



HAL
open science

Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires

Bruno Mary, Morgan Ferlicoq, Gaétan Pique, Dominique Carrer, Jean-François Dejoux, Gérard Dedieu

► To cite this version:

Bruno Mary, Morgan Ferlicoq, Gaétan Pique, Dominique Carrer, Jean-François Dejoux, et al.. Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires. *Innovations Agronomiques*, 2017, 62, pp.43-58. 10.15454/1.517402718167511E12. hal-02627806

HAL Id: hal-02627806

<https://hal.inrae.fr/hal-02627806>

Submitted on 26 May 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires

Ceschia E.¹, Mary B.², Ferlicoq M.¹, Pique G.¹, Carrer D.³, Dejoux J.-F.¹, Dedieu G.¹

¹ CESBIO –UMR 5126 Université Toulouse III-CNRS-CNES-IRD, 18 avenue Edouard Belin, BPI 2801, F-31401 Toulouse Cedex 9

² INRA UR AgrolImpact Pôle du Griffon, F-02000 Barenton-Bugny

³ CNRM UMR 3589, Météo-France-CNRS, 42, avenue Gaspard Coriolis, F-31057 Toulouse Cedex

Correspondance : eric.ceschia@cesbio.cnes.fr

Résumé

Les couverts intermédiaires sont connus depuis longtemps pour leur capacité à réduire l'érosion des sols, à réduire le lessivage du nitrate et de manière plus générale pour leur capacité à améliorer les propriétés des sols. Depuis la mise en application de la directive nitrate, leur utilisation dans les systèmes de cultures s'est accrue et, dans un contexte de changements climatiques, ils génèrent un intérêt croissant pour leur capacité à fixer du carbone et à le stocker dans le sol. Cette pratique rentre d'ailleurs pleinement dans le cadre de l'initiative 4 pour 1000 qui a débuté suite à la COP21. Dans cet article, nous évaluerons la capacité des couverts intermédiaires à stocker du carbone dans les sols agricoles, ainsi que les autres influences positives ou négatives que les couverts intermédiaires peuvent exercer sur le climat. Pour ce faire nous considérerons l'ensemble des processus d'ordres biogéochimique (stockage de carbone dans le sol, émissions de N₂O et émissions liées aux opérations techniques) et biophysiques (modification de l'albédo et des flux d'énergie en surface) pouvant affecter le forçage radiatif et donc l'effet net sur le climat, induits par un couvert intermédiaire en comparaison avec un sol nu durant la phase d'interculture. Cette démarche de prise en compte combinée des effets biogéochimiques et biophysiques est assez nouvelle et s'appuie pour l'essentiel sur des études récentes ou non encore publiées ainsi que sur des méta-analyses. La synthèse de ces études montre que dans la grande majorité des cas, l'effet refroidissant sur le climat d'ordre biogéochimique induit par les couverts intermédiaires rentre en synergie avec les effets d'ordre biophysique. Une prise en compte plus systématique de ces processus biogéochimiques et biophysiques permettrait d'accroître la capacité d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires.

Mots-clés : Couvert intermédiaire, Atténuation, Climat, Carbone, Gaz à effet de serre, Albédo

Abstract: Climate change mitigation potential of cover crops

Cover crops have long been used for their ability to reduce erosion, reduce nitrate leaching and improve soil properties in general. Since the application of the European directive on nitrate in vulnerable zones, the use of cover crops has increased and, in a climate change context, there is a growing interest for their ability to increase soil organic carbon content. This practice is considered as fundamental in the "4 per 1000" initiative that was launched after the COP21. In this paper, we evaluate the potential of cover crops to increase carbon storage in agricultural soils but also the positive and negative effects of cover crops on climate. We consider both the biogeochemical effects (Carbon storage in soil, N₂O emissions, emissions from field operations) and biophysical effects (changes in albedo and energy balance at soil surface) that

modify the radiative forcing (net climatic effect) of plots where cover crops are grown in comparison with bare fallow plots. This innovative integrated approach is based on recent literature, ongoing research and meta-analysis. The synthesis of these studies shows that in most cases there is a synergy between the biogeochemical cooling effects and the biophysical ones. A more systematic accounting of all those processes could increase the climate mitigation efficiency of cover crops.

Keywords: Cover crops, Mitigation, Climate, Carbon, Greenhouse gases, Albedo

1. Introduction

Nous définissons les couverts intermédiaires (CI) comme des cultures exclusivement présentes entre deux cultures principales et dont tout ou partie est restituée au sol (Couverts Intermédiaires Pièges A Nitrate ou CIPAN, CI courts ou longs, Couverts Intermédiaires à Valorisation Energétique ou CIVE). Les cultures relais (débordant sur la culture précédente ou suivante), ou les couverts permanents (présents en même temps que les cultures principales) ne sont pas considérés, car ils ont d'autres effets liés à leur grande durée de vie. Les CI offrent une diversité de services écosystémiques et de dis-services qui seront discutés dans d'autres articles de cette revue, mais dans un contexte de changements globaux, il est intéressant de réfléchir en particulier aux influences que les CI pourraient exercer sur le climat et sur leur éventuelle capacité à atténuer les changements climatiques.

Les CI peuvent exercer une influence sur le climat via des effets biogéochimiques (modifiant les émissions de GES) et biophysiques (modifiant le bilan d'énergie et la façon dont l'énergie solaire va être utilisée à la surface) (Figure 1). Le forçage radiatif net (RF_{net}) peut être défini comme la résultante sur le climat de la somme des effets biogéochimiques et biophysiques engendrés par la présence d'un couvert intermédiaire en référence à un autre système qui est généralement le sol nu en phase d'interculture. Un RF_{net} positif tend à réchauffer le système et un RF_{net} négatif à le refroidir. Le RF_{net} est utilisé comme un proxy permettant de comparer différentes causes de perturbations dans un système climatique.

L'analyse qui suit des contributions biogéochimiques et biophysiques des CI au RF_{net} servira de base à une réflexion concernant les pratiques et types de CI (CIPAN, CIVE...) qui offrent les plus grands potentiels d'atténuation des changements climatiques.

