et CI bien développées.	190
Figure IV-15 : Productivité nette de l'écosystème simulée par SAFYE-CO ₂ selon les différents scénarii d'introduction des CI en fonction du nombre de jours de végétation active durant l'année culturale.	191
Figure IV-16 : Bilan annuel de carbone estimé avec SAFYE-CO ₂ pour trois scénarii d'occupation du sol pendant l'interculture. Haut, cas sol nu ; milieu, cas CIPAN et CI mal développée ; bas, cas CIMS bien développée.	192
Figure IV-17 : Évapotranspiration estimée avec SAFYE-CO ₂ pour trois scénarii d'occupation du sol pendant l'interculture. Haut, cas sol nu ; milieu, cas CIPAN et CI mal développée ; bas, cas CIMS bien développée.	193
Figure IV-18 : Forçage radiatif et gain d'albédo agrégés au pixel associés aux trois scénarii d'introduction des CI simulés avec RFCC.	195
Figure IV-19 : NECB estimés par SAFYE-CO ₂ (axe de gauche), LE estimés par SAFYE-CO ₂ et RF α estimés par RFCC (axe de droite) pour le scénario de référence (sol nu durant l'interculture), le scénario CIPAN et le scénario CIMS, sur les pixels RFCC.	196
Figure V-1 : Possible crop rotations between winter and summer crops: summer-summer (R _{SS}), winter-winter (R _{WW}), summer-winter (R _{SW}) and winter-summer (R _{WS}). Summer and winter crops correspond respectively to black and grey boxes. Potential periods of CC introduction are represented by green boxes. Note that these periods and durations vary spatially in Europe.	207
Figure V-2 : List of simulated experiments and their characteristics.	209
Figure V-3 : 100-year average of the albedo changes (A), cover crop introduction area (B), albedo-induced radiative forcing (C) and Global Warming Potential (D) simulated for the 4 scenarios considering that CC are maintained during 100 years.	210
Figure V-4 : A- Reference bare soil albedo dynamic over 50 years for a location in Romania. In B, C and D reference bare soil albedo dynamics (in black) and for soils that progressively reach 50 (green), 80 (red) and 100% (blue) of soil carbon storage capacity following CC introduction the first year of	

simulation in France, Germany and Spain, respectively. Latitude and longitude coordinates of the center of each pixel are indicated in the title of the subplots.	212
Figure V-5 : On the left, mean annual reference soil albedo at $t=0$ (not yet effected by darkening) and simulated soil albedo after 50 years of CC introduction corresponding to the new SOC content equilibrium.	213
Figure V-6 : Ten-year averaged $RF\alpha$ simulated with $S_{Alb_dec_50}$ (green line), $S_{Alb_dec_80}$ (blue line) and $S_{Alb_dec_100}$ (red line). $RF\alpha$ is here expressed by unit of CC introduction area.	213
Figure VI-1 : Principaux freins (flèches) et principales perspectives associées (octogones) liés à l'utilisation du modèles SAFYE- CO_2 (gauche) et à l'estimation des bilans de carbone à grande échelle (droite).	224
Figure VI-2 : Principaux freins (flèches) et principales perspectives associées (octogones) liés à l'utilisation aux données d'entrée du modèle RFCC (gauche) et à la méthodologie associée au modèle (droite).	231
Figure A-1 : Histogramme des dates de semis et de récolte des cultures d'hiver et d'été obtenues à partir des indices de végétation.	269
Figure A-2 : Durée de l'intersaison hiver – été déterminée à partir des indices de végétation ECOCLIMAP.	269
Figure A-3 : Gain d'albédo (A) induit par la mise en place de couverts intermédiaires et forçage radiatif associé (B) exprimé en W/m^2 de surface agricole ayant servie à la pondération du gain d'albédo (C) et forçage radiatif convertie en équivalent CO_2 (D).	271
Figure A-4 : Estimation des stocks de carbone organique dans les 30 premiers cm de sol en France métropolitaine (hors Corse). Source : <i>Gis Sol, IGCS-RMQS, Inra 2017</i>	271

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des modèles agronomiques les plus emblématiques et références.	25
Tableau 2 : Principales caractéristiques des sites instrumentés d'Auradé et de Lamasquère.	38
Tableau 3 : Récapitulatif des campagnes de mesures sur lesquels se sont appuyés ces travaux.	42
Tableau 4 : Principales caractéristiques des capteurs utilisés dans ces travaux de thèse.	43
Table I-1 : Overview of the in situ data collected from 2005 until 2014, agricultural practices (dates of sowing harvest, etc.), and presence and type of vegetation during the fallow period. F: provided by farmer, D: destructive measurements.	58
Table I-2 : List of SAFY- CO_2 model parameters for calculating the GPP.	63
Table I-3 : List of SAFY- CO_2 model parameters for calculating autotrophic respiration.	63
Table I-4 : List of SAFY- CO_2 model parameters for calculating the aboveground and the belowground mass.	64
Table I-5 : List of SAFY- CO_2 model parameters for calculating the leaf biomass production, the yield and the senescence.	65
Table I-6 : List of SAFY- CO_2 model parameters for calculating the heterotrophic respiration.	65
Table I-7 : Annual net ecosystem carbon budgets (NECB) and their components (NEP, C_{inp} , C_{exp}) derived from the in-situ (OBS) and modelled (SIM) data for 8 site-years. Uncertainties on observations are also shown (for more details see Béziat et al., 2009).	77

Table I-8 : Statistic performances (R^2 , RMSE and RRMSE) of 5 cropland ecosystem models : CERES-EGC, DNDC, SPA, ORCHIDEE-STICS and SAFY-CO ₂ (with and without accounting for post-harvest vegetation events)	91
Tableau I-9 : Paramètres du modèle SAFY-CO ₂ spécifiques à la culture de maïs. Les bornes des paramètres à optimiser sont indiquées ainsi que les sources des paramètres fixes.	98
Tableau I-10 : Performances statistiques associées à la comparaison entre composantes du flux net de CO ₂ simulées et observées pour les années culturales 2007 et 2016 de tournesol à Auradé.....	103
Tableau I-11 : Paramètres du modèle SAFY-CO ₂ spécifiques à la culture de tournesol. Les bornes des paramètres à optimiser sont indiquées ainsi que les sources des paramètres fixes.	105
Table II-1 : Sowing and harvest dates of sunflower cultivated at FR-Aur and climatic variables averaged from the 15 th of April to the 15 th of September for all crop years.	122
Table II-2 : Dataset of DAM and yield as well as their measurement scale.	123
Table II-3 : Soil characteristics derived from in situ measurements and GlobalSoilMap and SoilGrids data at FR-Aur corresponding to 3 layers simulated by the model.	124
Table II- 4 : Main characteristics of the satellite sensors used in this study and the bands used to derive the GAI.	125
Table II- 5 : List of the SAFYE-CO ₂ model parameters for sunflower, values or a priori intervals of the parameters, method for setting them, and relevant sources.....	128
Tableau II-6 : Paramètres pour la culture de blé associés au module de bilan hydrique et sources des données.....	141
Tableau III-1 : Valeur du correctif, par pays, appliqué aux données ECOCLIMAP permettant de convertir les surfaces de culture C3 et C4 en surface de culture d'hiver et d'été.....	153
Tableau III-2 : Coefficient C d'allocation des cultures par pays.....	154
Table III-3 : Different possible types of crop rotations during a 3-year period: summer–summer–summer (Rsss), winter–winter–winter (Rwww), summer–winter–summer (Rsws), and winter–summer–winter (Rsws). In this example, the summer and winter crop periods are represented by black and grey, respectively. The period and duration of the vegetation cycles are estimated according to the approximate seeding and harvest dates of each crop over central and western Europe. Green boxes show favourable periods for the introduction of cover crops that have been considered in this study. Note that this period and its duration vary spatially in Europe.	160
Tableau III-4 : Mean average increase in the surface albedo and the associated radiative forcing (in W.m ⁻² and in MtCO ₂ -eq.year ⁻¹ , respectively) per country for 3 month cover crop introduction period. The percentage of the surface used is indicated relative to the total surface of the country (in %). GHG agricultural emissions are listed in the last column on the right (in MtCO ₂ -eq).	168
Tableau IV-1 : Résumé des performances de SAFY-CO ₂ dans l'estimation de la GPP, de la R _{ECO} et de la NEE pour différentes périodes temporelles correspondantes aux différentes occupations du sol.	178
Tableau A-1 : Surfaces agricoles cultivées (1000 ha) issues de la classification ECOCLIMAP (seuls les pixels avec >20% de cultures sont pris en compte) et des statistiques Agreste (2016). Paramètres déterminant la proportion de surfaces en cultures d'été mise en rotation avec des cultures d'hiver pour le scénario optimiste, réaliste et pessimiste, et correction à apporter sur les résultats finaux pour corriger les surfaces de culture simulées.	268