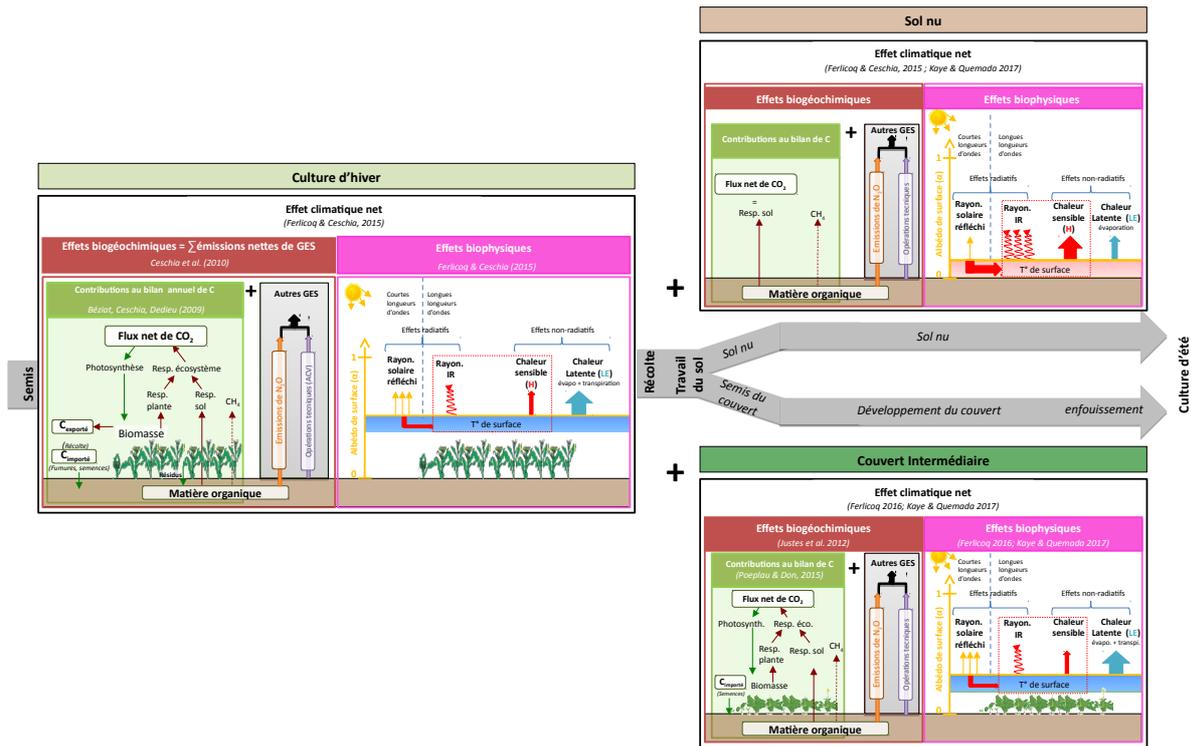


Figure 1 : Schéma conceptuel de la contribution des composantes biogéochimiques et biophysiques au forçage radiatif net appliqué à une culture d'hiver suivie d'un sol nu ou d'un couvert intermédiaire (CI). Le cadre rouge regroupe l'ensemble des effets biogéochimiques et correspond au bilan annuel de GES de la parcelle, ce qui englobe le bilan de C (encadré vert). Celui-ci est calculé à partir du flux net de CO₂ (ou NEP) qui est la résultante des flux de photosynthèse et de respiration de l'écosystème. La respiration de l'écosystème (Reco) est composée de la respiration des plantes (Ra) et des micro-organismes du sol (Rh). Les autres entrées de C (C_{importé}) sont la fertilisation organique et les semences. Les autres sorties de C sont les produits récoltés (C_{exporté}). Les flux de CH₄ sont généralement négligeables (hormis pour les rizières). Les émissions de N₂O (flèches orange), qui entrent en compte dans le calcul du bilan de GES, résultent de l'activité microbienne (nitrification, dénitrification). Les émissions de GES liées aux opérations techniques (flèches violettes) regroupent l'ensemble des opérations réalisées sur la parcelle et en amont (utilisation/entretien des machines et outils, fabrication, transport, stockage des engrais et produits phytosanitaires...). Le cadre rose représente les effets biophysiques sur le forçage radiatif net de la parcelle. Ils sont composés d'effets radiatifs de courtes (rayonnement visible et proche infra-rouge) et longues (rayonnement infra-rouge thermique) longueurs d'ondes et d'effets non radiatifs (transport turbulent de l'énergie entre la parcelle et l'atmosphère). Concernant les effets radiatifs de courtes longueurs d'onde, quand l'albédo (α = la fraction de rayonnement solaire de courte longueur d'onde qui est réfléchi par la surface) augmente, comme en présence de végétation ou résidus de culture par rapport à un sol nu, la fraction de rayonnements courtes longueurs d'ondes (flèches jaunes) réfléchi par la surface augmente, ce qui entraîne un forçage radiatif (RF_↓). En conséquence, il y a moins d'énergie à la surface pour chauffer l'atmosphère si l'albédo augmente. Cet effet refroidissant se répercute sur l'atmosphère et peut être assimilé à un piégeage équivalent de CO₂ atmosphérique. Cet effet est modulé par la répartition de l'énergie qui reste à la surface. Si cette énergie est préférentiellement utilisée pour évapotranspirer de l'eau (flèches bleues ; typiquement en présence d'une culture) alors l'effet refroidissant sera accentué. En revanche quand l'énergie restante est préférentiellement utilisée pour produire des flux de chaleur sensible et du rayonnement infra-rouge (flèches rouges ; typiquement en présence de résidus ou de sol nu), alors l'effet albédo est atténué voire compensé. Si l'albédo décroît (ex. passage de résidus ou couvert à du sol nu), alors cela engendre un forçage positif, équivalent à un accroissement de CO₂ dans l'atmosphère. Notez qu'en présence de végétation, la surface de la parcelle est globalement plus froide qu'en période de sol nu car la transpiration des plantes consomme de l'énergie. De ce fait, les quantités d'énergies émises sous forme de rayonnement infra-rouge (et de chaleur sensible) sont globalement plus faibles. Le cadre noir représente le forçage radiatif net (RF_{net}) de la parcelle agricole qui englobe les forçages radiatifs liés aux effets biogéochimiques et biophysiques.

2. Effets des couverts intermédiaires sur les cycles biogéochimiques

Les effets biogéochimiques correspondent aux effets sur le RF_{net} de la totalité des émissions de GES et du bilan C. Ils sont généralement exprimés en CO_2 équivalent ($CO_2\text{-eq}$) ou en C de CO_2 équivalent (C-eq), ce qui signifie que les émissions d'autres GES que le CO_2 sont converties au préalable en équivalent CO_2 en prenant en compte leur potentiel de réchauffement global respectif.

2.1. Effet sur le stockage de carbone dans les sols

La séquestration de carbone dans les sols associée à l'apport répété de matière organique via l'enfouissement des couverts intermédiaires (CI) représente le supplément de carbone stocké dans le sol résultant de cette pratique par rapport à la pratique conventionnelle (sans CI). Elle a été étudiée soit en conditions de champ dans des essais d'assez longue durée (au moins 5 ans) permettant de mesurer les variations de stocks de carbone organique du sol, soit lors d'incubations au laboratoire au cours desquelles on mesure les émissions de CO_2 issues des résidus de CI en décomposition.

2.1.1 Etudes d'incubation au laboratoire

Les résidus de CI apportés au sol lors de leur destruction proviennent très souvent de plantes jeunes, riches en composés solubles et relativement riches en N (et donc faible rapport C/N). Or ces résidus se décomposent plus vite que les résidus de plantes mûres plus riches en lignine (type paille de céréales). On a donc considéré jusqu'à très récemment que les résidus de CI, et plus généralement les résidus à faible C/N, contribuaient beaucoup moins à la formation de C stable ("humus") dans le sol. En fait, ce postulat a été remis en cause par les résultats obtenus lors des études de biodégradation au laboratoire avec suivi de la minéralisation du carbone et de l'azote sur une longue durée, notamment dans deux études de synthèse.

Ainsi Jensen et al. (2005), comparant la minéralisation de 76 types de résidus végétaux incubés au laboratoire, montrent que le rapport C/N des résidus végétaux est peu corrélé à la minéralisation du carbone et ne peut donc être considéré ni comme un facteur causal de la vitesse de décomposition, ni du taux maximal (asymptotique) de minéralisation du carbone. Ils confirment que les résidus de CI se décomposent d'abord plus rapidement que les autres mais que la vitesse de minéralisation se ralentit plus vite ensuite, et que leur taux de minéralisation final n'est pas forcément plus élevé. Ce taux est principalement corrélé (négativement) à la teneur en cellulose, et peu au rapport C/N ou à la teneur en lignine du résidu. Les teneurs en cellulose des CI étant peu différentes de celles des résidus végétaux mûrs, il n'est pas surprenant que leur taux de minéralisation soit peu différent de celui des résidus végétaux mûrs.

L'étude de Justes et al. (2009) considère un ensemble de 68 résidus végétaux, parmi lesquels 25 résidus de CI et 43 résidus de plantes à maturité. Le taux maximal (asymptotique) de minéralisation du carbone, estimé par ajustement des cinétiques d'incubation, n'est pas différent entre les 2 types de résidus. Il est par contre plus faible pour les racines qui ont un taux de stabilisation du C plus élevé que les parties aériennes. Ces études montrent, contrairement au postulat initial, que la contribution des résidus de CI à la séquestration de carbone dans le sol peut être conséquente pour 2 raisons :

- La proportion de carbone issu des parties aériennes des résidus de CI qui se stabilise dans le sol est comparable à celle de résidus de végétaux mûrs ;
- L'apport relatif de biomasse racinaire par rapport à la biomasse aérienne est plus important pour les couverts jeunes (ex. les CI) que pour des cultures plus âgées (McDaniel et al., 2014), et son taux d'humification est plus élevé (Balesdent et Balabane, 1996 ; Kätterer et al., 2011).