Annexes

Annexes

Cette section présente des résultats concernant l'analyse de pouvoir radiatif des cultures intermédiaires à l'échelle de la France.

A. Analyse à l'échelle de la France

Pour approfondir l'analyse du potentiel d'atténuation des CI, un focus sur le territoire français est proposé dans cette section. Une validation des instants de semis et de récolte permettant la reconstruction des rotations de culture est présentée ainsi qu'une analyse des gains d'albédo par région. Cette étude a été réalisée entre les travaux présentés dans le chapitre 3 et le chapitre 5.

A.1. Modification du scénario d'introduction des CI

Le modèle RFCC a été modifié afin de simuler l'introduction de CI sur une période de 10 ans (au lieu de 3 comme dans l'étude précédente, Carrer et al., 2018). En effet, les estimations du pouvoir d'atténuation des CI, lorsqu'ils sont exprimés en équivalent CO₂ font l'hypothèse que cette pratique est maintenue pendant des temps longs. Il apparaît alors cohérent d'allonger la durée de simulation, en considérant une période de 10 ans, contrainte par la disponibilité des produits satellites (2001-2010).

Par ailleurs, même si un scénario d'introduction de 6 mois est discuté dans l'étude précédente, ces premiers résultats se sont concentrés sur l'impact radiatif des CI avec une durée maximale de développement des CI fixée à 3 mois. Or la période durant laquelle les CI sont mis en place est actuellement supérieure à 3 mois (pratiques agricoles observées in-situ). Dans cette analyse à l'échelle de la France, seul le scénario considérant une durée d'introduction des CI de 6 mois a été conservé, en gardant toujours un mois de sol nu avant le semis de la culture suivante. Toutes les autres caractéristiques relatives à l'estimation de l'introduction des CI (veg_{CI} , α_{CI} , croissance linéaire, etc.) sont conservées par rapport à l'étude Carrer et al., (2018).

Les estimations du modèle ont été agrégées à l'échelle des régions françaises (en prenant les anciennes régions comme référence). Le choix d'analyser les estimations du modèle à cette échelle spatiale a été motivé par plusieurs facteurs. Le but était de descendre en échelle (en comparaison avec l'étude précédente menée à l'échelle des pays européens), tout en restant cohérent avec la résolution spatiale du modèle (1/20°). D'autre part, les données statistiques permettant le calcul des différents correctifs (à savoir la correction de la classification ECOCLIMAP ou celle des surfaces en rotation) sont disponibles et mieux définies pour les anciennes régions.

A.2. Adaptation des produits par région

Comme évoqué précédemment, plusieurs correctifs sont nécessaires à l'application du modèle RFCC (voir section III.2.3.1 et III.2.4). Une première étape consiste à modifier les surfaces en culture C3 et C4 de la base de données ECOCLIMAP afin d'obtenir des surfaces de cultures d'hiver et d'été. Un correctif unique à l'échelle nationale a été utilisé dans cette exercice. Ensuite, un paramètre (coefficient C) doit être appliqué pour quantifier la proportion de cultures qui peuvent être mises en rotation. Ce coefficient a été calculé pour chaque région, et pour 3 scénarii, à partir des données de