2.1.2 Expérimentations *in situ*

Une première synthèse de l'effet des CI sur le stockage de carbone dans le sol a été réalisée dans le cadre de l'expertise collective INRA « cultures intermédiaires » (Justes et al., 2013). Nous avons identifié

25 essais de longue durée (allant de 5 à 52 ans) comparant des systèmes de culture avec ou sans cultures intermédiaires quant à leur impact sur les stocks de carbone et d'azote dans les sols. Pour la plupart, il s'agit de publications très récentes qui évaluent l'intérêt de systèmes de culture "innovants" dans lesquels les CI ont une large place. Nous considérons deux critères : 1) la quantité moyenne de C séquestrée annuellement, qui correspond à la différence de stocks de carbone entre un traitement avec CI et un traitement sans CI, divisé par le nombre d'années de l'essai ; 2) le "facteur de conversion" qui est le ratio entre la quantité de C séquestrée et l'apport annuel moyen de carbone par les CI (majoritairement sous forme de résidus aériens). Le détail de toutes les références est donné par Mary (2013). Les résultats montrent que les CI conduisent presque toujours à un stockage additionnel de carbone par rapport à une situation classique de « sol nu », aussi bien en climat tempéré que tropical (Tableau 1). Sur une durée moyenne de 15 ans d'expérimentation, la présence répétée des CI (pas forcément chaque année), conduit à un stockage additionnel de 292 ± 156 kg C.ha⁻¹.an⁻¹ en climat tempéré. Ce stockage s'avère être très efficace puisque le facteur de conversion est très élevé : 33 ± 10 %, valeur similaire ou même supérieure à celle qui peut être calculée avec des résidus de type paille de céréales.

Tableau 1 : Taux de séquestration du carbone issu des CI et facteur de conversion associé.

Référence	Nombre de sites	Climat	Durée ans	C séquestré			
				kg C/ha/an		kg C /kg C apporté	
				moyenne	e-type	moyenne	e-type
Justes et al (2013)	7	Tropical	12	506	431	17%	10%
	16	Tempéré	15	292	156	33%	10%
	25	Tous	14	376	308	25%	12%
Poeplau & Don (2015)	37	Tous	12	320	80		

Une deuxième synthèse a été faite par Poeplau et Don (2015) par le biais d'une méta-analyse ciblée sur les CI. Ces auteurs ont sélectionné 37 sites et 139 traitements, dont seulement 7 d'entre eux sont communs avec l'étude précédente, fournissant ainsi des données complémentaires et non redondantes. Ils observent également que les CI conduisent presque toujours à une séquestration de carbone et montrent que les quantités de C séquestré sont corrélées à la durée de présence des CI. La vitesse moyenne de séquestration est de 320 ± 80 kg C.ha⁻¹.an⁻¹, en moyenne sur 12 ans. En utilisant un modèle simulant la décroissance de stockage au cours du temps, ils estiment le potentiel de stockage (asymptotique) à 16.7 t C.ha⁻¹. En s'appuyant sur une autre méta-analyse, McDaniel et al. (2014) montrent que les CI légumineuses constituent un levier technique très efficace pour augmenter les stocks de C et de N dans les sols. Ils constatent une augmentation moyenne du stock de C de 8.5% sur une durée moyenne de 18 ans. Pour un stock moyen de 50 t C.ha⁻¹, ceci représente une vitesse de stockage de 236 kg C.ha⁻¹.an⁻¹. On peut donc dégager les conclusions suivantes de ces synthèses :

- L'intensité de séquestration permise par les CI est forte : entre 236 et 376 kg C.ha⁻¹.an⁻¹ en moyenne selon les études. C'est une valeur proche et même plus élevée (5 à 7 pour mille) que l'objectif « 4 pour mille ».
- La séquestration est beaucoup plus reliée à la biomasse de CI produite qu'à leur nature. Quelques résultats suggèrent cependant que les légumineuses pourraient favoriser le stockage.
- La séquestration liée aux CI est au moins aussi élevée que celle liée aux résidus des cultures principales. Ce constat est sans doute à relier à la forte proportion de résidus racinaires.
- La séquestration est plus forte en climat tropical qu'en climat tempéré (506 vs 292 kg C.ha⁻¹.an⁻¹). Ceci résulte de la forte biomasse des CI permise par les conditions climatiques.

- Le facteur de conversion est plus élevé en climat tempéré. La plus forte stabilisation résulte sans doute d'un taux de minéralisation plus faible en climat tempéré.

Ces différentes études n'ont pas analysé (faute d'information suffisante) l'effet de la durée d'implantation des CI (entre le semis et la destruction) sur leur capacité à favoriser le stockage de C. Une plus grande durée et/ou une plus grande fréquence de réalisation des CI permet de fixer davantage de CO₂ et probablement aussi de stocker davantage de C dans le sol. Ferlicoq et Ceschia (2015) ont estimé qu'un CI maintenu pendant 6 mois permettait de fixer 3.5 fois plus de C qu'un CI détruit au bout de 3 mois.

2.2. Effets sur les émissions de N₂O

Les études qui ont quantifié l'impact des CI sur les émissions de N₂O sont peu nombreuses et très récentes. La variabilité spatiale et temporelle des émissions est une limite forte à la précision des mesures. La durée des mesures de flux représente une faible fraction de la période de suivi (typiquement 1/200 à 1/1000), mais l'amélioration des techniques de mesure permet de faire des suivis continus. Le Tableau 2 synthétise les résultats obtenus dans 13 études.

Tableau 2 : Revue des mesures d'émissions de N₂O réalisées dans des expérimentations avec ou sans CI.

Référence	Pays	Culture(s)	Intensité de mesure		Emissions de N ₂ O		
			Durée mois	Nb flux mesurés	kg N/ha/an		Δ_{CI}
					sans CI	avec CI	
Zhaorigetu et al. (2008)	Japon	Riz	6	12	0.56	0.57	0.01
			6	12	0.58	0.68	0.10
			6	12	0.56	1.00	0.44
Sarkodie-Addo et al. (2003)	Angleterre	Céréales	2	16	8.03	6.99	-1.04
Steenwerth et Belina (2008)	Etats-Unis	Vigne	11	17	0.58	0.84	0.26
			11	17	0.58	0.71	0.13
Sauer et al. (2009)	Etats-Unis	Prairie	21	27	1.52	1.15	-0.37
Jarecki et al. (2009)	Etats-Unis	Maïs-soja	12	38	7.50	5.30	-2.20
			12	38	8.00	8.80	0.80
Fronning et al. (2008)	Etats-Unis	Maïs-soja	16	12	1.80	1.28	-0.52
Bavin et al. (2009)	Etats-Unis	Maïs-soja	15	25	2.62	1.89	-0.73
Liebig et al. (2010)	Etats-Unis	Jachère-blé	18	48	1.20	1.20	0.00
Petersen et al. (2011)	Danemark	Orge	9	13	2.12	3.53	1.41
			9	13	2.65	4.10	1.45
			9	13	2.16	2.93	0.77
Sanz-Cobena et al (2014)	Espagne	Maïs	9	26	0.21	0.38	0.17
			9	26	0.21	0.35	0.14
			9	26	0.21	0.38	0.17
Roussel et (2011)	France	Orge-pois-blé	24	2880	1.24	1.37	0.13
			24	2880	2.16	2.30	0.13
Guardia et al (2016)	Espagne	Maïs	7	30	1.03	1.01	-0.02
			7	30	1.03	1.36	0.33
Peyrard et al (2016)	France	Blé-tournesol- féverole-sorgho	32	3840	1.10	0.91	-0.19
			32	3840	1.48	1.42	-0.06
Moyenne			13		2.05	2.10	0.05
Ecart-type							0.74

Malgré leur variabilité, les résultats sont convergents pour affirmer que l'effet des CI est faible ou nul. En moyenne sur tous les essais, le supplément d'émission est de 0.05 ± 0.74 kg N-N₂O.ha⁻¹.an⁻¹ dans l'année qui suit l'implantation de la CI. Ce supplément représente l'équivalent de 6 kg C de CO₂-eq.ha⁻¹.an⁻¹, donc très inférieur à la séquestration de carbone dans le sol. Selon la norme IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), la contribution directe des résidus de culture aux émissions est de 1.0%, et la contribution indirecte de 0,22%. Cette estimation semble excessive pour les CI, puisqu'elle conduirait à estimer les émissions à 0.50 kg N-N₂O.ha⁻¹.an⁻¹ pour un prélèvement moyen de 50 kg N.ha⁻¹ (qui semble pouvoir être une valeur moyenne). Il y a sans doute lieu de revoir la norme IPCC pour les CI.

2.3. Bilan des effets biogéochimiques sur les émissions de GES

Les trois principaux gaz à effet de serre émis par l'agriculture sont le CO₂, CH₄ et N₂O. Si l'on excepte les milieux très réducteurs (rizières), les sols agricoles n'émettent quasiment pas de méthane. D'autre part, dans les sols cultivés où il n'y pas d'accumulation de biomasse à long terme, les émissions de CO₂ sont quasi égales aux variations de stock de carbone du sol. Par conséquent le bilan GES (négatif si c'est un flux vers la parcelle) est la somme des émissions de N₂O (positif) et du stockage de C du sol (négatif). Les données précédentes permettent de dresser le bilan GES de l'implantation des CI (Tableau 3). L'implantation de CI a pour effet d'améliorer nettement le bilan GES, en moyenne de 1123 kg CO₂ eq.ha⁻¹.an⁻¹ soit 306 kg C de CO₂-eq.ha⁻¹.an⁻¹.

Cependant, l'effet à long terme des CI sera moins intéressant. Compte tenu du caractère asymptotique du stockage de carbone, la vitesse de stockage diminuera et le bilan GES sera de moins en moins amélioré par les CI. Inversement, les CI répétés conduisent aussi à augmenter le stock d'azote organique du sol ainsi que la minéralisation annuelle d'azote (Constantin et al., 2011, 2012). En conséquence, il faudra aussi réduire la fertilisation azotée, dont la production et l'apport sur la culture sont fortement émettrices de gaz à effet de serre, ce qui améliorera ainsi le bilan GES. Ces effets antagonistes doivent être mieux précisés afin d'établir un bilan GES à long terme.

Tableau 3 : Bilan GES (en kg CO₂ eq.ha⁻¹.an⁻¹) spécifique de la pratique régulière des CI, attendu à 20 ans.

	Emission N ₂ O		Stockage C		Machinisme kg CO ₂ /ha/an	Total kg CO ₂ /ha/an
	kg N/ha/an	kg CO ₂ /ha/an	kg C/ha/an	kg CO ₂ /ha/an		
moyenne	0.05	23	-320	-1173	27	-1123
écart-type	0.74	344	-80	-293		
minimum*	0.79	367	-240	-880	27	-486
maximum*	-0.69	-321	-400	-1467	27	-1761

3. Effets biophysiques

Les contributions biophysiques au RF_{net} sont exprimées en W.m⁻². Il n'existe pas de méthodologie simple pour convertir ces effets en équivalent CO₂, ce qui rend difficile la comparaison des effets climatiques d'ordres biogéochimique et biophysique. Des méthodologies sont cependant en cours de développement concernant l'effet des variations d'albédo sur le RF_{net} (voir ci-dessous). Seules trois études concernant les effets biophysiques sur le climat liés à l'introduction de CI ont été réalisées à ce jour. Celle de Kaye et Quemada (2017) compare l'effet des changements d'albédo induits par la présence de CI sur le forçage radiatif à partir de données de la littérature avec le stockage de C induit par les couverts et les autres

émissions de GES (N₂O, CH₄ et émissions liées aux opérations techniques). La seconde a été réalisée via une approche expérimentale comparative (CI vs sol nu) dans le cadre de la thèse de Morgan Ferlicoq (2016). Dans cette étude, les contributions des composantes biogéochimiques et biophysiques au RF_{net} ont été analysées et comparées (Figure 3). La troisième étude a été réalisée à l'échelle de l'Europe dans le cadre d'une collaboration entre le CESBIO et CNRM (Azzi, 2015 ; Pique, 2016) à partir des cartes d'occupation du sol ECOCLIMAP (Farroux et al. 2007) et des albédos de surface des zones de grandes cultures obtenus par désagrégation des produits albédo du satellite MODIS (Carrer et al., 2014). Les analyses et discussions qui suivent font donc essentiellement référence à ces trois études.

3.1. Effets radiatifs

Lorsqu'on remplace un sol nu par un couvert intermédiaire, le bilan radiatif (Rayonnement net) est modifié de 2 façons :

- par le changement d'albédo (fraction du rayonnement solaire, de longueur d'ondes comprises entre 400 et 2500 nm, réfléchi par la surface),
- par la modification du rayonnement infra-rouge thermique (longueurs d'ondes > 2500 nm) émis par la surface.

3.1.1 Effet albédo

L'albédo (α) caractérise la fraction d'énergie solaire (400 - 2500 nm) qui est réfléchi par la surface. Les couverts de grandes cultures (feuilles, tiges, inflorescences) ont souvent un albédo plus élevé que le sol nu (Ferlicoq et Ceschia, 2015). Le fait d'introduire un CI en période d'inter-culture va donc accroître l'albédo de la parcelle par rapport à un sol nu (Figure 2). Une part plus importante du rayonnement solaire repartira donc vers l'espace, et comme ce rayonnement de courtes longueurs d'ondes interagit peu avec les molécules de GES de l'atmosphère, il n'induit pas (ou peu) de réchauffement de l'atmosphère au cours de son retour vers l'espace. La quantité d'énergie disponible à la surface va donc diminuer, engendrant globalement un refroidissement du système (forçage radiatif négatif). Cet effet radiatif lié à l'albédo (RF_α en W m⁻²) peut être calculé grâce à l'équation suivante (Muñoz et al., 2010) :

$$RF_{\alpha} = -SW_{INi} \times T_{a_i} \times \Delta\alpha_i \quad (1)$$

Où SW_{INi} est le rayonnement solaire incident journalier du jour i qui peut être mesuré à la surface de la parcelle (W m⁻²), T_{a_i} est la transmittance atmosphérique moyenne journalière et $\Delta\alpha_i$ est la différence d'albédo entre le couvert intermédiaire et le sol nu, également au jour i . La transmittance atmosphérique est parfois supposée constante (Muñoz et al., 2010), mais comme les couverts sont implantés sur des périodes durant lesquelles la transmittance peut être très variable (et non représentative des valeurs moyennes annuelles) il vaut mieux estimer la transmittance journalière comme suit :

$$T_{a_i} = \frac{SW_{INi}}{R_{TOAi}} \quad (2)$$

Où R_{TOAi} est le rayonnement solaire journalier au sommet de l'atmosphère, calculé au jour i selon le modèle de transfert radiatif Fu-Liou (Schimel et al., 1995). Idéalement c'est une transmittance pour les rayonnements remontants qu'il faudrait utiliser et non pas une transmittance descendante comme c'est le cas ici, mais il n'existe pas de méthode facile à mettre en œuvre pour l'estimer de manière dynamique. Cela peut mener à une sous-estimation du RF_α.

La Figure 2 issue d'une expérimentation au champ menée sur le site de Lamasquère en 2013 (Ferlicoq 2016) montre que l'albédo augmente avec le développement du CI. La différence moyenne d'albédo entre le sol nu et le CI était de 0.05, avec un écart maximal de 0.07. On notera aussi l'effet des pluies ou irrigations qui assombrissent le sol et font périodiquement chuter l'albédo des 2 sous-parcelles. L'écart d'albédo engendre un forçage radiatif négatif qui est ici en moyenne de -1.05 W m⁻² entre le semis et la

destruction du couvert (ce qui est faible car le CI s'est développé tardivement, durant des périodes de faible rayonnement).

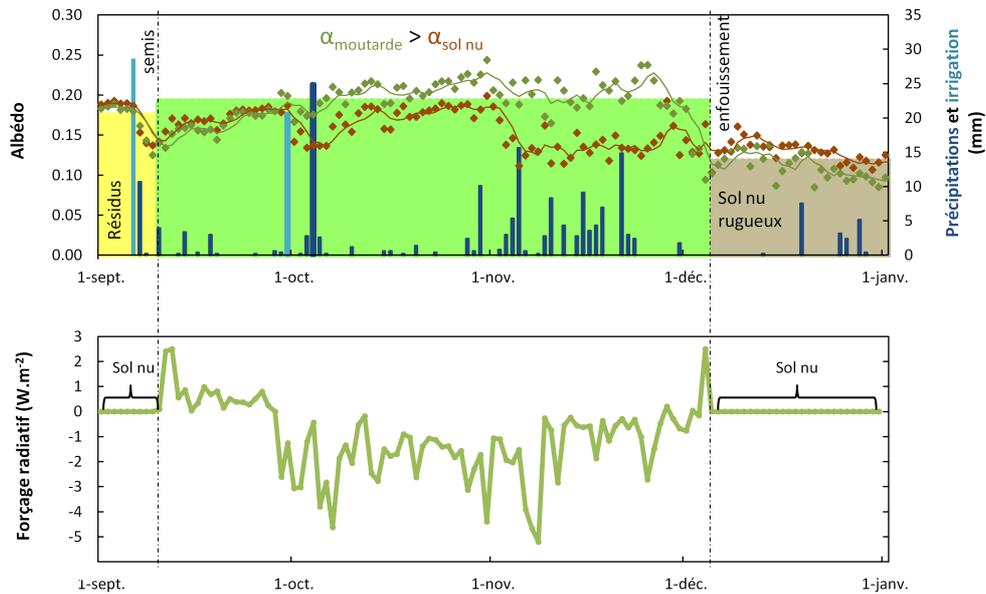


Figure 2 : (a) Evolution de l'albédo journalier sur la sous-parcelle avec un CI de moutarde blanche (courbe verte) et sur la sous-parcelle maintenue en sol nu (courbe marron) durant la période d'inter-culture sur la parcelle de Lamasquère (31) en 2013 ; **(b) évolution du forçage radiatif** (RF_{\square}) induit par le couvert de moutarde blanche par rapport au sol nu. En dehors des périodes de développement de la moutarde, RF_{\square} est égal à 0.