surfaces de chaque culture (statistiques Agreste-2016). Les scénarii sont définis à partir des surfaces en maïs (grain et ensilage, ~50/50), car c'est la culture d'été qui représente la plus grande surface cultivée en France. Selon le scénario, une fraction de la surface cultivée en maïs sera considérée comme de la monoculture d'été ; le scénario optimiste considère que toutes les cultures d'été sont mises en rotation avec des cultures d'hiver (pas de monoculture d'été si plus de cultures d'hiver que de cultures été). Le scénario réaliste considère que seulement 20% des surfaces cultivées en maïs grain sont mises en rotation avec des cultures d'hiver (80% des surfaces en maïs grain seront en monoculture de maïs). Enfin le scénario pessimiste considère que seulement 20% des surfaces cultivées en maïs grain et 20% des surfaces cultivées en maïs ensilage sont mises en rotation avec des cultures d'hiver (80% des surface en maïs grain et 80% des surfaces en maïs ensilage en monoculture de maïs). Au niveau national, le paramètre C représentant la proportion de cultures d'été mises en rotation avec des cultures d'hiver pour le cas optimiste, réaliste et pessimiste vaut respectivement 1, 0.76 et 0.52. Enfin un correctif est appliqué au moment de calculer le gain final par région. Ce correctif permet de rapporter la surface totale agricoles du modèle (surface ECOCLIMAP > 20% de culture) à la 'vraie' surface agricoles (Agreste). Ce correctif, comme l'ensemble des paramètres utilisés dans cet exercice sont présentés dans le Tableau A-5.

Tableau A-1 : Surfaces agricoles cultivées (1000 ha) issues de la classification ECOCLIMAP (seuls les pixels avec >20% de cultures sont pris en compte) et des statistiques Agreste (2016). Paramètres déterminant la proportion de surfaces en cultures d'été mise en rotation avec des cultures d'hiver pour le scénario optimiste, réaliste et pessimiste, et correction à apporter sur les résultats finaux pour corriger les surfaces de culture simulées.

	Surfaces agricoles ECOCLIMAP (>20%)	Surfaces agricoles Agreste			Paramètres de mise en rotation			Correction des surfaces cultivées
Région	Total	Total	Hiver	Été	Optimiste	Réaliste	Pessimiste	
Ile de France	570	497	379	120	1	0.76	0.75	0.87
Franche Comte	96	211	141	73	1	0.75	0.45	2.20
Pays de la Loire	1139	1 086	663	441	1	0.81	0.29	0.95
Bretagne	924	947	478	479	1	0.78	0.23	1.02
Poitou Charente	1043	1 105	707	412	1	0.67	0.54	1.06
Aquitaine	465	631	175	459	1	0.52	0.42	1.36
Midi Pyrenees	882	1 019	565	479	1	0.77	0.70	1.16
Limousin	6	124	89	43	1	0.90	0.31	21.19
Rhone Alpes	405	419	221	201	1	0.60	0.39	1.04
Auvergne	164	299	214	93	1	0.70	0.41	1.83
Languedoc Roussillon	129	136	99	40	1	0.97	0.95	1.05
Champagne Ardenne	1005	1 093	750	348	1	0.90	0.81	1.09
PACA	115	85	67	21	1	0.89	0.86	0.74
Corse	1	2	1	1	1	0.38	0.27	1.63
Picardie	1092	1 070	771	304	1	0.91	0.80	0.98
Haute Normandie	581	508	418	92	1	0.93	0.50	0.87
Centre	1638	1 680	1 390	317	1	0.73	0.63	1.03
Basse Normandie	485	550	334	221	1	0.94	0.26	1.13
Bourgogne	731	833	681	163	1	0.78	0.61	1.14
Nord Pas de Calais	604	569	372	200	1	0.94	0.69	0.94
Lorraine	530	658	510	155	1	0.93	0.51	1.24
Alsace	207	216	63	154	1	0.35	0.28	1.04

A.3. Validation des instants de semis et de récolte

Les instants de semis et de récolte vont conditionner les périodes d'introduction des CI. Il est donc primordial d'obtenir des instants cohérents avec le calendrier cultural, afin de simuler la mise en place des CI sur des périodes réalistes. Ces instants qui correspondent aux dates de semis et de récolte des

cultures d'hiver et d'été ont été extraits pour chaque pixel du territoire français, et sont représentés sous forme d'histogramme (Fig. A-1).