Kaye et Quemada (2017) ont montré que, si l'on excepte les situations où le sol nu a un albédo élevé (ex. sols calciques) et le couvert un albédo faible, le forçage radiatif engendré par le CI est toujours négatif (refroidissement). Dans leur étude il variait entre 4 et $-10\ W\ m^{-2}$ (valeurs plus fortes que sur la Figure 2b car estimations réalisées pour des conditions de rayonnement plus élevé). Les estimations de gain d'albédo et RF_{\square} de ces auteurs sont toutefois peu précises et surestiment probablement le forçage radiatif (utilisation d'une transmittance constante et valeurs d'albédo estimées à partir de la littérature). Carrer et al. (soumis) ont montré que l'albédo de sol nu estimé par télédétection est très variable au cours de l'année et très lié aux caractéristiques pédologiques des sols. Les Chernozems, riches en matière organique, ont des albédos très faibles et les sols calciques, très sableux ou marneux ont des albédos très élevés. Pour une même espèce de CI, les types de sol vont donc engendrer des $\Delta\alpha$ et des RF_{\square} très variables.

Plusieurs facteurs modulant le RF_{\square} engendré par les CI sont en réalité à prendre en considération :

- Comme évoqué ci-dessus, les variations de rayonnement et de transmittance pendant la période d'implantation du CI vont fortement moduler son RF_{\square} moyen. Ainsi il est très important de considérer des valeurs dynamiques pour ces deux variables et non pas des moyennes annuelles.
- La période d'implantation du couvert et sa durée de végétation vont fortement conditionner l'effet total sur le RF_{\square} engendré par le CI. Un CI implanté précocement, en conditions de forts rayonnements et fortes transmittances, mènera à des RF_{\square} bien plus négatifs (effet plus refroidissant) qu'en hiver, à condition que les albédos de sol nu n'augmentent pas trop significativement avec la chute de leur contenu en eau. Dans cette optique, maintenir les repousses estivales après récolte peut contribuer à accroître significativement le RF_{\square} des parcelles. De même, un couvert enfoui tardivement engendrera un effet plus refroidissant qu'un CI qui est généralement détruit en début d'hiver (comme sur la Figure 2).

- Le choix de l'espèce de couvert intermédiaire et sa densité de semis sont importants. Même s'il n'existe pas de littérature comparant les albédos de différentes espèces de CI, Myhre et Myhre (2003) et Ferlicoq et Ceschia (2015) ont montré qu'un couvert végétal haut et présentant une forte biomasse aura tendance à piéger plus de rayonnement (les forêts qui constituent un cas extrême de couvert très développé ont généralement des albédos plus faible que le sol nu (Rottenberg et Yakir, 2010)). De ce fait, l'albédo d'un CI aura tendance à être plus faible s'il présente une structure très volumineuse par rapport à une culture plus couvrante mais présentant un faible volume de canopée. Notez que le choix de privilégier des couverts bas mais très couvrants risque de se faire au détriment de sa biomasse et donc de l'effet stockage de C. Le choix de l'espèce de CI va aussi conditionner les caractéristiques de réflectance de la plante et donc l'albédo du couvert dans son ensemble. Enfin, la densité de semis jouera sur le taux de recouvrement du sol : plus la densité de levée sera importante, moins le sol influencera l'albédo de la parcelle.
- La neige, lorsqu'elle couvre totalement le sol et le CI, conduit à un RF_{\square} nul. Lorsqu'elle couvre totalement le sol mais pas le CI, le RF_{\square} peut devenir positif car l'albédo de la neige est bien plus élevé que celui d'un CI (Kaye et Quemada, 2017). Dans les hautes latitudes, la présence ou non de végétation qui dépasse du manteau neigeux est un des plus importants phénomènes biophysiques de rétroaction sur le climat (Bright et al., 2015 ; Zhao et Jackson, 2014).
- La présence de résidus de CI, qui ont un albédo proche de la CI vivante, va aussi moduler leur effet. Si les résidus sont maintenus à la surface, ils vont prolonger l'effet refroidissant des CI. A l'inverse, sur les parcelles en semis direct, des pailles sont présentes à la surface du sol et l'implantation d'un CI n'engendrera qu'une faible différence d'albédo par rapport au même sol sans implantation de CI.

Enfin d'autres changements de pratiques peuvent mener à des modifications de l'albédo des parcelles, pouvant soit accentuer, soit contre-balancer l'effet albédo des CI. Le chaulage va causer une augmentation significative d'albédo de la parcelle, alors qu'un apport de biochar peut générer une chute importante d'albédo (Genesio et al., 2012). Le non labour permet un maintien en surface des pailles de céréales qui ont un albédo généralement plus élevé que le sol nu, engendrant ainsi un RF_{\square} négatif. Toutefois, cet effet sur le RF_{net} sera fortement atténué par l'effet « mulch » des pailles ; se traduisant par une diminution du flux d'évaporation, une augmentation de la température et du flux de chaleur sensible en surface (Davin et al., 2014). L'irrigation tendra à décroître l'albédo du sol et cet effet sera contre modulé par une augmentation de l'évapotranspiration qui tend à refroidir le climat (Rigdwell et al., 2009).

3.1.2 Comparaison de l'effet albédo avec les effets biogéochimiques

Dans certains cas extrêmes (fort albédo du sol et faible albédo du CI), un RF_{\square} positif (réchauffement) pourrait être engendré par le CI, et cet effet pourrait compenser voire dépasser l'effet stockage de C des CI. De même, à long terme, l'augmentation du stock de C organique engendrée par les CI risque d'assombrir le sol par concentration de la matière organique en surface, surtout en cas de suppression du labour ; en conséquence l'effet albédo lié au CI serait accru. Cependant tout retour à une agriculture sans CI engendrerait un important forçage positif (car les sols auraient un plus faible albédo qu'à l'heure actuelle). La cartographie de l'albédo de surface par télédétection pourrait ainsi s'avérer très utile pour guider le choix d'implantation des CI selon la situation. L'effet albédo (parfois défavorable) doit donc être confronté à l'effet (favorable) des CI sur les bilans de C et GES en l'exprimant dans une unité équivalente (en C de CO_2 -eq). La conversion de l'effet albédo (en $W.m^{-2}$) en effet forçage radiatif (exprimé en CO_2 -eq ha^{-1}) est un domaine scientifique à part entière en pleine évolution (Bright et al., 2016). Le choix du référentiel temporel (en référence à un état initial) ou par rapport à un autre système (ex. sol nu en phase d'interculture) ainsi que les temps d'intégration de ces effets sont importants et sont discutés dans Muñoz et al. (2010) et Anderson-Teixeira et al. (2012).

Kaye et Quemada (2017) ont calculé l'effet albédo (en $W m^{-2}$) pour la première année d'implantation du CI puis l'ont converti en CO_2 -eq pour finalement étaler cet effet sur 100 ans, ce qui mène à sous-estimer l'effet albédo de la première année qui englobe près de 45% de l'effet total. Le calcul indique que l'effet albédo des CI serait en moyenne d'environ $-455 kg CO_2$ -eq $ha^{-1} an^{-1}$ (puits de CO_2), soit 2.5 fois moins que l'effet stockage de C des CI dans le Tableau 3. Toutefois cet effet pourrait varier entre +146 et $-1107 kg CO_2$ -eq $ha^{-1} an^{-1}$ pour des configurations d'albédo de sol nu élevé/albédo de couvert faible et albédo de sol nu faible/albédo de couvert élevé, respectivement.

Dans la Figure 3 adaptée de Ferlicoq (2016), nous avons choisi, en suivant les recommandations de Bright et al. (2016) concernant les parcelles qui ont des variations d'albédo rapide, de prendre en compte un temps d'intégration à horizon de 1 an (et non pas 100 ans) pour la conversion du RF_{\square} en équivalent CO_2 . Cette approche tend cependant à surestimer l'effet albédo exprimé en CO_2 -eq (Anderson-Teixeira et al., 2012). De fait, les résultats présentés sur la Figure 3 indiquent que l'effet albédo observé à Lamasquère en 2013 converti en CO_2 -eq est près de 6 fois plus important ($-720 kg C$ de CO_2 -eq $ha^{-1} an^{-1}$ soit $-2640 kg CO_2$ -eq $ha^{-1} an^{-1}$) que ce qu'ont trouvé Kaye et Quemada (2017). Même si les contextes des deux études sont différents, cette différence semble peu réaliste, ce qui laisse à penser que des travaux sont encore nécessaires pour affiner les méthodologies de conversion de l'effet albédo en CO_2 -eq. Quoiqu'il en soit, dans ces deux études, il est rassurant d'observer que les effets biogéochimiques et albédo vont dans le même sens (refroidissement).

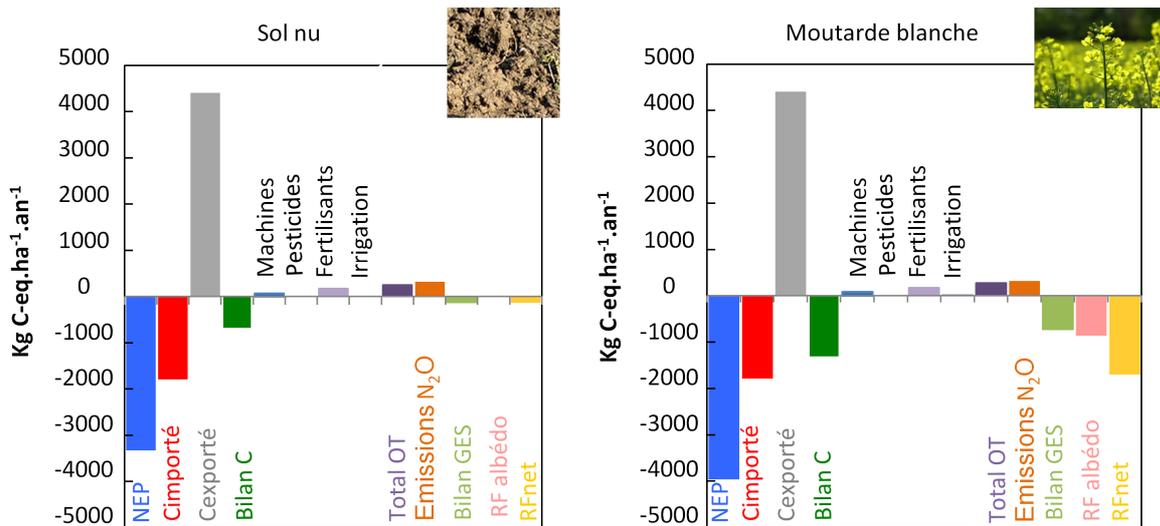


Figure 3 : Composantes des bilans de C et de GES calculés en $kg C$ de CO_2 -eq. $ha^{-1}.an^{-1}$ entre Janvier 2013 et fin Décembre 2013 pour les deux sous-parcelles à Lamasquère (31). Les bilans de la sous-parcelle maintenue en sol nu après récolte de blé (a) englobent les émissions de GES de la culture de blé 2013 et de la période de sol nu suivant cette culture et les bilans de la sous-parcelle sur laquelle une moutarde blanche a été semée après le blé (b) englobent les émissions de GES de la culture de blé 2013 et de la moutarde qui s'est développée après le blé. Sont aussi indiqués en $Kg C$ de CO_2 -eq. $ha^{-1}.an^{-1}$ le forçage radiatif associé à l'augmentation d'albédo (RF_{\square}) sur la sous-parcelle en moutarde par rapport à la sous-parcelle en sol nu, et le forçage radiatif net (RF_{net}) qui est la somme de la contribution biogéochimique (bilan de GES) et de l'effet albédo sur le forçage radiatif. Les termes NEP, $C_{importé}$ et $C_{exporté}$ correspondent respectivement à la fixation nette annuelle de CO_2 , à l'apport de carbone sous forme d'engrais organique et à l'export de carbone au moment de la récolte. La somme de ces trois termes correspond au bilan de C de la parcelle. Le terme « Total OT » correspond à la somme des émissions liées aux opérations techniques (utilisation des machines, de pesticides, de fertilisants et irrigation). Le bilan de GES est calculé en additionnant le bilan de C avec les émissions de N_2O et celles liées aux opérations techniques après que chacune de ces émissions ait été convertie en C de CO_2 -eq. RF_{\square} correspond au forçage radiatif (converti en C de CO_2 -eq) induit par la différence d'albédo entre la parcelle en sol nu et avec un couvert intermédiaire de moutarde blanche (il est donc nul sur la figure de gauche). Le terme RF_{net} est la somme du bilan GES et du RF_{\square} .

La Figure 3 indique aussi que ce sont les 3 composantes du bilan C qui conditionnent le plus le bilan GES des parcelles (voir aussi Ceschia et al., 2010). Le couvert de moutarde a permis d'augmenter la fixation nette annuelle de CO₂ (NEP) sur l'année civile 2013 de 630 Kg C.ha⁻¹ par rapport au cas sol nu. Le terme C_{importé} n'a été augmenté que de 1 kg C.ha⁻¹ par rapport à la sous-parcelle en sol nu à cause de l'apport de C correspondant aux semences de moutarde et le terme C_{exporté} était identique pour les deux sous-parcelles puisque la moutarde a été enfouie. Si le CI avait été exporté par exemple pour une valorisation énergétique (CIVE), le bilan de C aurait été dégradé. In fine, l'inclusion du couvert de moutarde a permis d'améliorer le bilan de C annuel en renforçant l'effet puits de 631 kg C.ha⁻¹. Il faut toutefois garder en mémoire que près de 68% du carbone fixé sous forme de biomasse par la moutarde sera décomposé dans l'année qui suit (Justes et al., 2012).

Concernant les émissions liées aux opérations techniques, le semis, l'enfouissement de la moutarde et son irrigation pour assurer la levée ont augmenté ce poste de 28 kg C de CO₂-eq.ha⁻¹ par rapport à la sous-parcelle en sol nu, ce qui correspond à une augmentation de 10% des émissions liées aux opérations techniques sur l'année. Les émissions de N₂O, estimées ici à l'aide du facteur IPCC par rapport aux apports d'engrais sont identiques sur les deux sous-parcelles. Des mesures effectuées à l'aide de chambres automatiques ont montré que les flux de N₂O avaient été réduits de 56 % durant le développement de la moutarde par rapport à la sous-parcelle en sol nu (Boussac, 2015). Cependant, après le semis du maïs, des flux de N₂O plus importants ont été observés au niveau de la sous-parcelle sur laquelle la moutarde s'était développée car les apports azotés avant semis du maïs n'avaient pas été modulés en prenant compte de la minéralisation de la moutarde enfouie. Au final, sur la période d'un an qui a suivi le semis de la moutarde, les flux cumulés de N₂O étaient similaires sur les deux sous-parcelles. Le couvert de moutarde a permis d'augmenter l'effet puits de C de la parcelle et d'améliorer le bilan de GES de 83% faisant passer le bilan sans couvert de -125 kg C de CO₂-eq.ha⁻¹, à un large puits équivalent à -726 kg C de CO₂-eq.ha⁻¹ pour l'année civile 2013. L'effet stockage de C du couvert a largement dominé l'augmentation des émissions liées aux opérations techniques pour conduire le couvert intermédiaire. Pour finir, sur l'ensemble de l'année culturale, l'effet albédo (720 kg C de CO₂-eq.ha⁻¹) sur le RF_{net} était équivalent à l'effet stockage de C du CI (soit 631 kg C.ha⁻¹) et la parcelle avec CI se comportait comme un fort équivalent puits de C contrairement à la parcelle restée en sol nu qui était proche de la neutralité.