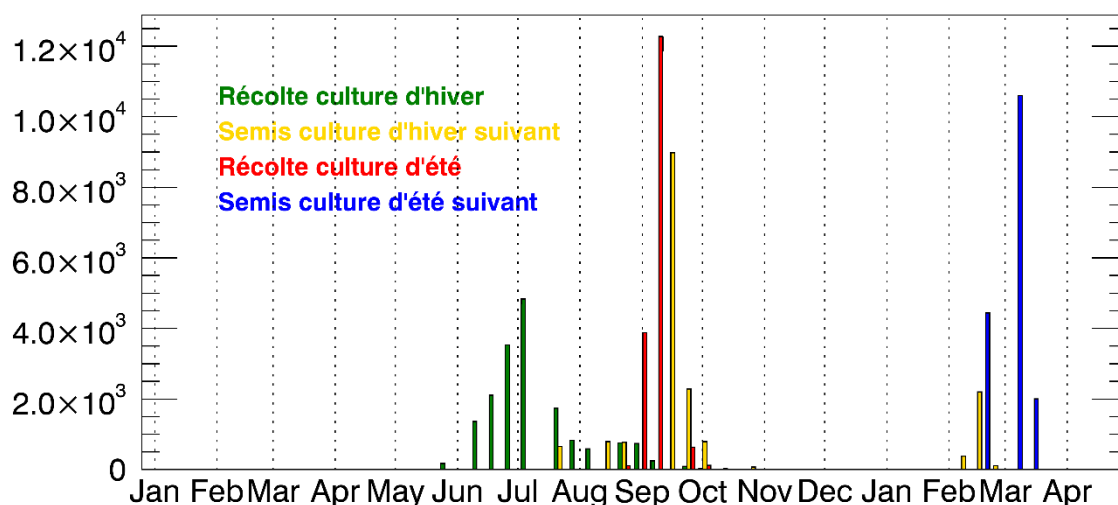


Figure A-1 : Histogramme des dates de semis et de récolte des cultures d'hiver et d'été obtenues à partir des indices de végétation.

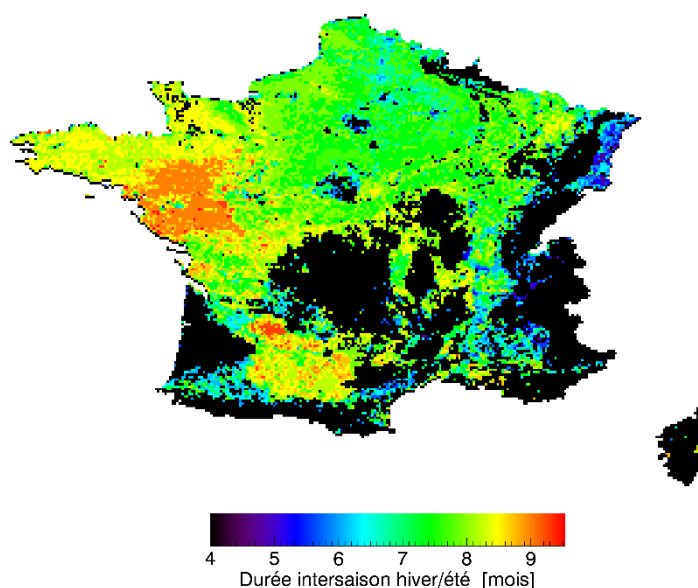


Figure A-2 : Durée de l'intersaison hiver – été déterminée à partir des indices de végétation ECOCLIMAP.

La récolte des cultures d'hiver s'étale de fin mai (Pays de la Loire et Est de l'Aquitaine) à fin août - début septembre (Alsace). Cela est cohérent avec les observations puisqu'en réalité, la récolte des cultures d'hiver est observée de mai à août. Concernant le semis des cultures d'hiver, on distingue 2 « groupes ». Le premier centré sur le mois de septembre correspond à la période de semis classique des cultures d'hiver (ex. colza) en France, et concerne la moitié nord-ouest de la France. Le second, centré sur Février, peut soit correspondre à la période de semis des cultures dites de « printemps » (certaines variétés d'orge, de blé ou de colza), soit à une détection tardive des dates de semis, et concerne l'est du pays. En effet, les cultures d'hiver peuvent avoir une croissance limitée en hiver dû aux conditions météorologiques, et connaître un développement significatif seulement au début du printemps. On note