3.1.3 Effet des couverts intermédiaires sur le rayonnement infra-rouge émis par la parcelle

Le second effet biophysique radiatif induit par les couverts intermédiaires concerne la modification des températures de surface (sol + végétation) et par conséquent le rayonnement infra-rouge (IR) émis par la parcelle. La Figure 4a, issue de la campagne 2013 menée à Lamasquère (Ferlicoq, 2016), montre que cet effet exprimé en W.m⁻² a une dynamique et une intensité similaire à l'effet albédo et que l'écart de rayonnement infra-rouge émis entre les deux sous-parcelles est maximal quand le couvert atteint son maximum de développement. Ces résultats illustrent globalement que l'effet de refroidissement engendré par la différence d'albédo entre les deux sous parcelles est doublé lorsque l'on prend en compte l'effet du couvert de moutarde sur les rayonnements de longues longueurs d'ondes émis par la surface. Les pluies survenues à partir de début novembre ont réduit l'écart de température de surface et du sol entre les deux sous-parcelles (Figure 4b) ce qui a diminué l'écart de rayonnement IR émis entre les deux sous-parcelles (Figure 4a). Plus tard, après l'enfouissement de la moutarde, l'écart de rayonnement longues longueurs d'ondes est devenu faible mais légèrement positif traduisant une température du sol légèrement plus faible sur la sous parcelle en sol nu (Figure 4b). Cet effet peut avoir été causé par la remise en surface de sol humide au moment de l'enfouissement de la moutarde.

La présence du couvert de moutarde a globalement diminué la température de surface (sol + végétation) de la parcelle par rapport à la sous-parcelle en sol nu, ainsi que la température du sol entre 0 et 5 cm (Figure 4b). Sur cet horizon, les écarts de températures étaient en moyenne de 2.5 °C et au maximum de 7.9 °C pendant la phase de développement de la moutarde. Ces résultats indiquent que la présence

d'un couvert intermédiaire peut affecter les processus de dégradation de la matière organique du sol (et donc les composantes biogéochimiques du RF_{net}) en diminuant la température du sol, ce qui aurait pour conséquence de réduire la perte de C organique du sol et les émissions de N_2O .

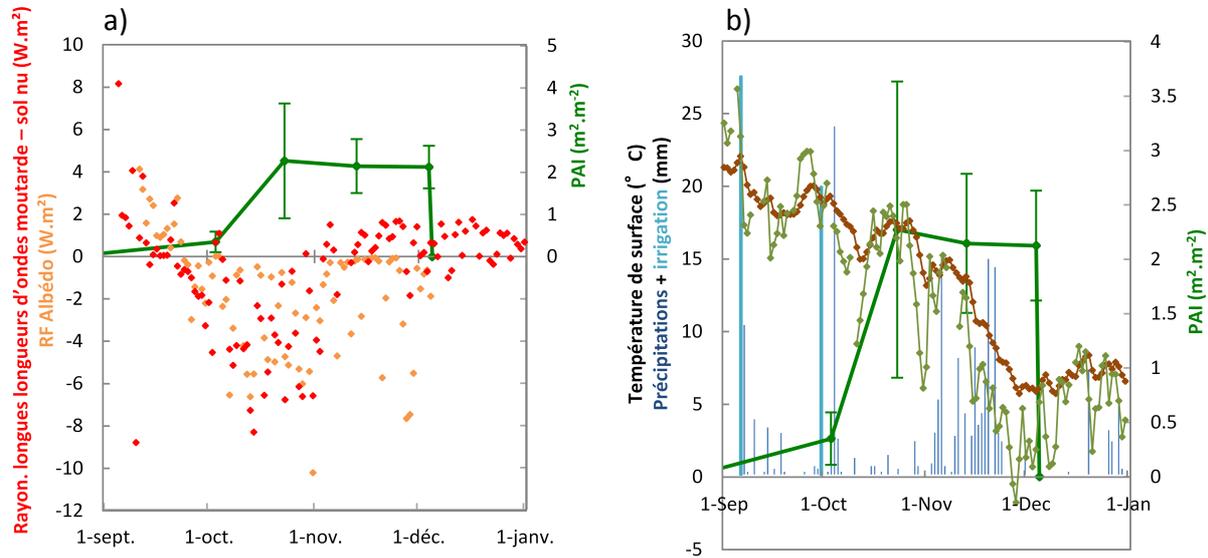


Figure 4 : (a) dynamique d'indice de végétation (PAI pour Plant Area Index) de la moutarde sur l'axe de droite, et sur l'axe de gauche, comparaison des dynamiques d'effet albédo (points oranges) et de différences de rayonnement infra-rouge émis par la surface entre les sous-parcelles maintenues en sol nu et avec un couvert de moutarde blanche (points rouges) lors de la campagne expérimentale de Lamasquère en 2013 ; (b) sur l'axe de gauche, températures du sol entre 0 et 5 cm de profondeur mesurées sur les sous-parcelles en sol nu (points marrons) et avec la moutarde blanche (points verts), précipitations et irrigations (barres bleues) et sur l'axe de droite, PAI de la moutarde.

3.2. Effets biophysiques non radiatifs des couverts intermédiaires : flux de chaleurs sensible et latente

Outre la diminution de la quantité d'énergie disponible à la surface via les effets radiatifs, la présence d'un couvert intermédiaire va affecter la façon dont l'énergie qui reste disponible en surface va être utilisée. Un couvert végétal va avoir tendance à accroître les retours d'eau (évapotranspiration) vers l'atmosphère. En effet, 1) la surface d'échanges gazeux (ici la vapeur d'eau) entre la surface et l'atmosphère est accrue par la présence du feuillage dont la surface peut atteindre plusieurs m² par m² de sol (Figure 5a) et 2) le système racinaire permet à la plante d'avoir accès à des ressources en eau plus profondes que celles contenues dans l'horizon de sol superficiel qui va être affecté par les processus d'évaporation. Par conséquent, les flux d'évapotranspiration (ETR) sont plus importants en présence de végétation qu'en présence de sol nu. Pour les cultures, la transpiration représente souvent près de 70% des flux d'évapotranspiration quand le couvert est développé (Béziat et al., 2013).

Sur la Figure 5, produite à partir des données acquises lors de la campagne expérimentale de 2013 à Lamasquère (Ferlicoq, 2016), on peut en effet voir qu'en présence de CI, une part plus importante de l'énergie disponible en surface va être consommée pour vaporiser l'eau, accroissant le flux de chaleur latente et réduisant le flux de chaleur sensible (Figure 5 a et b). D'après Boucher et al. (2004) et Davin et al. (2014), un accroissement des flux de chaleur latente à la surface tendrait à refroidir le climat. L'effet net ne peut cependant pas être quantifié à partir des mesures de flux de chaleur latente et sensible réalisées à l'échelle de sites expérimentaux. Pour quantifier l'effet net sur le climat, des exercices de modélisation couplée surface-atmosphère à grande échelle seraient nécessaires.

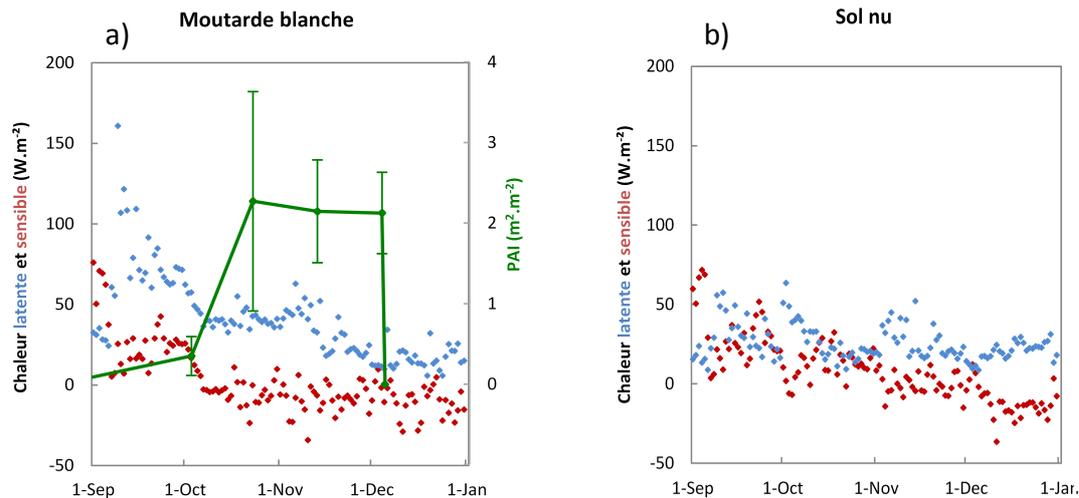


Figure 5 : Evolution des flux de chaleur latente (en bleu) et sensible (en rouge) sur les sous-parcelles avec couvert de moutarde blanche (a) et maintenue en sol nu après la récolte (b) durant la campagne expérimentale menée à Lamasquère en 2013. Sur a) figure aussi l'évolution de l'indice de végétation (PAI) de la moutarde (axe Y de droite).