que le semis des cultures d'été est concentré sur les mois de février et mars, ce qui est un peu précoce et qui est dû aux dynamiques de végétation trop précoces pour ces cultures. Concernant les dates de récolte des cultures d'été, elles sont très réalistes. Au final, c'est la récolte des cultures d'hiver et le semis des cultures d'été qui vont déterminer la durée de l'inter-culture, et donc la durée d'implantation potentielle des CI (représentée sur la Figure A-2). En Alsace, la durée d'implantation des CI (5 mois) sera donc nettement sous-estimée puisque les récoltes des cultures d'hiver sont identifiées trop tardivement et que les semis de cultures d'été sont globalement trop précoces. On remarque in fine que les périodes d'intercultures les plus longues atteignent 9 mois et se situent au niveau des Pays de la Loire, et à la frontière entre Midi-Pyrénées et l'Aquitaine.

A.4. Analyse par région

Les résultats présentés dans cette section sont moyennés sur toute la durée de simulation (10 ans), les gains d'albédo et de RFa sont exprimés par unité de surface agricole (grandes cultures). La Figure A-3 présente les résultats du scénario d'introduction des CI de 6 mois agrégés par régions. La Figure A-3 A montre le gain d'albédo qui est proportionnel à la durée d'introduction des CI (*i.e.* plus les CI seront introduits sur une période longue plus le gain d'albédo sera grand). Rappelons ici que dans l'approche proposée, les pixels avec moins de 20% (coefficient ajustable) de cultures (hiver + été) sont filtrés, ce qui favorise les zones possédant des surfaces densément occupées par des grandes cultures. Ce gain d'albédo est aussi fortement dépendant de l'albédo de sol nu : plus ce dernier sera faible, plus le gain d'albédo sera important. De la même manière, l'albédo du sol nu est corrélé à la teneur en matière organique de la surface : plus le sol est riche en matière organique, plus il sera sombre (Meyer et al., 2012a). Nous avons donc tenté d'expliquer la variabilité des gains d'albédo simulés grâce à la teneur en matière organique du sol. La Figure A-4 présente des estimations des stocks de carbone organique dans les 30 premiers cm de sol. Elles ont été obtenues à partir des travaux de Mulder, (2016) et des données des programmes IGCS et RMQS. La Corse est exclue de cette analyse. Les zones qui apparaissent avec les teneurs les plus élevées en carbone organique sont évidemment les zones montagneuses (Pyrénées, Massif Centre, Alpes, Vosges et Jura) mais elles sont caractérisées par de faibles surfaces en grandes cultures. La Bretagne, qui est aussi caractérisée par de fortes teneurs en C organique (surtout au niveau du Finistère), est pourtant caractérisée par de faibles gains d'albédo (Fig. A-3 A). Cela est peut être lié au fait que dans la réalité des CI étaient déjà assez fortement présents sur ces zones concernées depuis longtemps par les problématiques de fuites de nitrates. Les régions ayant le plus fort gain d'albédo sont les régions du centre et du Nord-Est. On remarque qu'effectivement les régions du Nord-Est sont caractérisées par de fortes teneurs en C organique qui peuvent permettre une différence d'albédo importante entre la végétation et le sol. Par ailleurs, les régions du sud-est (Languedoc Roussillon et PACA) ont des gains d'albédo faible. La carte des sols (Fig. A-4) indique sur ces régions des teneurs faibles en C organique qui induisent des fortes valeurs d'albédo de sol nu et ne permettent pas un fort gain d'albédo en introduisant des CI.

Concernant le forçage radiatif (Fig. A-3 B), il est évidemment très dépendant du rayonnement incident et de la transmittance atmosphérique (Eq. III-8). On peut donc observer un gradient Nord-Sud, les régions du sud ayant un forçage radiatif plus important que celles du nord pour des gains d'albédo équivalant.

Enfin le forçage radiatif exprimé en équivalent CO_2 est fonction du RF ($W.m^{-2}$), ainsi que des superficies agricoles sur lesquelles ont été introduites les cultures intermédiaires. Les régions avec les plus grandes surfaces en grandes cultures possèdent donc globalement le pouvoir d'atténuation le plus

fort. Il s'agit du Centre, du Poitou-Charentes, des Pays de la Loire, de Midi-Pyrénées & de la Champagne-Ardenne.

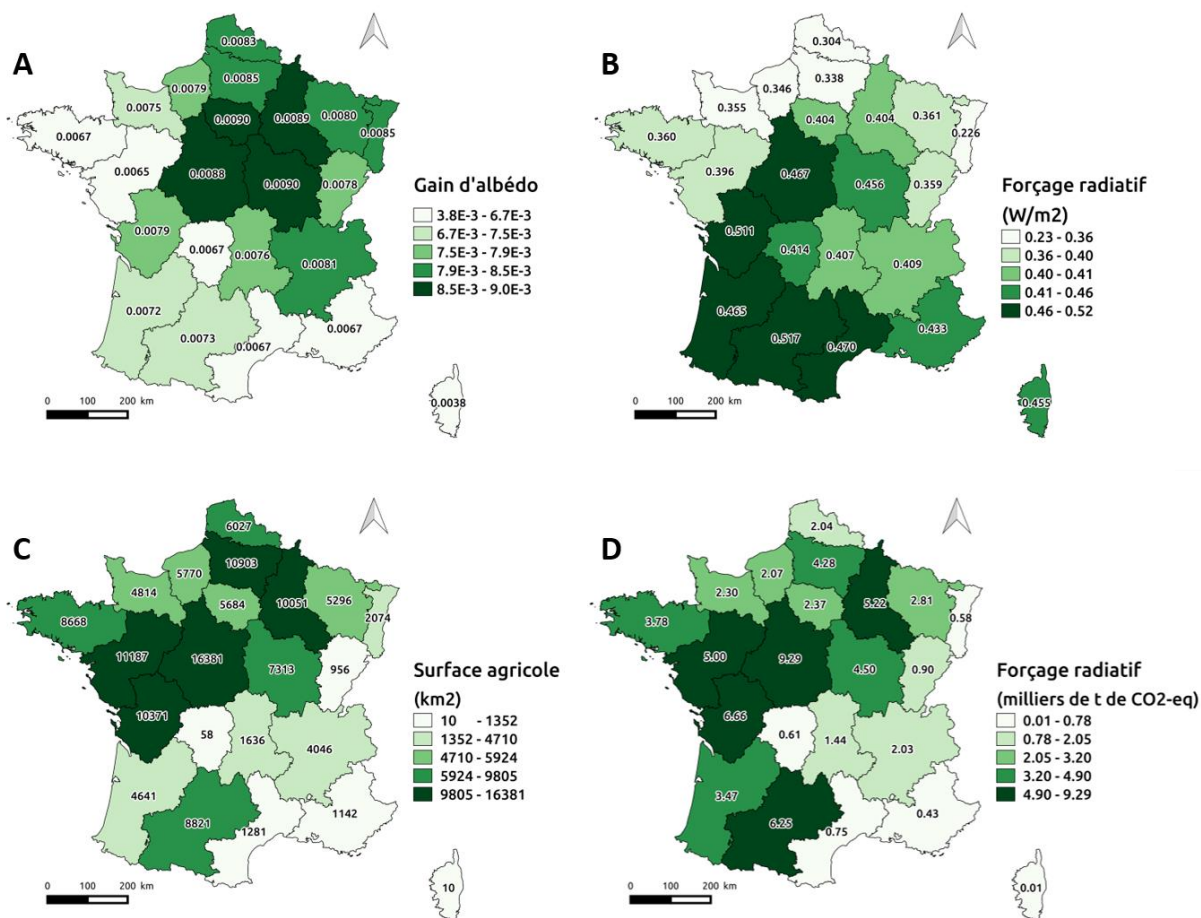


Figure A-3 : Gain d'albédo (A) induit par la mise en place de couverts intermédiaires et forçage radiatif associé (B) exprimé en W/m² de surface agricole ayant servi à la pondération du gain d'albédo (C) et forçage radiatif convertie en équivalent CO₂ (D).

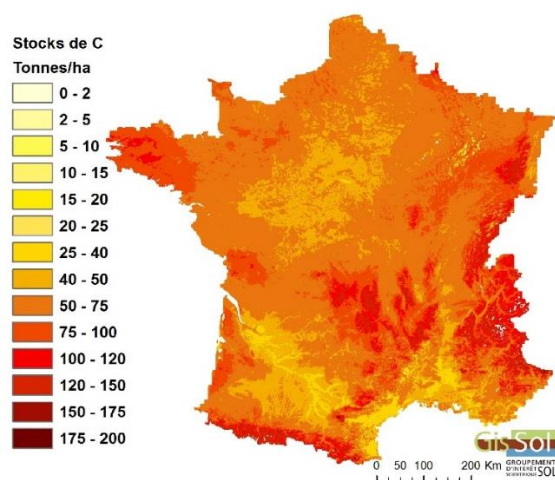


Figure A-4 : Estimation des stocks de carbone organique dans les 30 premiers cm de sol en France métropolitaine (hors Corse). Source : Gis Sol, IGCS-RMQS, Inra 2017.

Ce type d'analyse permet de mettre en lumière les zones d'introduction des CI où les effets d'atténuation liés au RF α pourraient être les plus significatifs.

✓ Ce qu'il faut retenir

- ♠ Le modèle RFCC a été appliqué à la France selon le scénario d'introduction de 6 mois des CI et les résultats ont été agrégés par région.
- ♠ Le gain d'albédo induit par l'introduction de CI est corrélé à la teneur en C organique du sol qui régit partiellement son albédo, mais aussi à d'autre facteur qui ne sont pas caractérisés ici.
- ♠ Des données d'albédo à plus haute résolution permettraient une analyse plus fine du forçage radiatif.

Valorisations scientifiques

Valorisations scientifiques

Ces années de thèse m'ont offert la chance de communiquer sur mes travaux et de leur donner de la visibilité via la participation à plusieurs colloques internationaux ou à des événements plus informels mais également via des proceedings et des articles de revue. Cette section liste, par ordre chronologique, ces valorisations scientifiques.

Participations à des colloques

GEOGLAM/JECAM/Asia-RiCE

Taichung city / TAIWAN – 17-20 Septembre 2018

Présentation orale

Food Security and Climate Change: 4 per mille initiative new tangible global challenges for the soil

Poitiers / FRANCE – 18-20 Juin 2019

Présentation orale

CIRCASA 2nd Annual meeting

Wageningen / PAYS-BAS – 4-6 Mars 2020

Présentation orale

M2GARSS

Tunis / TUNISIE – 9-11 Mars 2020

Présentation orale

Publications scientifiques

Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires

Eric Ceschia, Bruno Mary, Morgan Ferlicoq, Gaétan Pique, Dominique Carrer, Jean-François Dejoux, Gérard Dedieu.

Article de revue publié en décembre 2017 dans **Innovations Agronomiques**.

DOI : <http://doi.org/10.15454/1.517402718167511E12>

What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops

Dominique Carrer, Gaétan Pique, Morgan Ferlicoq, Xavier Ceamanos, Eric Ceschia.

Article de revue publié en avril 2018 dans **Environmental Research Letters**.

DOI : <http://doi.org/10.1088/1748-9326/aab650>

Estimation of daily CO₂ 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

Gaétan Pique, Rémy Fieuzal, Ahmad Al Bitar, Amanda Veloso, Tiphaine Talleg, Aurore Brut, Morgan Ferlicoq, Bartosz Zawilski, Jean-François Dejoux, Hervé Gibrin, Eric Ceschia

Article de revue publié en septembre 2019 dans **Geoderma**.

DOI : <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114428>

Estimation of biomass and CO₂ fluxes of sunflower by assimilating HSTR data in a simple crop model

Gaétan Pique, Rémy Fieuzal, Eric Ceschia

Proceeding **M2GARSS** publié en juin 2020.

DOI : <http://doi.org/10.1109/M2GARSS47143.2020.9105147>

Combining high-resolution remote sensing products with a crop model to estimate carbon and water budget components: application to sunflower

Gaétan Pique, Rémy Fieuzal, Philippe Debaeke, Ahmad Al Bitar, Tiphaine Talleg, Eric Ceschia

Article de revue publié en septembre 2020 dans **Remote Sensing**.

DOI: <http://doi.org/10.3390/rs12182967>

Estimation of crop production and CO₂ fluxes using remote sensing: Application to a winter wheat/sunflower rotation

Gaétan Pique, Taeken Wijmert, Rémy Fieuzal, Eric Ceschia

Proceeding **ECAS 2020**

Pas encore publié.