Conclusion

Parmi les nombreux services écosystémiques qu'offrent les couverts intermédiaires, leur capacité d'atténuation des changements climatiques pose question et suscite un intérêt croissant. Les premières études se sont intéressées à leur capacité à stocker et restituer du carbone organique dans les sols. Il s'avère que l'intensité de séquestration permise par les CI est forte et représente entre 236 et 376 kg C.ha⁻¹.an⁻¹ en moyenne selon les études, soit 865 à 1380 kg CO₂-eq.ha⁻¹.an⁻¹. Ces valeurs sont proches et même plus élevées (5 à 7 pour mille) que l'objectif « 4 pour mille » qui a été fixé dans le cadre de la COP21. Cette capacité de séquestration semble plus reliée à la biomasse de CI produite qu'à leur nature, mais quelques études suggèrent cependant que les légumineuses pourraient favoriser davantage le stockage de C. En moyenne sur tous les essais, le supplément d'émissions de N₂O engendré par les CI est de 0.05 ± 0.74 kg N-N₂O.ha⁻¹.an⁻¹ dans l'année qui suit leur implantation, soit l'équivalent de 6 kg C de CO₂-eq.ha⁻¹.an⁻¹. Les émissions de GES causées par les opérations techniques de semis et destruction des CI représenteraient elles moins de 30 kg C de CO₂-eq.ha⁻¹.an⁻¹. Ces suppléments d'émission de N₂O et de GES sont donc très inférieurs à l'effet séquestration de carbone dans le sol engendré par les CI. Par conséquent le bilan GES des parcelles avec CI est nettement amélioré comparé aux parcelles dont le sol est laissé à nu durant les phases d'inter-culture.

Les CI peuvent aussi contribuer à atténuer les changements climatiques en modifiant les propriétés biophysiques des parcelles. En premier lieu, les couverts intermédiaires accroissent généralement l'albédo des parcelles par rapport à celles maintenues à nu durant les phases d'inter-culture. Cet accroissement d'albédo engendre un effet refroidissant sur le climat qui représente en moyenne l'équivalent d'un stockage de C de 124 à 720 kg C.ha⁻¹ an⁻¹ selon les études. Toutefois, sur des sols très clairs (ex. sols marneux ou calciques), l'implantation d'un CI pourrait faire chuter l'albédo des parcelles et causer un effet réchauffant qui viendrait compenser en partie leur effet stockage de C. Les CI entraînent d'autres modifications des propriétés biophysiques des parcelles. Ils contribuent à diminuer leur température de surface et ce phénomène est d'un ordre de grandeur équivalent aux effets refroidissant de l'albédo. Enfin, ils réduisent les flux de chaleur sensible en surface au profit des flux d'évapotranspiration, ce qui tend aussi à refroidir le climat. En conclusion, les effets biogéochimiques et biophysiques engendrés par l'introduction des CI rentrent généralement en synergie, ce qui accroît leur

capacité à refroidir le climat, et en jouant sur les modalités d'implantation des CI (période, durée, densité, semis direct...) et le choix des espèces, il reste très certainement une marge d'amélioration significative pour accroître leur potentiel d'atténuation des changements climatiques.

Remerciements : Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Morgan Ferlicoq sur le site de Lamasquère en 2013 ont pu être réalisés grâce au soutien financier de l'ADEME (Projet REACCTIF CICC et co-financement de la Thèse), de l'INSU-CNRS, de la Région Midi-Pyrénées et des projet GHG-Europe (FP7 European grant n°244122) et Fluxpyr (FEDER Interreg IVa program, réf. POCTEFA 08/34). Nous souhaitons aussi remercier notre équipe technique Bartosz Zawilski, Bernard Marciel, Nicole Claverie et nos collègues Tiphaine Tallec et Aurore Brut pour leur aide durant cette campagne.

Références bibliographiques

- Azzi E., 2015. Estimation du forçage radiatif induit par le changement d'albédo, suite à l'introduction de couverts intermédiaires sur les terres agricoles d'Europe», Mémoire de 3ème année de l'Ecole Polytechnique, 57p.
- Balesdent J., Balabane M., 1996. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology & Biochemistry* 28, 1261-1263.
- Béziat P., Ceschia E., Dedieu G., 2009. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1628–1645.
- Beziat P., et al., 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.
- Boussac M., 2015. Impact des pratiques agricoles, en interaction avec le climat, sur la production de N₂O/CO₂. Mémoire de Master 2 Université Paul Sabatier & ENSAT 35p.
- Bright R.M., Bogren W., Bernier P., Astrup, R., 2016. Carbon-equivalent metrics for albedo changes in land management contexts: relevance of the time dimension. *Ecol Appl* 26, 1868–1880.
- Carrer D., et al., 2014. Dynamic mapping of snow-free vegetation and bare soil albedos at global 1 km scale from 10-year analysis of MODIS satellite products. *Remote Sensing of Environment* 140, 420–432.
- Carrer D., et al. (soumis à ERL) What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? a study case based on the use of cover crops.
- Ceschia E., et al., 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 363–383.
- Constantin J., Beaudoin N., Laurent F., Cohan J.P., Duyme F., Mary B., 2011. Cumulative effects of catch crops on nitrogen uptake, leaching and net mineralization. *Plant and Soil* 341, 137–154.
- Constantin J., Beaudoin N., Launay M., Duval J., Mary B., 2012. Long-term nitrogen dynamics in various catch crop scenarios: test and simulations with STICS model in a temperate climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 147, 36–46.
- Davin E.L., Seneviratne S.I., Ciais P., Olliso A., Wang T., 2014. Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management. *PNAS* 111, 9757–9761.
- Faroux S., et al., 2013. 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.
- 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.
- Ferlicoq M., 2016. Comparaison pour les agroécosystèmes des contributions biogéochimiques et biophysiques au forçage radiatif net pour l'identification de leviers d'atténuation au changement climatique, Thèse de doctorat Université Paul Sabatier, 357p.
- Genesisio L., et al., 2012. Surface albedo following biochar application in durum wheat. *Environ. Res. Lett.* 7, 014025.

- Guardia G., Abalos D., García-Marco S., Quemada M. et al., 2016. Effect of cover crops on greenhouse gas emissions in an irrigated field under integrated soil fertility management. *Biogeosciences* 13, 5245–5257.
- Jensen L.S., Salo T., Palmason F., et al., 2005. Influence of biochemical quality on C and N mineralisation from a broad variety of plant materials in soil. *Plant and Soil* 273, 307–326.
- Justes E., Mary B., Nicolardot B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil* 325, 171-185.
- Justes E. et al., 2013. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires. Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres systèmes écosystémiques. <https://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Cultures-Intermediaires>
- Kätterer T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L., 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141, 184–192.
- Kaye J.P., Quemada M., 2017. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37.
- Mary B., 2013. Effet des cultures intermédiaires sur la séquestration du carbone et le bilan gaz à effet de serre. In: Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires, chapitre 5, 177-192. <https://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Cultures-Intermediaires>
- McDaniel M., Tiemann L., Grandy A.S., 2014. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecological Applications* 24, 560–570. doi:10.1890/13-0616.1
- Muñoz I., Fernandez-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. *International journal of life cycle assessment* 15, 672–681.
- Myhre G., Myhre, A., 2003. Uncertainties in Radiative Forcing due to Surface Albedo Changes Caused by Land-Use Changes. *J. Climate* 16, 1511–1524.
- Nicolardot B., Recous S., Mary B., 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil* 228, 83–103.
- Pique G., 2016. Estimation du forçage radiatif induit par le changement d'albédo, suite à l'introduction de couverts intermédiaires sur les terres agricoles d'Europe», Mémoire de Master 2 OASC, Université Paul Sabatier, 39p.
- Poepflau C., Don A., 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 200, 33–41.
- 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.
- Rotenberg E., Yakir D., 2010. Contribution of Semi-Arid Forests to the Climate System. *Science* 327, 451–454.
- Schimel D.S., 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* 1, 77–91.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL).