



HAL
open science

RAPPORT FINAL DU PROJET SOCCROP : Durée de couverture des sols agricoles et stockage de carbone

Eric Ceschia, Ludovic Arnaud, Ainhoa Ihasusta, Mathieu Fauvel, Julie Constantin, Helene Raynal

► To cite this version:

Eric Ceschia, Ludovic Arnaud, Ainhoa Ihasusta, Mathieu Fauvel, Julie Constantin, et al.. RAPPORT FINAL DU PROJET SOCCROP : Durée de couverture des sols agricoles et stockage de carbone. Inrae; cesbio. 2023. hal-04128813

HAL Id: hal-04128813

<https://hal.inrae.fr/hal-04128813>

Submitted on 14 Jun 2023

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

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



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

RAPPORT FINAL DU PROJET SOCCROP

Durée de couverture des sols agricoles et stockage de carbone

Auteurs : Eric Ceschia, Ludovic Arnaud, Ainhoa Ihasusta, Mathieu Fauvel du laboratoire CESBIO et Julie Constantin, Hélène Raynal du laboratoire AGIR

SOMMAIRE

CONTEXTE ET RAPPEL DES OBJECTIFS DU PROJET	5
MÉTHODOLOGIE DU PROJET	7
Description de la méthode SOCCROP basée sur la télédétection et les raisons de son développement	7
GÉNÉRALITÉS	7
DONNÉES UTILISÉES ET TRAITEMENTS EFFECTUÉS	8
Simulations STICS pour le 4/1000	12
Comparaison des résultats de l'indicateur SOCCROP et des simulations STICS	13
RÉSULTATS DE L'ÉTUDE	14
Résultats obtenus sur la France avec la méthode SOCCROP	14
COMPARAISON DES RÉSULTATS SUR FRANCE ENTIÈRE POUR 2 ANNÉES CULTURALES	14
ANALYSE PAR CULTURES	16
• Le blé	17
• Le colza	18
• Le tournesol	18
• Le maïs	19
ANALYSE STATISTIQUE PAR CULTURE POUR UNE RÉGION DONNÉE	20
Comparaison des résultats de la méthode SOCCROP avec les simulations STICS sur la France	20
COMPARAISON DES DURÉES DE COUVERTURE DU SOL SUR LA FRANCE	20
COMPARAISON DES FLUX NETS ANNUELS DE CO ₂	22
Résultats sur les zones d'études hors France	25
EN EUROPE	25
AILLEURS DANS LE MONDE	27





PERSPECTIVES	31
Perspectives d'améliorations de la méthode	31
UTILISATION COMBINÉE DES DONNÉES SENTINEL 2 ET SENTINEL 1	31
UTILISATION DE DONNÉES CLIMATIQUES COMBINÉES AU NDVI POUR AMÉLIORER L'ESTIMATION DU FLUX NET ANNUEL DE CO ₂	31
PRISE EN COMPTE DE L'INTENSITÉ DE DÉVELOPPEMENT DE LA VÉGÉTATION EN PLUS DE SA DURÉE DE COUVERTURE DU SOL	32
UTILISATION DES RÉSULTATS DE LA COMPARAISON AVEC STICS POUR AMÉLIORER L'APPROCHE	32
Perspectives de production opérationnelle sur la France ou le monde et cout financier	33
Comparaison des simulations STICS et de l'approche SOCCROP sur des années plus récentes	33
LIMITES DE L'APPROCHE ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS	34
Limites de l'approche	34
Perspectives d'application	34
CONCLUSION	36

RÉSUMÉ

L'initiative « 4 pour 1000 » a été lancée à l'issue de la COP21, avec l'objectif **d'augmenter les stocks mondiaux de matières organiques dans les sols** de 4 pour 1000 (ou 0,4 %) chaque année pour compenser une partie des émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre et pour accroître la sécurité alimentaire.

Ces dernières années plusieurs études ont mis en avant qu'**un des principaux leviers permettant d'atteindre cet objectif était l'allongement de la durée de couverture des sols via la modification des rotations culturales et l'introduction ou l'expansion des cultures intermédiaires**. Toutefois, les données permettant de caractériser la durée de couverture du sol et son évolution en fonction des politiques publiques font actuellement défaut. Aussi ces études mettent en évidence la nécessité de (i) mieux de caractériser le temps de couverture des sols agricoles et (ii) la relation entre le temps de couverture du sol et le stockage de carbone pour estimer à la fois la fixation nette actuelle de CO₂ atmosphérique de ces surfaces mais aussi leur potentiel de stockage additionnel.

De ce fait, **les objectifs de ce projet étaient 1) de quantifier la durée de couverture du sol** par de la végétation active à une échelle parcellaire sur l'ensemble de la France pour différentes années culturales et sur différentes zones du globe **à partir des données satellitales Sentinel-2, 2) d'estimer la fixation nette annuelle de CO₂ de ces parcelles** en s'appuyant sur la relation établie par Ceschia et al. (2010) entre durée de couverture des sols par de la végétation active et fixation nette de CO₂ pour les grandes cultures en Europe et enfin 3) de réexploiter les données de l'étude « Stocker du carbone dans les sols français – Quel potentiel et à quel coût » obtenues **via des simulation du modèle de culture STICS** pour, d'une part, **explorer les liens entre la durée de couverture du sol et le stockage de carbone dans les sols** et d'autre part, vérifier à partir de ces simulations si les estimations faites à partir de l'approche par télédétection concordent avec les simulations STICS.

Tout d'abord, **un outil de quantification des durées de couverture du sol à large échelle et haute résolution a été développé à partir du logiciel IOTA2**, des algorithmes développés dans le cadre du projet Européen NIVA et **des données satellitales Sentinel 2**. Malgré sa simplicité, **cet outil nous a permis non seulement de quantifier les durées de couverture du sol à haute résolution mais aussi d'estimer les flux nets annuel de CO₂ des principales grandes cultures sur l'ensemble de la France**. Une version améliorée prenant aussi en compte certaines variables climatiques (rayonnement solaire, température) a en outre été développée et elle a pu être testée sur plusieurs zones dans le monde grâce aux données de télédétection Sentinel 2 qui ont une couverture globale. **L'indicateur a montré une bonne cohérence 1) avec les pratiques connues sur le terrain comme la mise en œuvre de cultures intermédiaires (ex. en Bretagne ou en Géorgie) et 2) avec les simulations réalisées avec le modèle STICS** même si cet exercice de comparaison mériterait d'être refait avec des données d'enquêtes culturales plus récentes.

C'est donc une approche qui peut facilement être mise en œuvre pour produire un indicateur lié au bilan de C des grandes cultures (par exemple dans une optique de versement de primes environnementales pour la PAC). Elle permet aussi d'identifier

l'effet de certaines pratiques agricoles sur les flux nets annuels de CO₂ (type de culture et leur utilisation, présence de cultures intermédiaires) et d'observer l'impact de la réglementation (ex. Directive nitrates). **Cependant cette approche ne permet pas de prendre en compte l'effet de l'ensemble des pratiques sur les bilans de C des parcelles.** Pour ce faire, il faudrait intégrer au calcul de l'indicateur des données relatives aux récoltes et aux amendements organiques (ce qui correspond à la méthode TIER 2 du projet NIVA). C'est cette méthode qui serait à privilégier dans le cadre d'un financement des agriculteurs en fonction de la quantité de carbone qu'ils stockent.

L'approche a toutefois montré ses limites dans les zones à fort ennuagement comme en Belgique ou au Brésil. Pour une production opérationnelle à l'échelle globale, il serait donc nécessaire d'utiliser des données satellitaires radar (ex. Sentinel-1) en complément des données optiques Sentinel-2. L'utilisation des données Sentinel-1 pour interpoler de manière opérationnelle les trous dans les séries temporelles de NDVI issues de Sentinel-2 est d'ailleurs explorée par plusieurs unités de recherches. Ce n'est donc probablement qu'une question de temps avant que l'approche mise en œuvre dans le cadre de SOCCROP puisse être appliquée de manière plus opérationnelle à l'échelle globale en s'appuyant sur l'utilisation combinée des données Sentinel 1 et 2.

Rappelons **toutefois** que **les coûts de mise en œuvre**, les temps de calculs et le volume de stockage de données qui seraient nécessaire **pour une application à échelle globale sont abordables uniquement pour quelques très grosses entreprises du numérique, pour certaines agences spatiales, ou agences pluri-étatiques** (ex. services Copernicus de l'Europe).

CONTEXTE ET RAPPEL DES OBJECTIFS DU PROJET

Les terres agricoles occupent près de 12 % de la surface terrestre. Elles contribuent globalement à accentuer les changements climatiques en émettant des Gaz à Effet de Serre mais elles **peuvent aussi contribuer, en faisant évoluer leurs pratiques, à atténuer ces changements climatiques via** par exemple la gestion de leur albédo de surface (ex. Davin et al., 2014 ; Carrer et al., 2018) ou **le stockage de C dans les sols** (ex. Launay et al., 2021).

C'est dans ce contexte que l'initiative « 4 pour 1000 » a été lancée à l'issue de la COP21, avec l'objectif d'augmenter les stocks mondiaux de matières organiques dans les sols de 4 pour 1000 (ou 0,4 %) chaque année pour compenser une partie des émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre et pour accroître la sécurité alimentaire (Chabbi et al., 2017 ; Minasny et al., 2017). Depuis, cette initiative a suscité un vaste débat dans la communauté scientifique au sujet de sa faisabilité (Baveye et al., 2018; Poulton et al., 2018), mais il est globalement admis qu'une telle augmentation du carbone organique du sol (SOC) est probablement réalisable dans les sols qui sont activement gérés pour l'agriculture, bien que cela puisse se faire parfois à un taux inférieur à 4 pour 1000 selon les contextes pédoclimatiques et sociétaux (Chabbi et al., 2017; Lal, 2016; Minasny et al., 2017). Quoiqu'il en soit, **de nombreuses études s'accordent sur le fait que la réduction des périodes de sol nu au sein des rotations de cultures peut favoriser le stockage de C** (Ceschia et al., 2010), soit en modifiant les rotations culturales, soit en introduisant des cultures intermédiaires entre les cultures principales (Poeplau & Don, 2015 ; Pellerin et al., 2019). En effet, les cultures intermédiaires fixent du C atmosphérique dans leur biomasse. A leur destruction, du C va donc être enfoui dans le sol et même si une grande partie de ce C sera minéralisée et réémise dans l'atmosphère sous forme de CO₂, une fraction restera piégée dans le sol sous forme de matière organique stable. **L'expertise nationale « Stocker du carbone dans les sols français – Quel potentiel et à quel coût »** (Pellerin et al. 2019) a d'ailleurs montré, à partir de simulations réalisées avec le modèle STICS, **que l'allongement et l'extension des cultures intermédiaires était la pratique qui avait le plus fort potentiel de stockage dans les sols au niveau national**. De même, Ceschia et al. (2010) avaient mis en évidence un lien direct entre temps de couverture des sols par de la végétation active et fixation nette de CO₂ pour les grandes cultures en Europe.

Ces études ont donc mis en évidence la nécessité (i) de mieux caractériser la relation entre le temps de couverture du sol et le stockage de carbone et (ii) de caractériser précisément le temps de couverture des sols agricoles de manière à pouvoir mieux caractériser leur potentiel de fixation nette de CO₂ atmosphérique.

De ce fait, **les objectifs de ce projet sont** 1) **de quantifier la durée de couverture du sol par de la végétation active** à une échelle parcellaire sur l'ensemble de la France pour des années culturales et différentes zones du globe **à partir des données satellitales Sentinel** pour 2) **estimer une fixation nette annuelle de CO₂** en s'appuyant sur la relation établie par Ceschia et al. (2010) entre durée de couverture des sols par

de la végétation active et fixation nette de CO₂ pour les grandes cultures en Europe et enfin 3) **de réexploiter les données de l'étude « Stocker du carbone dans les sols français - Quel potentiel et à quel coût »** (souvent appelée abusivement Etude 4 pour mille pour la France) obtenues par simulation du modèle de culture STICS (Brisson et al. 2003) **pour d'une part, explorer les liens entre la durée de couverture du sol et le stockage de carbone dans les sols et d'autre part vérifier à partir de ces simulations si les estimations faites à partir de l'approche par télédétection concordent avec les simulations STICS.**

MÉTHODOLOGIE DU PROJET

Description de la méthode SOCCROP basée sur la télédétection et les raisons de son développement

GÉNÉRALITÉS

La construction de l'outil SOCCROP a été réalisée en combinant la chaîne de traitement d'images satellites et de cartographie de l'occupation du sol Iota2¹ (développé au CESBIO) avec les algorithmes développés par le CESBIO dans le cadre du projet H2020 NIVA, dont un des objectifs était de développer un indicateur lié au stockage de C dans les sols de grandes cultures appelé « Carbone TIER1 » (CT1). Toutefois les algorithmes du CT1 qui avaient été développés dans le cadre du projet NIVA comme prototypes ne permettaient de traiter que quelques tuiles (emprises satellite) Sentinel 2 en temps de calcul raisonnable. Il a donc été décidé de combiner les algorithmes CT1 du projet NIVA² avec la chaîne de traitement Iota2 pour pouvoir produire cet indicateur à très large échelle (sur plusieurs centaines de tuiles Sentinel 2). **Cette méthode pourrait être utilisée pour réaliser une production à l'échelle globale hormis sur les zones à forte couverture nuageuse** (ex. tropiques) car la présence fréquente de nuages empêche un suivi dynamique suffisamment fin des cycles de végétation. Dans ces contextes spécifiques, un recours à des données satellitaires radar (SAR) comme Sentinel-1 devrait être envisagé.

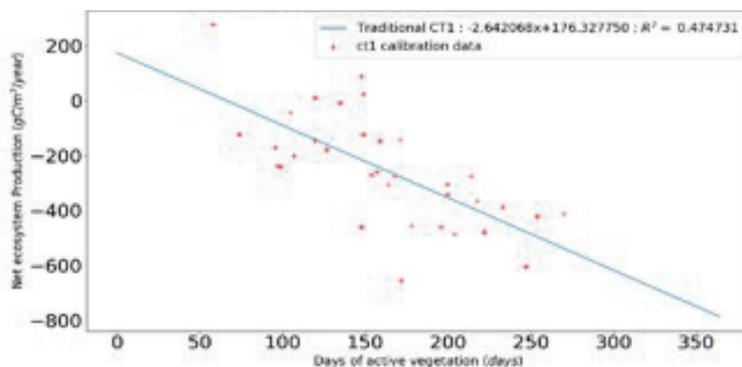
Le CT1 NIVA avait été développé en se basant sur la relation empirique développée par Ceschia et al. (2010) reliant le flux net annuel de CO₂ (NEP, pour Net Ecosystem Production) aux nombres de jours où la végétation est photosynthétiquement active (NDAV pour "Number of days of active vegetation" en anglais) (Figure 1). Cette relation s'appuie sur une quarantaine d'années de mesures de flux net de CO₂ obtenues par la méthode d'Eddy covariance, cumulées sur une quinzaine de sites en Europe (couvrant une large gamme de pédoclimats et types de culture). **Cette relation est applicable aux principales grandes cultures en Europe** (blé, maïs, colza. . . soit 15 espèces en tout, mais pas le riz).

L'indicateur NIVA CT1 utilisait donc cette relation relativement simple pour estimer le flux net de CO₂ à partir de l'observation du nombre de jours où la végétation est active (NDAV :

$$NEP = a \cdot NDAV + b \quad (1)$$

où les paramètres a et b ont été calibrés sur des mesures de flux du réseau ICOS³ selon $a = -2.64 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ et $b = 176 \text{ gC.m}^{-2}$ avec des erreurs respectives de $\sigma_a = 0.49 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ et $\sigma_b = 84 \text{ gC.m}^{-2}$

Figure 1 : Relation linéaire de l'approche CT1 - basée sur l'étude de Ceschia et al. (2010)



DONNÉES UTILISÉES ET TRAITEMENTS EFFECTUÉS

La durée de végétation active (NDAV) de grandes cultures et la NEP devant être calculées de manière systématique et à grande échelle (pour la Politique Agricole Commune par exemple), il était donc naturel de se tourner vers des méthodes de télédétection pour estimer la durée de végétation active couvrant le sol via des indicateurs de végétation obtenus par satellite. Or depuis 2016, une nouvelle génération de satellites d'observation de la terre, les Sentinel 2, permet de suivre l'évolution temporelle de la végétation sur l'ensemble du globe à 10m de résolution (Figure 2).

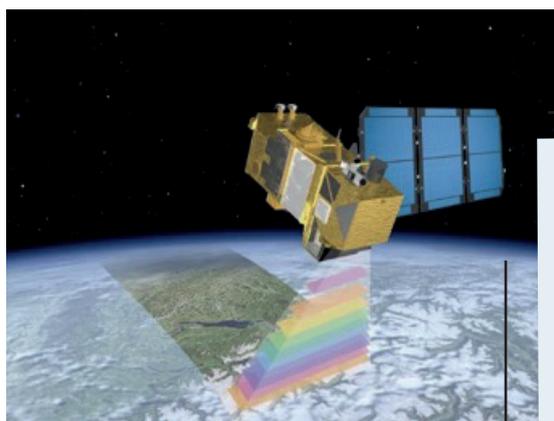


Figure 2 : Illustration des satellites Sentinel (crédits CNES) **et caractéristiques des satellites**

Missions Sentinel 2 :

2 satellites optique (Sentinel-2A et Sentinel-2B)

- Haute Résolution : 10 m x 10 m
- Haute fréquence de revisite : 5 jours
- Multi-Spectrale : 13 bandes spectrales en lumière visible et proche infrarouge avec une résolution comprise entre 10 et 60 mètres et une fauchée de 290 km

Ces données sont gratuites et libres d'accès. Cette étude s'appuie donc sur ces données satellitaires. C'est aussi la constellation de satellites qui va servir à la vérification des déclaration PAC faites par les agriculteurs pour toucher leurs subventions.

Pour produire l'indicateur SOCCROP, nous avons utilisé les données satellites fournies par l'ESA (European Space Agency) en ajoutant une correction atmosphérique et un masque de nuages, produit par la chaîne MAJA⁴ (MACCSATCOR Joint Algorithm et MACCS : Multi-sensor Atmospheric Correction and Cloud Screening) (Baetens et al., 2019). Sur l'Europe, ces données étaient prêtes à l'emploi (déjà traitées avec MAJA) et téléchargeables via de la plateforme THEIA de "Niveau L2A".

A partir de ces données satellites, la durée de couverture végétale (NGD pour Number of Green Day) est estimée pour chaque parcelle cultivée en France. Pour cela, l'indice spectral de végétation appelé NDVI a été utilisé. Il est calculé à partir des bandes spectrales du rouge et de l'infrarouge. Il croit entre 0 et 1 en fonction de la quantité de végétation.

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R) \quad (2)$$

Avec PIR, la valeur de réflectance dans le Proche Infra-Rouge et R dans le Rouge.

Ces bandes spectrales sont classiquement utilisées pour observer la couverture végétale car le maximum de réflectance des végétaux se situe autour du proche infra-rouge et le minimum autour du rouge, ce qui permet de discriminer facilement la végétation du sol. Notons toutefois, que le NDVI est surtout sensible à la présence de végétation plus qu'à son activité photosynthétique. Cela implique que la présence de végétation peut être perçue par satellite bien que celle-ci ne soit pas active d'un point de vue

photosynthèse (ex. durant l'hiver quand il fait froid ou que le rayonnement solaire est faible). Cependant, dans un premier temps, l'approximation "végétation verte" = "végétation active" est faite. Ainsi on peut faire l'hypothèse que le satellite mesure le NDAV comme le nombre de jours verts (NGD pour number of green day).

Pour les études concernant la France, l'information NGD à l'échelle du pixel a, dans un premier temps, été produite pour générer ensuite une cartographie du flux net annuel de CO₂ sur l'ensemble du territoire métropolitain. Pour ce faire, les séries temporelles de NDVI ont été extraites pour chaque pixel appartenant au territoire de la Métropole pour les années culturales 2019 (soit du 1^{er} octobre 2018 au 30 septembre 2019) et 2020 (soit du 1^{er} octobre 2019 au 30 septembre 2020). Ces séries permettent d'identifier les cycles de croissance de la végétation ainsi que les périodes d'interculture, et donc de déterminer le nombre de jours où la végétation est active durant l'année culturale (NDAV) en faisant l'approximation que *actif* et *vert* sont équivalents. Ainsi, nous considérons que la végétation est active si le NDVI dépasse le seuil de 0.3 comme représenté sur la Figure 3, qui correspond à la limite d'un sol nu (0.2 ± 0.09 d'après Montandon et al. 2008).

Ensuite, pour la France métropolitaine, les NDAV et flux nets annuel de CO₂ ont été agrégés à l'échelle de la parcelle, pour 1) accélérer les temps de calculs pour les analyses de résultats et 2) pouvoir analyser les résultats statistiques par types de cultures.

Pour ce faire nous avons utilisé les données du Registre Parcellaire Graphique (RPG) des années 2019 et 2020. Ces données contiennent entre autres, l'identifiant de la parcelle, le code culture (3 lettres) qui caractérise la culture principale (ex : BDH = blé dur d'hiver, BTP = blé tendre de printemps ...). Le RPG est produit annuellement par l'IGN à la demande de l'Agence de Service et de Paiements (ASP) qui gère le versement des aides de la PAC.

Chaque agriculteur bénéficiant de ces aides doit déclarer, auprès de l'ASP, les données de contours de ses parcelles en culture et les productions principales associées.

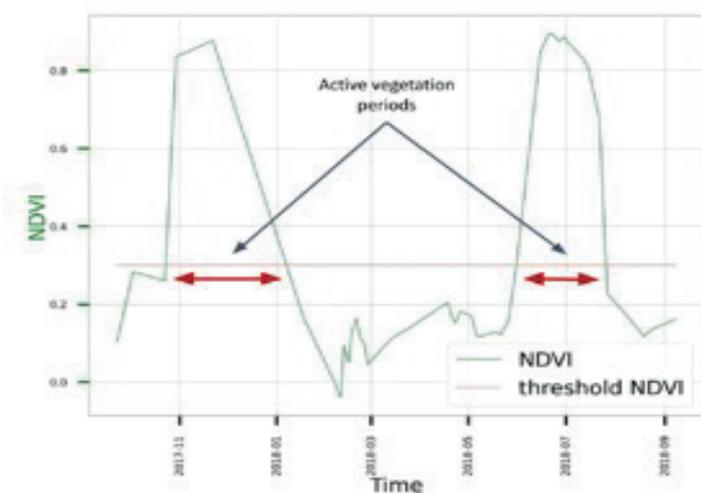


Figure 3 : Schémas de calcul de la durée de couverture végétale active à partir d'une série temporelle de NDVI sur une année culturale.

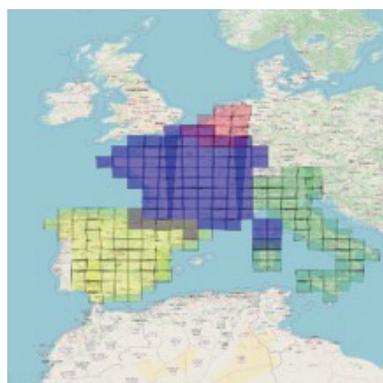
Pour les territoires hors France, les données satellites Sentinel 2 ont aussi été utilisées pour quantifier sur tous les pixels de l'image le NDAV et le flux net annuel de CO₂, mais un pré-traitement avec la chaîne MAJA a dû être effectué (voir ci-dessus). Ensuite, les

zones non-cultivées ont été masquées à l'aide de la carte globale d'occupation du sol produite par l'ESA (produit ESA CCI⁵ à 300m de résolution). En effet, nous ne disposons pas de l'équivalent du RPG (ou de cartes à plus haute résolution décrivant les classes de cultures) pour ces territoires. Les données de l'année culturale 2019 (pour les autres territoires l'information au pixel a été conservée systématiquement) ont été utilisées pour les analyses sur l'hémisphère nord (Europe, USA, Sénégal) et celles de l'année culturale de l'année 2019 (du 1^{er} avril 2018 au 31 mars 2019) ont été utilisées pour les analyses sur l'hémisphère Sud (Brésil, Australie).

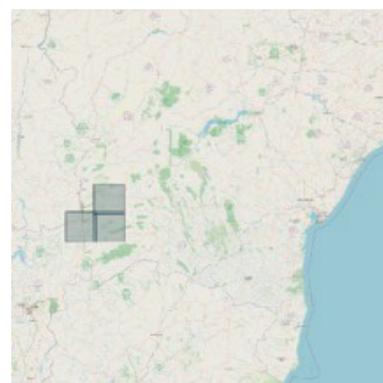
La Figure 4 précise les zones correspondant aux emprises des tuiles Sentinel 2 sur lesquelles les analyses ont été effectuées.

Pour ces sites, une évolution de l'indicateur CT1 a aussi été calculée. En effet, l'approche de base fait l'hypothèse qu'une végétation verte est aussi active, ce qui n'est pas forcément vrai, en particulier l'hiver. Elle ignore aussi les processus propres au sol comme la respiration hétérotrophe ou le *priming effect* (accélération de la respiration du sol suite à un enfouissement de matière organique fraîche), qui sont pilotés par les conditions extérieures (température, humidité) et qui ont une contribution positive (émission) au flux de CO₂ annuels. **Ainsi l'approche de base a tendance à surestimer la fixation de CO₂, en particulier pour les cultures d'hiver.**

Figure 4 : Cartographie des zones étudiées



sur l'Europe



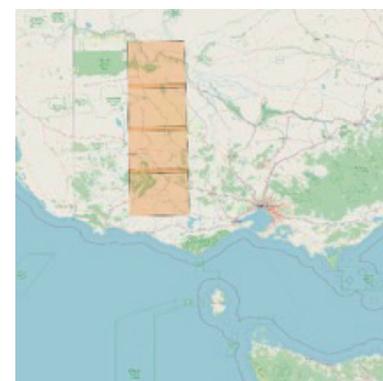
sur le Brésil



sur les USA



sur le Sénégal



sur l'Australie

Pour améliorer l'approche, on peut imaginer prendre en compte ces différents processus par l'utilisation conjointe de de télédétection et de donnée climatique. Une analyse précise des données expérimentales du réseau ICOS montre que le modèle initial (1) peut être modifier sous la forme suivante :

$$NEP = c N_{GD} + d N_{AS}$$

où N_{GD} est le nombre de jours vert, N_{AS} est le nombre de jours durant lesquels la respiration du sol est potentiellement plus active car il fait chaud, et c et d sont des paramètres de régression.

Dans notre contexte N_{GD} est défini comme le nombre de jours où NDVI > 0.3. N_{AS} est défini comme le nombre de jours tel que NDVI < 0.3 et tel que le rayonnement global est supérieur à un certain seuil R_g^{th} . La calibration de ce modèle sur les données flux du réseau ICOS permet d'obtenir que $c = -0.85 \pm 0.24 \text{ gC.m}^{-2}.j^{-1}$, $d = 0.14 \pm 0.50 \text{ gC.m}^{-2}.j^{-1}$, et $R_g^{th} = 65 \text{ W.m}^{-2}$

Pour les deux formes d'indicateurs (initial et son évolution), une expression analytique de l'incertitude peut être dérivée. Dans les deux cas, elle combine l'incertitude intrinsèque des modèles de régressions (contenue dans l'incertitude des paramètres) avec l'incertitude sur la mesure des variables externes telles le N_{GD} ou le N_{AS} .

Pour la forme de base du CT1 on obtient :

$$\sigma_{NEP} = \sqrt{\sigma_c^2 N_{GD}^2 + \sigma_b^2 + \sigma_{N_{GD}}^2 a^2}$$

Pour l'extension de l'indicateur une expression similaire peut-être dérivée :

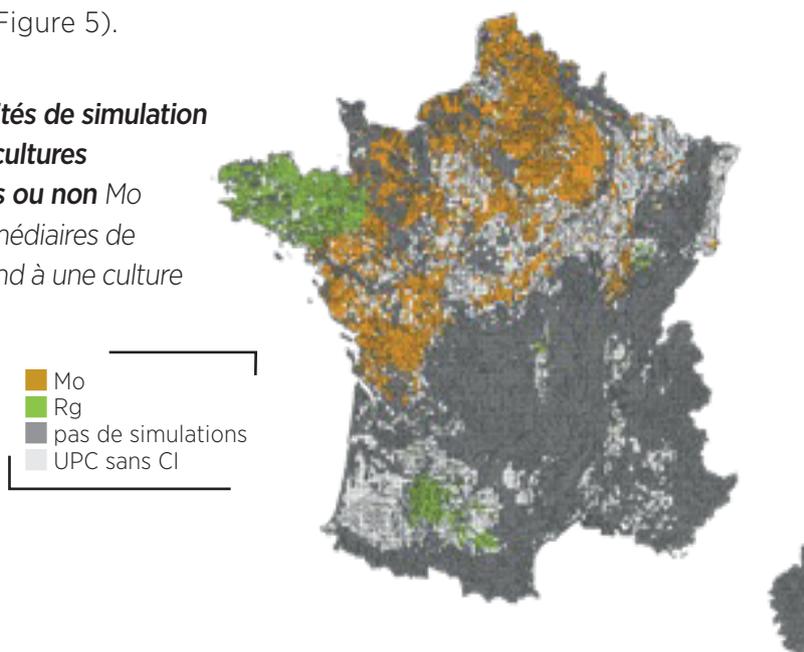
$$\sigma_{NEP} = \sqrt{\sigma_c^2 N_{GD}^2 + \sigma_{N_{GD}}^2 c^2 + \sigma_d^2 N_{AS}^2 d^2}$$

Note : Le logiciel gratuit Qgis a été utilisé pour réaliser l'ensemble des cartes de ce document.

Simulations STICS pour le 4/1000

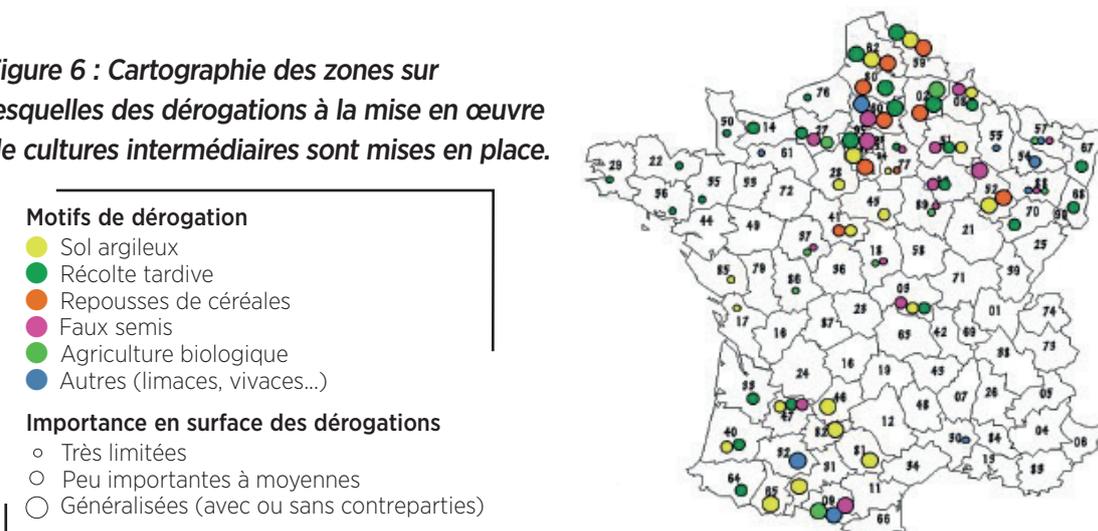
Les simulations ont été réalisées pour les années culturales 2013 à 2021 sur France entière avec le modèle STICS (Brisson et al., 1998) dans le cadre de l'Expertise nationale « Stocker du carbone dans les sols français » publiée en 2019 puis poursuivies jusqu'à 2021. Elles sont réalisées sur la base d'unités pédoclimatiques (UPC) définies en croisant les mailles de la grille de données climatiques SAFRAN⁶ (8x8 km) et de la carte des sols au 1/1 000 000⁷. Soit en tout 23 149 unités de simulation. Pour chaque unité de simulation, les principaux systèmes de cultures (rotations des cultures) représentant plus de 70% de la surface des unités de simulation ont été considérées (soit généralement 1 à 2 systèmes de cultures par unité de simulation). Les cultures intermédiaires simulées étaient soit des moutardes blanches, soit des raygrass (Figure 5).

Figure 5 : Cartographie des unités de simulation et de celles sur lesquelles des cultures intermédiaires ont été simulées ou non Mo correspond à des cultures intermédiaires de moutarde blanche, Rg correspond à une culture intermédiaire de raygrass.



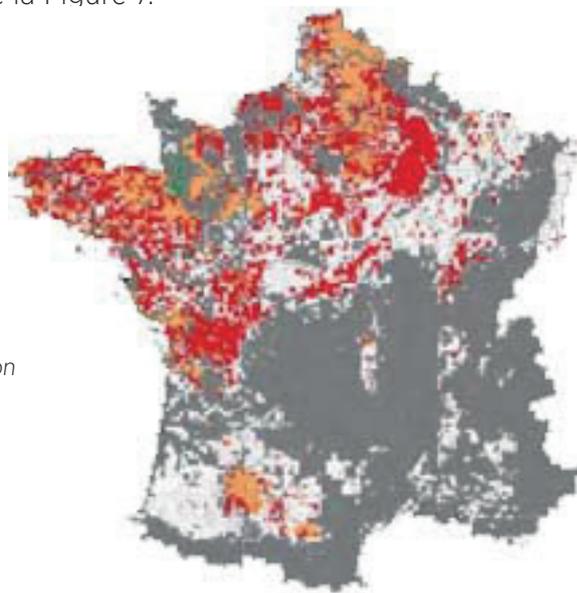
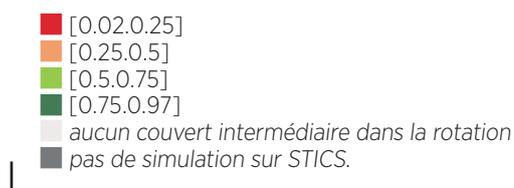
Les cultures intermédiaires étaient simulées uniquement sur les systèmes en interculture longue (ex. entre une culture d'hiver et d'été), **en zones vulnérables nitrates et sur des zones hors dérogations taux d'argile et récoltes tardives** (Figure 6). Pour ce faire, les données des enquêtes «Pratiques Culturelles» 2006 et 2011 d'Agreste⁸ ont été utilisées tout comme les données du registre parcellaire graphique (RPG). Pour plus de détail, voir p 272 à 275 de Pellerin et al. (2019).

Figure 6 : Cartographie des zones sur lesquelles des dérogations à la mise en œuvre de cultures intermédiaires sont mises en place.



In fine, la répartition géographique des zones sur lesquelles des couverts intermédiaires ont été simulés ainsi que leur fréquence de retour dans les rotations culturales était très variable spatialement comme le montre la Figure 7.

Figure 7 : Fréquence (en année) des cultures intermédiaires dans les rotations selon les hypothèses établies précédemment



Comparaison des résultats de l'indicateur SOCCROP et des simulations STICS

La comparaison des simulations réalisées avec la méthode SOCCROP et le modèle STICS ont été réalisées dans un double objectif.

Tout d'abord, vérifier que les hypothèses de simulation STICS pour les rotations de cultures et cultures intermédiaires engendrent des durées de couverture de sol et une répartition spatiale de ces durées de couverture du sol qui sont similaires à ce qui est observé par télédétection.

A noter, un scénario de simulation « extension » des cultures intermédiaires a aussi été réalisé dans le cadre de l'Expertise nationale « Stocker du carbone dans les sols Français ». Les règles d'implantation des cultures intermédiaires permettaient notamment de semer des cultures intermédiaires entre 2 cultures d'été. Toutefois les résultats de ce scénario de simulation ne sont pas ceux que nous avons choisis de comparer aux résultats obtenus avec l'outil SOCCROP mais il est fort probable que la réalité terrain se situe quelque part entre les deux scénarii de simulation STICS, dans la mesure où les cultures intermédiaires se sont développées depuis 2010 (année de référence concernant les pratiques culturales considérées pour le scénario de simulation de référence avec STICS).

Le second objectif était de comparer les flux nets annuels de CO₂ simulés par STICS avec ceux de la méthode SOCCROP pour analyser si la relation entre durée de couverture du sol par de la végétation active et flux net annuel de CO₂ utilisée dans la méthode SOCCROP était réaliste et suffisamment précise.

Pour réaliser ces comparaisons, les résultats de l'approche SOCCROP ont été agrégés sur les unités de simulation STICS et comparés uniquement pour les systèmes de cultures majoritaires simulés par STICS sur ces unités de simulations. Pour définir les rotations de cultures correspondant aux résultats de la méthode SOCCROP, nous avons utilisé les données du RPG de deux années consécutives.

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

Résultats obtenus sur la France avec la méthode SOCCROP

COMPARAISON DES RÉSULTATS SUR FRANCE ENTIÈRE POUR 2 ANNÉES CULTURALES

Tout d'abord, les résultats obtenus pour l'année culturale 2019 sont présentés. En sortie de la chaîne de calcul IOTA2, on obtient une cartographie du NDAV à l'échelle de la France, sous le format d'un raster, c'est-à-dire une matrice qui contient une information (ou plus) par pixel (Figure 9). Ici, chaque pixel contient le nombre de jours où la végétation a été active pendant l'année culturale 2019. En appliquant la relation de l'équation 1 on obtient ensuite une cartographie du flux net annuel de CO₂ ainsi que son incertitude (Figure 10). Dans la mesure où il existe une relation linéaire entre durée de couverture du sol et flux net de CO₂, les analyses portant sur la variabilité spatiale des indicateurs NDAV et CO₂ seront faites uniquement sur la carte des variabilités spatiales de flux net de CO₂ (voir ci-dessous)

La cartographie du flux net de CO₂ de 2019 présente des hétérogénéités spatiales : Le Nord-Ouest et plus particulièrement la Bretagne semblent fixer plus de CO₂ avec des teintes qui tirent vers le vert bleu alors que la zone au Sud de la région parisienne, la partie est de l'Alsace et la région toulousaine semblent avoir des flux nets de CO₂ proches de l'équilibre qui tendent vers le positif (émission de CO₂). C'est une cartographie du flux net de CO₂ donc les zones qui sont neutres ont sûrement un bilan de carbone positif (déstockage) en considérant la biomasse exportée à la récolte (sachant que les amendements organiques appliqués sur la parcelle ne permettent généralement pas d'inverser cette tendance quand on prend en compte les 2 premiers termes du bilan C selon Ceschia et al. 2010). Pour les zones vertes, si l'export de C à la récolte est plus faible que le flux net de CO₂, alors la parcelle stockera du C.

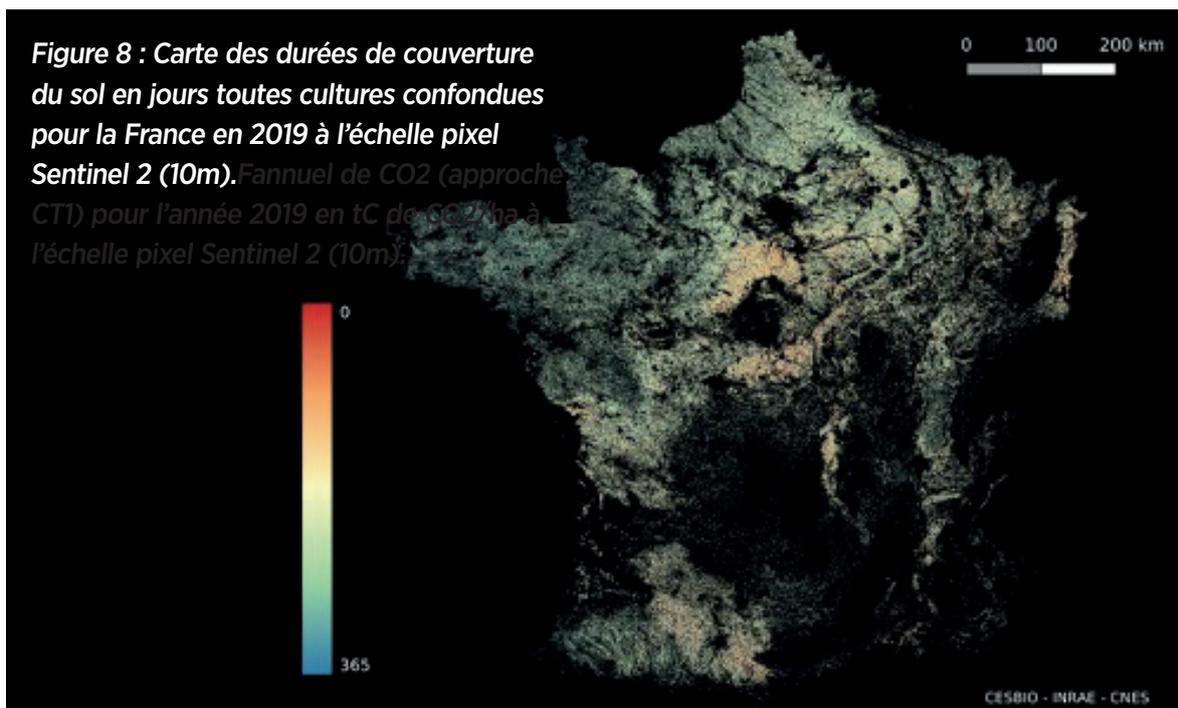
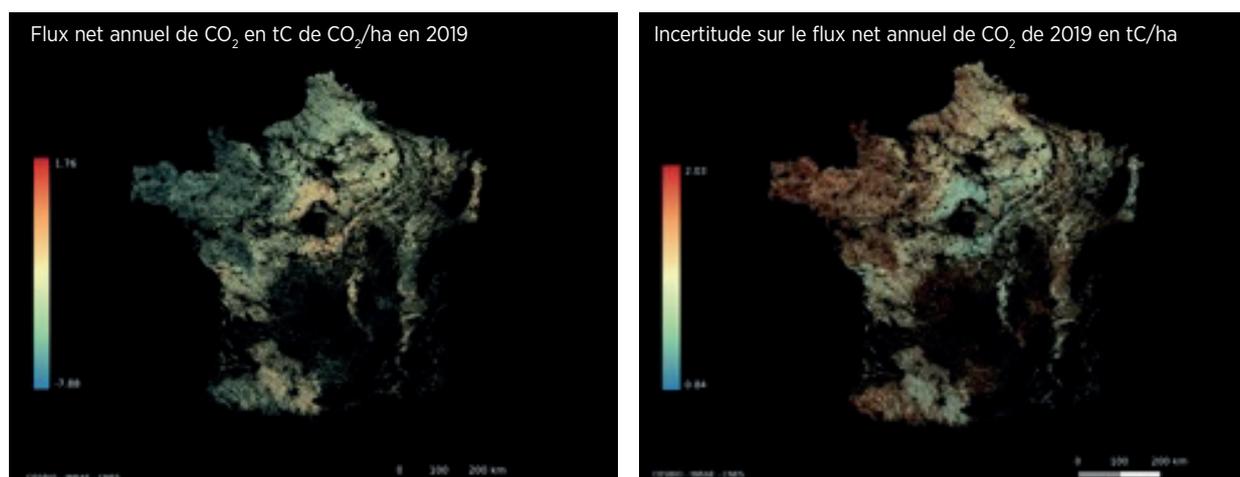


Figure 9



Cartographie sur la métropole du flux net annuel de CO₂ (approche CTI) pour l'année 2019 en tC de CO₂/ha à l'échelle pixel Sentinel 2 (10m).

Cartographie de l'incertitude du flux net annuel de CO₂ pour l'année 2019 en tC de CO₂/ha à l'échelle pixel Sentinel 2 (10m).

En utilisant la formule analytique permettant de calculer l'incertitude sur le flux, on peut aussi cartographier l'incertitude à l'échelle nationale (Figure 10 à droite). En analysant cette carte, on s'aperçoit que les zones de plus grandes incertitudes sont les zones qui fixent le plus de CO₂, ce qui est finalement cohérent avec notre formule analytique de l'équation d'incertitude car celle-ci croît avec la durée de couverture du sol. L'intervalle d'incertitude étant assez conséquent, les zones qui possèdent un flux net proche de l'équilibre peuvent facilement basculer vers un flux positif et devenir émettrices de CO₂ (ex. région parisienne). Même dans un scénario pessimiste (en comptabilisant l'incertitude maximale sur les flux en plus de la valeur de flux estimée) certaines zones comme la Bretagne, les Landes et les Pyrénées atlantiques fixeraient du CO₂.

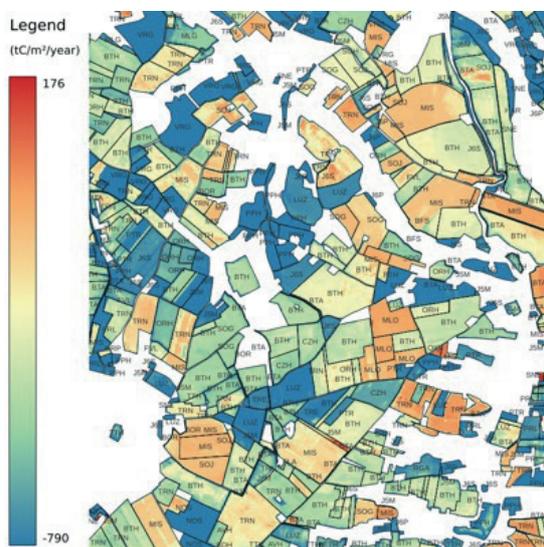
Concernant la comparaison des années 2019 et 2020, nous nous limiterons ici à la comparaison des deux années sur une zone restreinte car l'indisponibilité temporaire des serveurs de calculs du CNES ne nous permet pas d'afficher la carte de 2020 sur l'ensemble du territoire métropolitain à la date de rédaction de ce rapport (même si elle a déjà été produite). Malheureusement, cette carte ne peut être produite sur un ordinateur standard car une telle carte représente plus de 15 milliards de pixels.

La comparaison des cartographies de flux nets de CO₂ pour 2019 et 2020 sur un territoire restreint (Figure 10) **nous indique que d'une année à l'autre, pour une culture produite deux années consécutives sur la même parcelle** (ex. du maïs sur la parcelle entourée en rouge et de la luzerne sur la parcelle entourée en orange) **les flux estimés sont très comparables**. En revanche, pour des parcelles dont la culture a changé, la fixation de CO₂ peut de manière très significative. Dans le cas de la parcelle entourée en vert, qui est passée d'un blé tendre d'hiver à un maïs, la durée de couverture a considérablement réduit, et de ce fait la parcelle est passée d'un puits en 2019 à une source en 2020. Il en est de même pour la parcelle entourée en bleu qui est passée d'un blé tendre d'hiver à un tournesol (connu pour avoir un cycle de développement très court par rapport au blé).

Figure 10 - échelle pixel Sentinel 2 (10m)

Les trois lettres indiquées pour chaque culture correspondent aux codes de cultures du RPG : MIS pour maïs grain, BTH pour blé tendre d'hiver, CZH pour colza d'hiver, SOG pour sorgho, PPH pour prairie permanente, LUZ pour luzerne, SOJ pour soja, MLO pour mélange d'oléagineux, TRN pour tournesol... voir <https://files.geo.data.gouv.fr/link-proxy/www.geonormandie.fr/2020-01-24/5e2a6b991a98421bf73d869c/dc-dl-rpg-2-0.pdf>

<https://files.geo.data.gouv.fr/link-proxy/www.geonormandie.fr/2020-01-24/5e2a6b991a98421bf73d869c/dc-dl-rpg-2-0.pdf>



Cartographie du flux net annuel de CO₂ pour l'année 2019 en tC de CO₂/ha



Cartographie du flux net annuel de CO₂ pour l'année 2020

Cette approche comparative entre deux années permet donc de mettre en évidence 1) l'impact des successions de cultures sur les flux nets de CO₂ mais aussi, le cas échéant, 2) l'impact de la variabilité climatique, si deux années climatiques très contrastées se sont succédé. Aussi, un des objectifs principaux de cette étude étant de comprendre les causes des hétérogénéités spatiales du NDAV et des flux de CO₂, nous avons pris en compte les principaux facteurs influençant ces deux variables : choix du type de culture, présence de cultures intermédiaires, date de récolte dans le cas des maïs grain et ensilage. Pour ce faire, nous comparerons dans la section suivante les résultats pour les principales grandes cultures : le blé, le maïs, le colza et le tournesol. Les données concernant les cycles de cultures (les histogrammes) sont gardées en jours de végétation active (NDAV) et non en flux de CO₂ pour faciliter l'analyse et la comparaison des résultats avec les durées de cycles de végétations des cultures qui sont connus (ex un maïs classique a un cycle d'environ 150 jours).

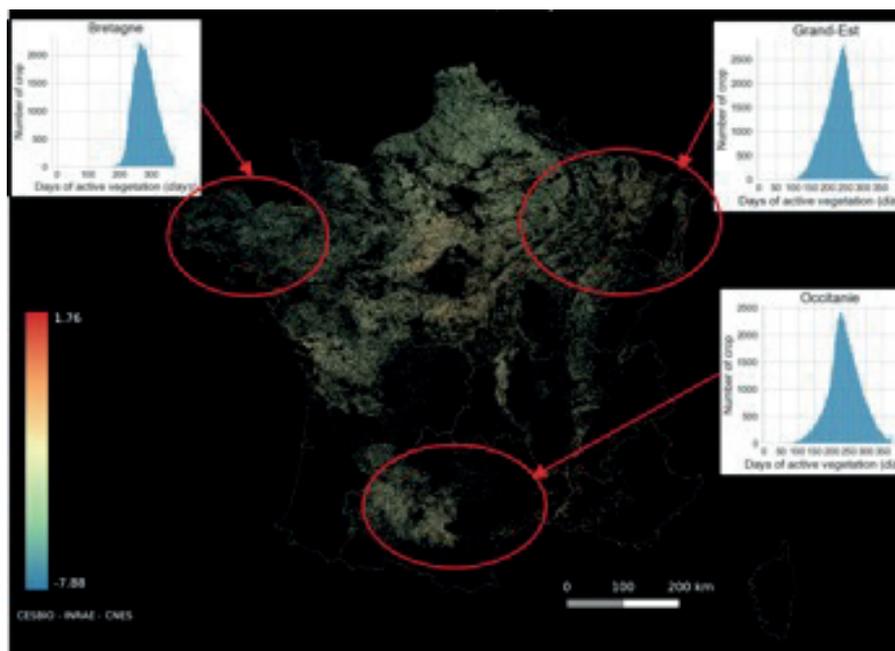
ANALYSE PAR CULTURES

Dans un premier temps, nous distinguons les types de cultures à l'échelle de la France, en gardant l'information au pixel, afin de détecter une potentielle tendance par zone géographique et leurs climats respectifs. On s'attend à des durées de couverture plus longues dans les zones climatiques plus froides où la croissance de la végétation est plus lente pour une même culture. De même, **on s'attend à voir une différence entre les cultures d'hiver comme le blé et le colza qui ont des cycles de végétation plus longs que les cultures d'été comme le maïs ou le tournesol.** Si cette tendance n'est pas respectée, elle pourra peut-être être expliquée par des effets pratiques agricoles (ex. présence ou non de cultures intermédiaires).

• Le blé

Le blé (Figure 11) **présente des similitudes avec la cartographie nationale toute culture confondue** dans la mesure où on retrouve les mêmes patterns spatiaux avec des zones orangées au sud de la région parisienne qui se rapprochent de flux positifs donc émettent du CO₂ (et déstockent forcément du C) alors que la majorité de la carte tend vers le vert, ce qui semble cohérent car le blé est une culture d'hiver qui possède un cycle de végétation long permettant de fixer annuellement du CO₂. **Les zones vertes qui tirent vers le jaune impliquent un flux de CO₂ négatif voir légèrement neutre, en fonction des pratiques de l'agriculteurs (récolte, amendement organique), ce seront soit des bilans de carbone légèrement neutres, voir positifs si l'apport d'amendement organique n'équilibre pas l'export de la biomasse à la récolte.** Les histogrammes représentant la distribution des NDAV par région permettent d'observer le niveau d'hétérogénéité dans les durées de couvertures à l'échelle de la région. Elles reflètent en partie des effets climatiques mais aussi des effets pratiques. Ainsi en Bretagne, on s'aperçoit que le NDAV des parcelles de blé est assez homogène au sein de la région avec une distribution peu étalée (entre 200 et 350 jours) centrée autour de 280 jours de végétation active. Cela révèle une similarité dans les pratiques, qui consistent à couvrir le sol le plus longtemps possible, sûrement avec des cultures intermédiaires estivales après la récolte. L'Occitanie et le Grand-Est présentent plus de disparité dans les NDAV avec des distributions plus étalées, centrées sur des durées de couverture du sol plus courtes, autour de 240 jours de végétation active. **Dans la région du Sud-Ouest, il est très rare que les cultures de blé soient suivies de cultures intermédiaires et donc les plus faibles durées moyennes de couverture des sols peuvent très certainement s'expliquer par un climat plus chaud qu'en Bretagne.**

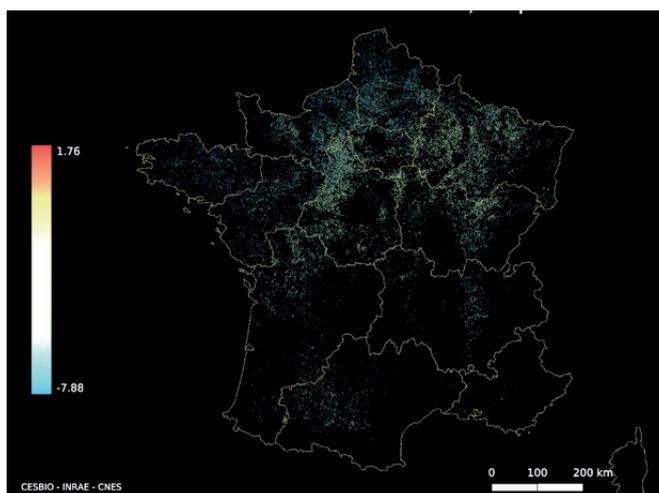
Figure 11 : Cartographie du flux net annuel de CO₂ en tC de CO₂/ha pour le blé sur l'année 2019 - Échelle pixel Sentinel 2 (10m). Les histogrammes représentent la distribution des durées de couverture du sol pour différentes régions.



• Le colza

Le **colza** (Figure 12), culture moins représentée en France que le blé, est aussi une culture d'hiver mais **semble fixer plus de CO₂ que le blé**, en présentant des teintes vertes bleues qui correspondent à des flux de CO₂ bien négatifs. Cette différence par rapport au blé est cohérente **car les dates de semis du colza sont plus précoces que celles du blé alors que les deux cultures sont récoltées à peu près en même temps** ; le cycle de végétation du colza est donc plus long et permet de fixer plus de CO₂. En revanche, on n'observe pas vraiment de gradient climatique marqué et la variabilité spatiale semble faible en comparaison avec le blé.

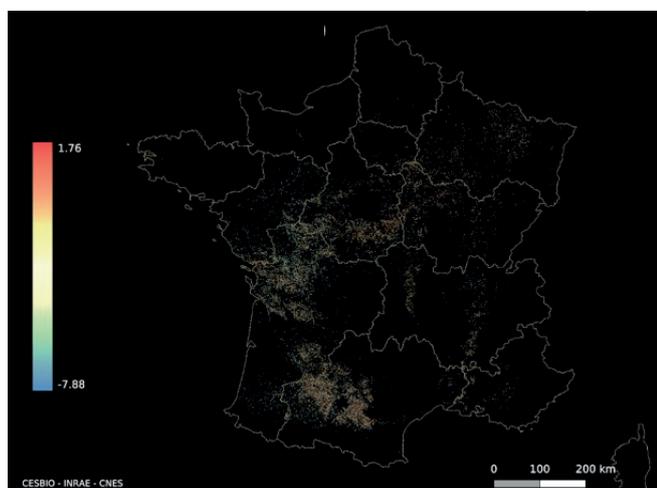
Figure 12 : Cartographie du flux net annuel de CO₂ en tC de CO₂/ha pour le colza sur l'année 2019 - Échelle pixel Sentinel 2 (10m).



• Le tournesol

Le **tournesol** est une culture d'été moins abondante en France en comparaison aux deux précédentes et il **a un cycle de développement bien plus court que les cultures d'hiver** (Béziat et al 2009). On retrouve cette différence sur la figure 13 avec **la majorité des zones dans l'orange, qui correspondent à des flux de CO₂ positifs (émissions nettes)**. Le bilan carbone est donc presque assurément positif (déstockage de C) si l'on prend en compte que du carbone est exporté à la récolte et que les amendements organiques ne pourraient inverser cette tendance. On observe cependant des hétérogénéités notamment en Haute Garonne avec de forts contrastes entre des points bleus et d'autres orange/rouge. Les effets climatiques ne peuvent pas expliquer ces disparités. Il est donc très probable que sur les pixels bleus, des cultures intermédiaires aient été semées à l'automne précédent le semi des tournesols.

Figure 13 : Cartographie du flux net annuel de CO₂ en tC de CO₂/ha pour le tournesol sur l'année 2019 - Échelle pixel Sentinel 2 (10m).



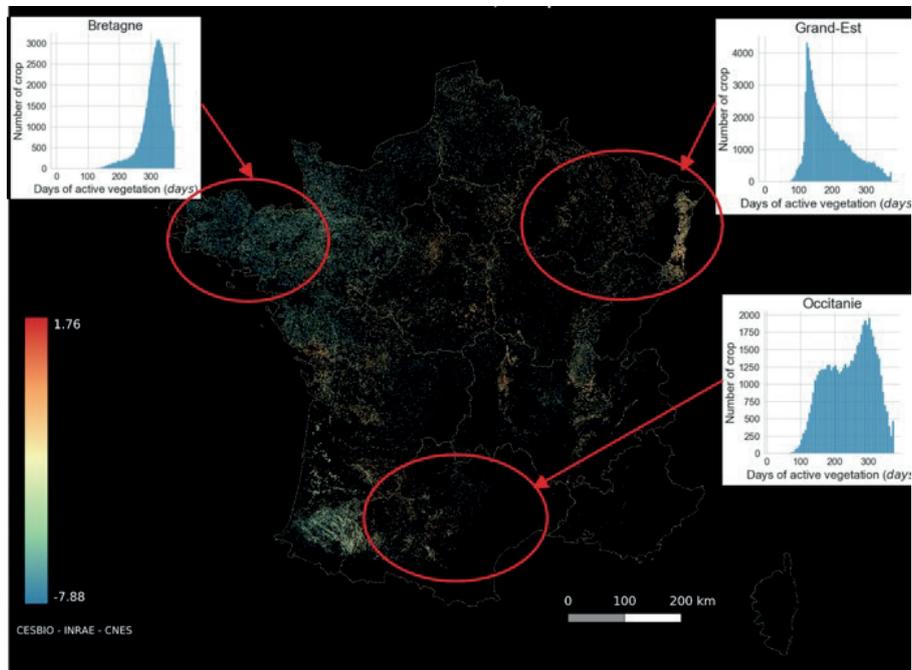
- Le maïs

La carte des flux nets annuels de CO₂ pour le maïs (Figure 14) révèle une forte variabilité spatiale à l'échelle nationale. Premièrement, on observe que la Bretagne est très bleue, et donc fixe beaucoup de CO₂, et même plus que les cultures d'hiver (blé et colza). En tant que culture d'été, le maïs a un cycle de végétation plus court que les cultures d'hiver. Il est donc étonnant d'observer dans cette région une fixation de CO₂ (et un NDAV) plus importante pour le maïs que pour le blé et le colza. L'histogramme du NDAV de la Bretagne montre une distribution homogène du NDAV peu étalée, centrée sur une durée de couverture du sol (autour de 320 jours de végétation active) plus longue que la durée d'un cycle de maïs classique (environ 150 jours).

Cette longue durée de couverture du sol est liée à une présence systématique de culture intermédiaire dans cette région où les problématiques nitrates ont imposé leur introduction dans les rotations de cultures.

Dans la région du Grand-Est, l'histogramme montre une forte disparité entre les pratiques au sein même de la région avec une distribution très étalée (entre 100 et 350 jours) et une majorité de parcelles couvertes pendant une courte période de 150 jours, ce qui correspond à un simple cycle de maïs sans culture intermédiaire.

Figure 14 : Cartographie du flux net annuel de CO₂ en tC de CO₂/ha pour le maïs sur l'année 2019 - Échelle pixel Sentinel 2 (10m). Les histogrammes représentent la distribution des durées de couverture du sol pour différentes régions.



L'histogramme de l'Occitanie est intéressant car il indique deux modes de cultures via un mix de deux gaussiennes : une distribution centrée autour de 150 jours qui serait des parcelles de cultures principales de maïs seule, et une autre distribution centrée autour de 300 jours qui correspond très certainement à des parcelles de maïs précédées d'une culture intermédiaire.

Les simulations réalisées avec STICS peuvent couvrir plus de 365 jours (par exemple quand une culture intermédiaire est semée avant une culture d'été) et la date de démarrage des simulations est déterminée par les dates de semis classiques pour chaque région donnée.

En revanche, les durées de couvertures du sol observées par satellites sont calculées sur une année culturale fixe (1er octobre au 30 septembre) dans un souci d'automatisation. Nous avons donc recalibré les durées de couverture du sol STICS en décomptant les jours de simulations qui débordaient de l'année culturale fixe.

La carte des durées de couvertures du sol observées sur France entière par télédétection a été combinée au RPG de 2019 afin de comparer les durées de couvertures obtenues par télédétection avec celle des simulations STICS par culture entre les années 2010 et 2013. Notons 1) que le RPG ne contient pas d'information sur la présence ou non de culture intermédiaire et que 2) les unités de simulation STICS peuvent contenir des cultures intermédiaires ou non pour une culture principale donnée, selon que l'on se situe en zone sensible nitrate, en zone dérogatoire argile... Ainsi, pour une culture principale donnée, nous avons donc comparé sur la Figure 16 la distribution des durées de couverture du sol estimées par télédétection avec celles d'un ensemble de simulations STICS pour cette culture principale avec ou sans cultures intermédiaires.

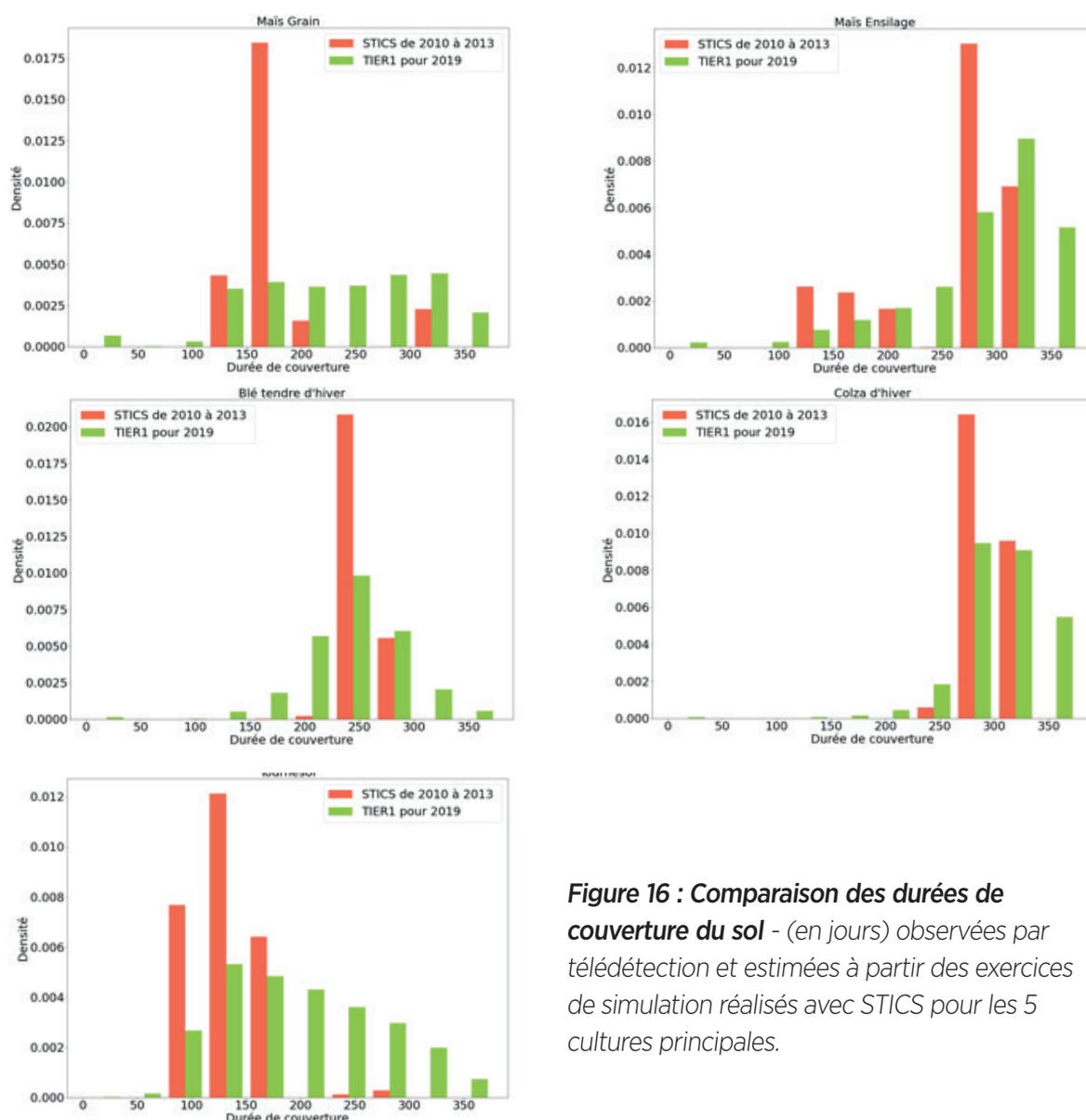


Figure 16 : Comparaison des durées de couverture du sol - (en jours) observées par télédétection et estimées à partir des exercices de simulation réalisés avec STICS pour les 5 cultures principales.

Pour une année de simulation donnée, les simulations STICS comportent un à deux scénarios de rotations de cultures par une unité pédoclimatique tandis que les observations satellites intègrent toute la variabilité des durées de couverture du sol des parcelles françaises. Cela explique pourquoi sur la Figure 16, les distributions de durées de couverture du sol sont plus étalées pour les estimations par satellite que pour les simulations STICS. On note aussi que pour les cultures d'hiver (blé, colza) les distributions sont assez similaires entre les deux approches même si les simulations semblent sous-estimer en moyenne les durées de couverture du sol. En effet, aucune simulation n'atteint les 350 jours alors qu'il est fréquent d'observer de telles durées de couverture du sol par satellite, en particulier pour le colza. Une explication possible à cette différence est que les repousses post-récolte (en particulier de colza) sont assez fréquentes et que ce phénomène n'est pas pris en compte via les simulations mais perçu par satellite.

Pour les tournesols et les maïs, on observe clairement une majorité de simulations entre 100 et 150 jours pour l'un et 125 et 200 jours pour l'autre, mais très peu de simulations autour de 20-300 jours de couverture du sol. La télédétection, en revanche, semble indiquer une distribution plus étalée et des durées de couverture plus longues en moyenne, même si la durée de couverture la plus fréquemment observée coïncide avec celle simulée pour le tournesol. Cette différence de distribution pourrait s'expliquer par une adoption plus fréquente en 2019 de cultures intermédiaires avant les tournesols et maïs grains, que ce qui avait été considéré à partir des enquêtes culturelles de 2010 pour réaliser les simulations avec STICS.

Concernant le maïs ensilage qui est très présent en Bretagne notamment (voir Figure 14), mais plus généralement en zone d'élevage, et donc souvent sur des territoires en zone sensible nitrate qui imposent la présence de cultures intermédiaires, les distributions de durées simulées (prenant donc en compte la présence de cultures intermédiaires) et observées par satellite sont assez similaires mais en moyenne un peu sous-estimées par les simulations.

Au-delà des différences d'approches méthodologiques et des incertitudes relatives aux deux approches, on peut donc supposer à partir de ces comparaisons que soit les hypothèses d'adoption des cultures intermédiaires ont été sous-estimées à partir des enquêtes de pratiques culturelles de 2010 pour les simulations STICS, soit que l'adoption des cultures intermédiaires s'est répandue entre 2010 et 2019. Pour conclure, il serait nécessaire de refaire des simulations avec STICS en se basant sur les enquêtes de pratiques culturelles les plus récentes et de les comparer à nouveau avec l'approche satellitaire.

COMPARAISON DES FLUX NETS ANNUELS DE CO₂

Tout comme pour les durées de couverture du sol, les simulations de flux de CO₂ réalisées avec STICS sont calculées sur chaque unité de simulation en tenant compte du climat, du sol, des espèces cultivées (y compris de la présence ou non de cultures intermédiaires) et des pratiques agricoles (date de semis, labours, fertilisation ...). Ces informations sont extraites de la base de données et d'enquêtes sur les pratiques culturelles datant de 2010 (AGRESTE, 2011).

Rappelons ici, que les estimations faites via l'approche satellite (appelée CT1 ou TIER 1) se basent sur une année culturale fixe de 365 jours alors que pour STICS, le calcul du flux net annuel de CO₂ est fait initialement pour chaque année et unité pédoclimatique considérée en sommant le flux de CO₂ de la culture principale avec celui du couvert intermédiaire quand il y en avait un. La période de simulation ne correspond donc pas exactement avec celle basée sur l'approche satellitaire.

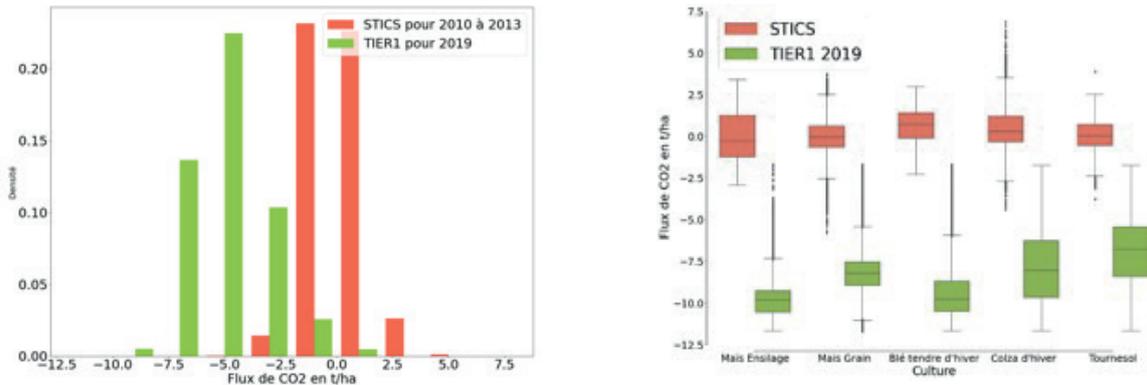


Figure 17 : Comparaison des flux nets annuels de CO₂ estimés avec la méthode TIER 1 (par satellite) vs ceux estimés avec STICS pour les 5 cultures principales confondues.

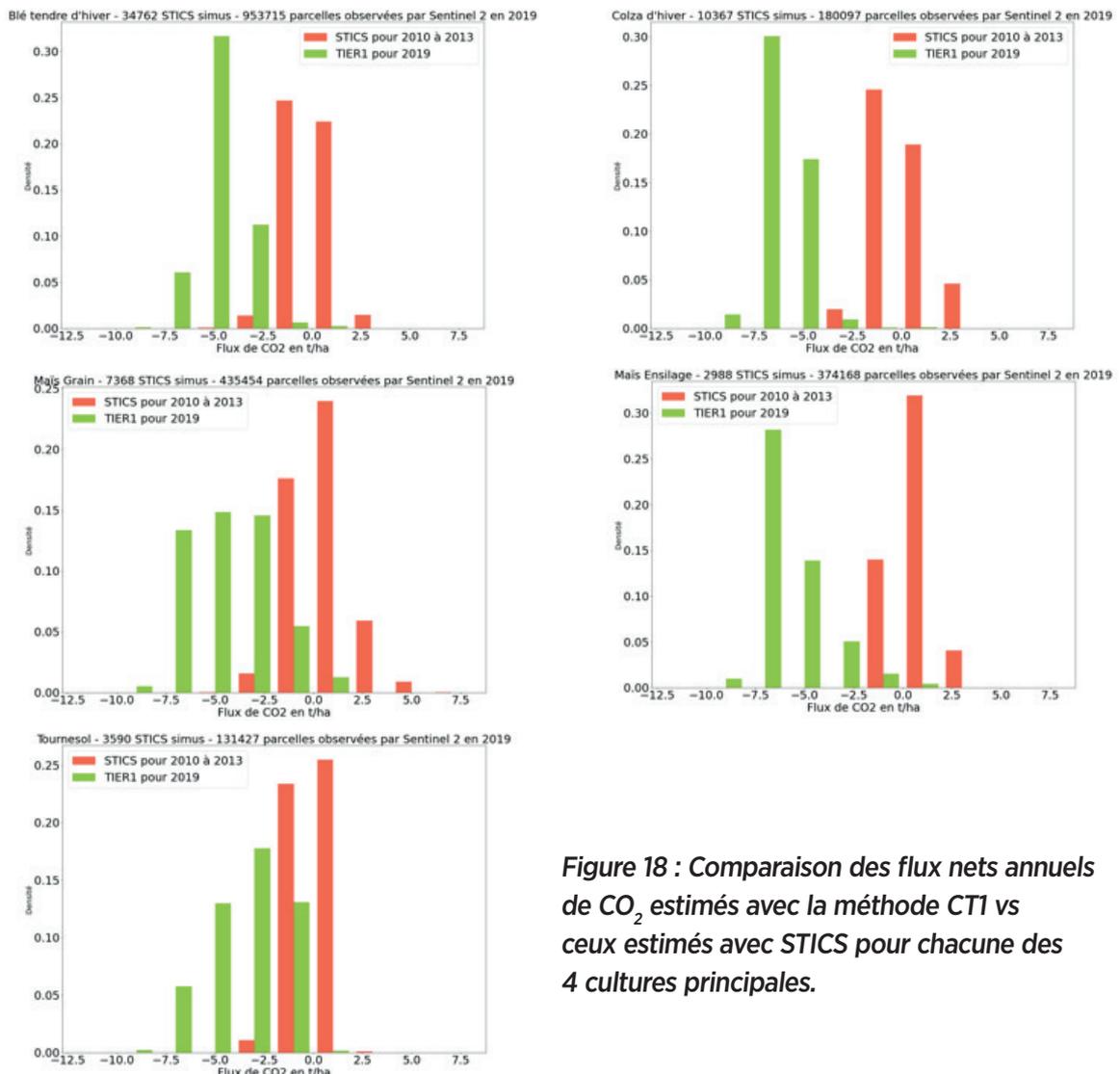


Figure 18 : Comparaison des flux nets annuels de CO₂ estimés avec la méthode CT1 vs ceux estimés avec STICS pour chacune des 4 cultures principales.

On observe toutefois sur les Figures 17 et 18, **en cohérence avec les comparaisons de durées de couverture du sol, que les flux de CO₂ simulés par STICS sont en moyenne plus élevés (proches de zéro ou légèrement positifs), là où l'approche par satellite indique globalement des flux plus faibles (généralement négatifs)**. Cela est cohérent avec l'hypothèse de l'approche CT1 qui est que plus la durée de couverture du sol est grande et plus la fixation de CO₂ est importante. **Comme les durées de couverture du sol simulées avec STICS pour les années 2010-2013 sont globalement plus faibles que ce qui a été observé par satellite en 2019, la fixation de CO₂ simulée avec STICS est globalement plus faible, voire les flux annuels sont positifs** (émission nette annuelle de CO₂).

Ne pouvant conclure à ce stade sur les causes des différences d'estimation de durée de couverture du sol (comme mentionné ci-dessus) **et l'impact que cela peut avoir sur les flux nets annuels de CO₂, il serait nécessaire de refaire des simulations avec STICS en utilisant les résultats des enquêtes sur les pratiques culturales les plus récentes et de les comparer avec l'approche CT1 pour la même période. Si l'hypothèse d'une sous-estimation de l'adoption des cultures intermédiaires était confirmée, cela pourrait indiquer que les estimations de fixation de CO₂ et donc de stockage de carbone dans les sols de grandes cultures réalisées avec le scénario de référence pour l'étude « Stocker du carbone dans les sols français » ont été sous-estimées.**

Résultats sur les zones d'études hors France

Pour cette analyse, nous avons utilisé les données Sentinel 2 de l'ESA et appliqué la chaîne de traitement MAJA pour corriger les images des effets atmosphériques et détecter les nuages ainsi que leurs ombres afin de filtrer les images. Après avoir calculé les durées de couverture du sol sur la base des dynamiques de NDVI et pris en compte l'effet des variables climatiques (évolution de la méthode CT1 décrite p8), la cartographie de l'occupation du sol ESA CCI a été utilisée comme masque (zones noires sur les cartes ci-dessous) pour ne laisser visibles que les zones de grandes cultures car nous ne disposons pas du RPG pour ces territoires. Toutefois la carte ESA CCI ne détaille pas le type de cultures ce qui ne permet pas d'effectuer des analyses de durée de couverture du sol par culture, comme sur la France. Aussi, sa résolution spatiale est de 300 ce qui peut éliminer en bordure des zones cultivées certaines parcelles qui sont réellement cultivées, ou au contraire laisser apparentes des zones couvertes par d'autres occupations du sol (forêts, zones urbaines...), et les pixels de la carte peuvent contenir des éléments autres que des parcelles de cultures (ex. arbres isolé, routes, bâtiments...). Enfin il sera intéressant de comparer à terme l'approche CT1 classique avec son évolution qui prend en compte l'effet des variables climatiques.

EN EUROPE

Pour les mêmes raisons qu'évoquées précédemment concernant la carte des durées de couverture du sol sur la France en 2020 (indisponibilité temporaire des ressources informatiques du CNES), il n'a pas été possible de produire à ce jour une carte sur l'ensemble de l'Europe de l'Ouest d'un seul tenant. Aussi, nous présenterons des zones d'intérêt situées sur la Belgique-Pays Bas et sur l'Espagne-Portugal.

La Figure 19 permet de visualiser la carte des flux nets annuels de CO₂ sur l'ensemble de la Belgique et des Pays Bas ainsi que sur une zone plus restreinte. **La carte globale permet de distinguer des zones géométriques très marquées** (certaines zones vertes jouxtant des zones orange). Ces différences de teintes **n'ont probablement rien à voir avec les patterns réels de durées de couverture de sol.**

Elles sont probablement liées à des filtrages d'images entières Sentinel 2 à des dates pour lesquelles 60% de l'image était ennuagée. Cette étape de filtrage est réalisée par la chaîne de correction atmosphérique MAJA. Cette limite à 60% est peut-être trop sélective et dans tous les cas elle fait perdre une grande quantité d'informations qui dégrade sur cette zone la qualité de l'indicateur. Concrètement, **les zones orangées correspondent probablement à des zones sur lesquelles, par manque de données,** la durée de couverture du sol a été sous-estimée. Il serait intéressant de refaire l'analyse en augmentant le seuil à partir duquel les tuiles Sentinel 2 sont filtrées.

A fine échelle, toutefois, on observe sur la figure de droite une variabilité classique de durée de couverture du sol entre parcelles. Ne disposant pas du RPG pour la Belgique et les Pays Bas, il n'a pas été possible d'analyser plus avant les résultats par espèce cultivée comme cela a été fait pour la France.

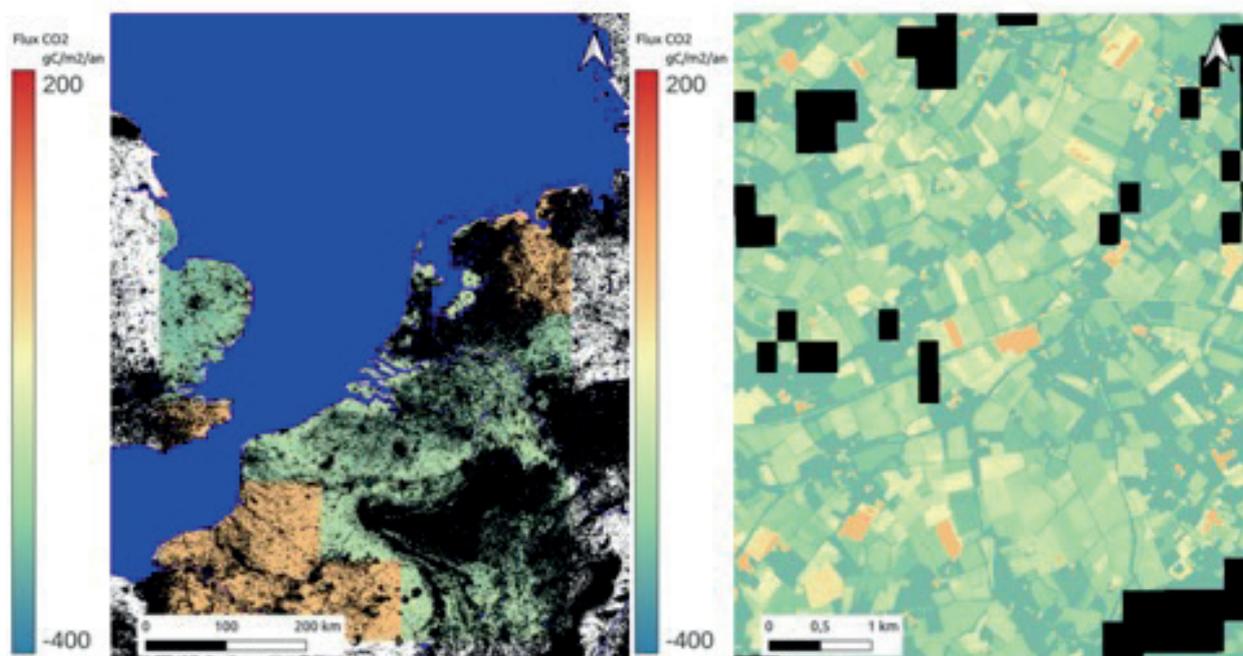


Figure 19 : Cartographie des flux nets annuels de CO₂ en Belgique et aux Pays-Bas
 En bleu, zone couverte par la mer, en noir zones non agricoles.

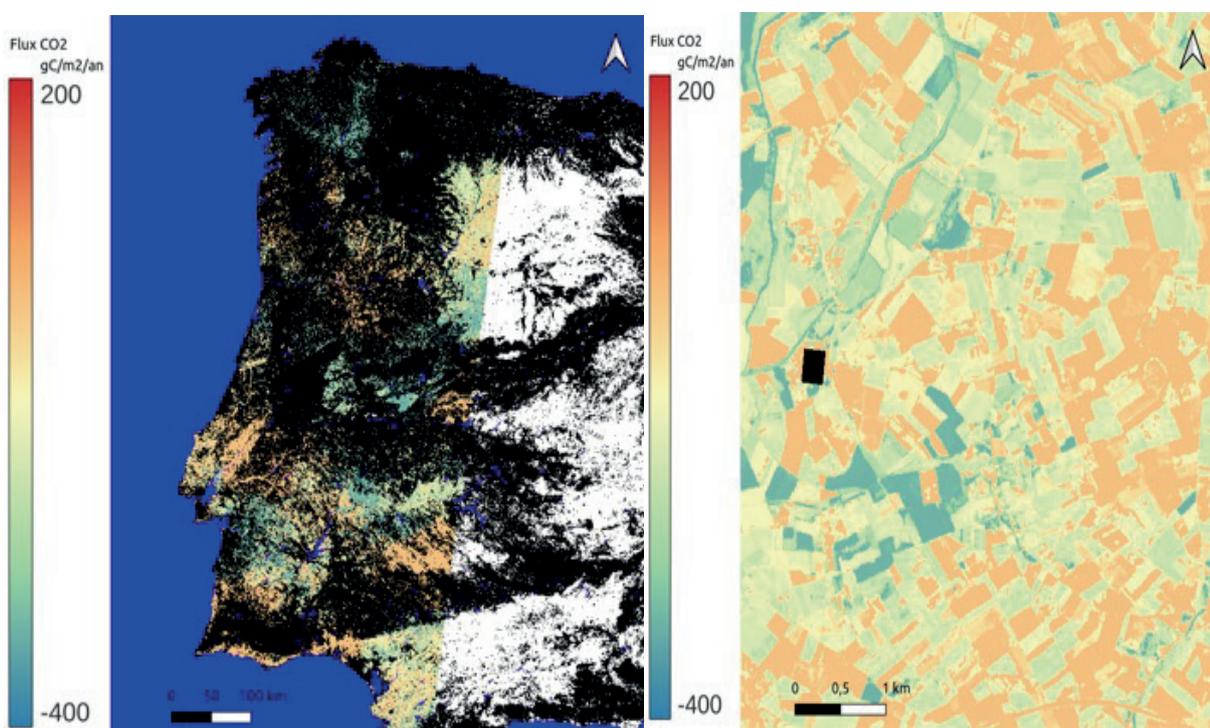


Figure 20 : Cartographie des durées de couverture du sol et des flux nets annuels de CO₂ en Espagne et au Portugal. En bleu, zone couverte par l'océan, en noir zones non agricoles.

Concernant l'Espagne (Figure 20), on observe aussi, mais dans une moindre mesure, des patterns pouvant être liés à un filtrage des données Sentinel 2. Toutefois, il semble qu'il y ait aussi une certaine adéquation entre les zones vertes (à longue durée de couverture du sol) et les zones irriguées (Figure 21).



Figure 21 : Cartographie des zones en cultures irriguées (en vert) sur l'Espagne pour la zone couverte par la Figure 20 (à gauche)

Source https://www.researchgate.net/figure/Irrigated-areas-in-Spain-The-map-is-from-the-Ministry-of-Agriculture-Fisheries-and_fig5_319655790

AILLEURS DANS LE MONDE

Sur la Figure 22, on voit très clairement sur l'Australie un gradient Nord-Sud avec des durées de couverture du sol beaucoup plus longues au Sud (en climat plus tempéré) qu'au Nord qui est soumis à des chaleurs fortes et à des sécheresses beaucoup plus marquées (voir <http://www.bom.gov.au/climate/ahead/outlooks/climatology/>), ce qui impacte négativement les flux. Ceux-ci sont donc négatifs (puits) au sud et positifs (émissions) au nord. Ici pas de problème apparent de filtrage de données liés à de l'ennuagement comme sur la zone Belgique/Pays-Bas.

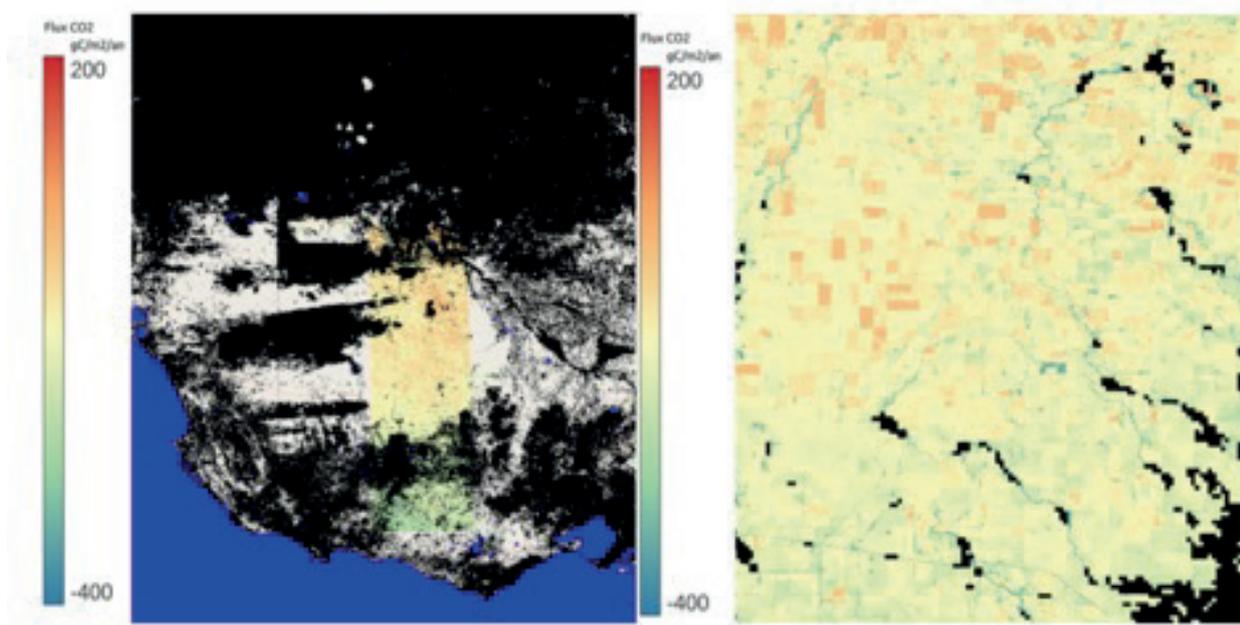


Figure 22 : Cartographie des flux nets annuels de CO₂ en Australie. En bleu, zone couverte par l'océan, en noir zones non agricoles.

On observe aussi sur le zoom, des variabilités fortes à l'échelle du paysage avec certaines parcelles se comportant comme des puits (peut être des cultures irriguées) et d'autres comme des sources.

Au Sénégal (Figure 23), on n'observe pas de vraiment de gradient Nord-Sud ou Est-Ouest mais une présence tout de même plus fréquente de parcelles en vert (fixant du CO₂) près de Dakar que dans l'intérieur des terres. Il est probable que cela soit lié à **gradient d'anthropisation** car il n'existe pas de gradient de pluies Est-Ouest dans cette zone mais plutôt un gradient Nord-Sud (Figure 24).

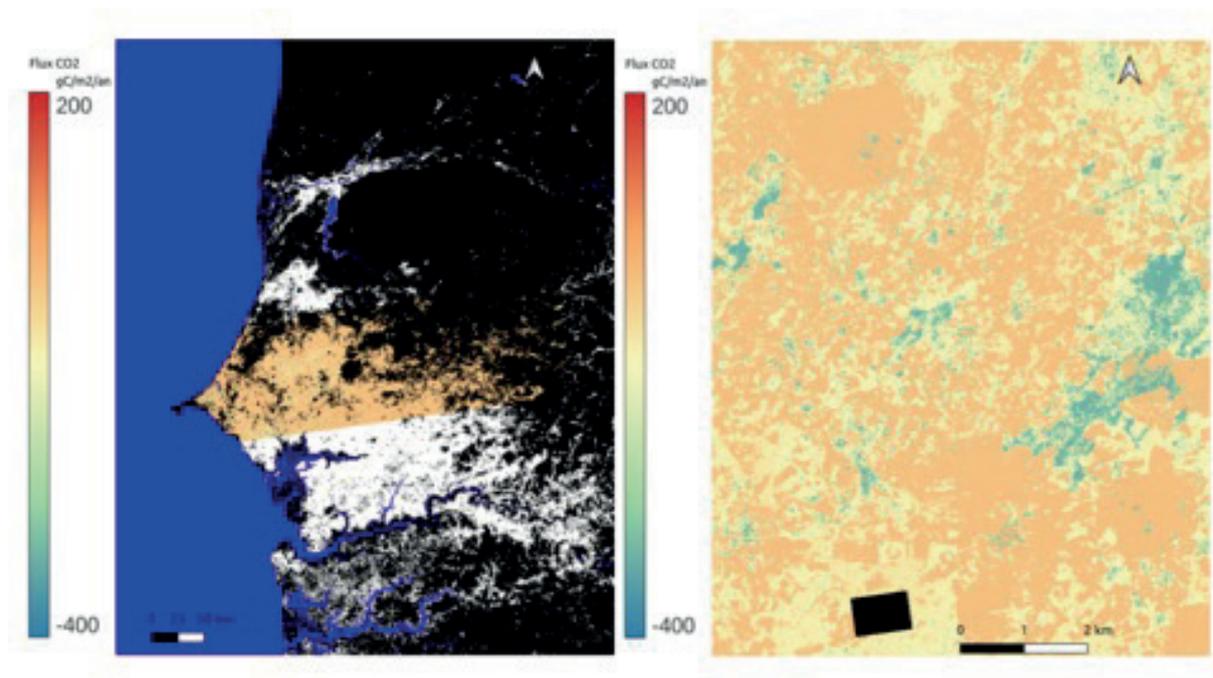


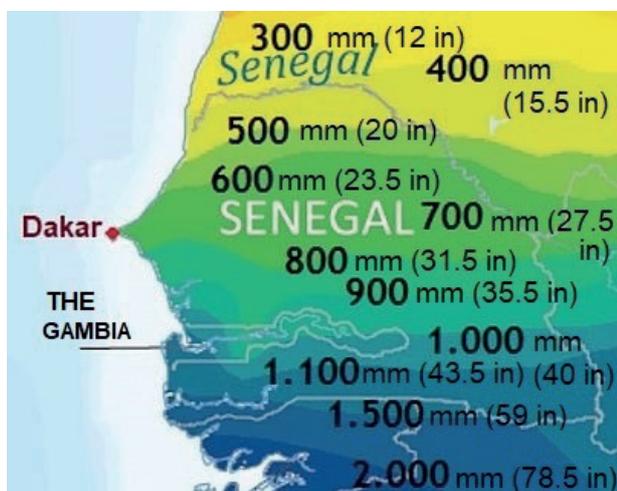
Figure 23 : Cartographie des flux nets annuels de CO₂ au Sénégal

En bleu, zone couverte par la mer, en noir zones non agricoles.

Il est intéressant de relever qu'à la différence des autres zones analysées, on n'observe pas au Sénégal de contours géométriques pour les parcelles cultivées. Ceci est lié au type d'agriculture (qui suit beaucoup plus les courbes du paysage et la nature des sols) et à la taille des parcelles qui est souvent plus petite qu'en Europe, en Australie ou aux Etats Unis.

Figure 24 : Cartographie des cumuls annuels de précipitations au Sénégal.

source : <https://www.climatestotravel.com/climate/senegal/>.



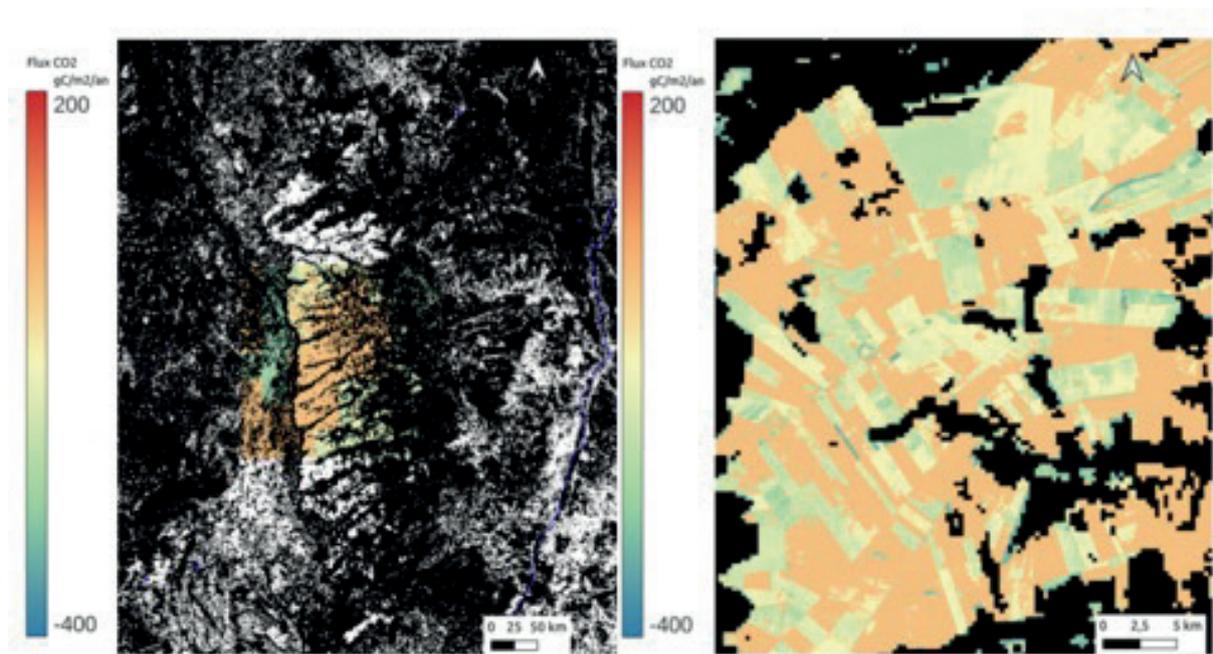


Figure 25 : Cartographie des flux nets annuels de CO₂ au Brésil.

En noir zones non agricoles.

Sur le Brésil (Figure 25), **on observe aussi de fortes variabilités spatiales** à la fois à large échelle (région) et à fine échelle (paysage). Certaines formes géométriques à large échelle semblent toutefois indiquer que **certaines tuiles Sentinel 2 ont été plus filtrées que d'autres à cause de l'hétérogénéité de la couverture nuageuse, ce qui a pu affecter la précision de l'indicateur.** En effet, dans le processus de correction et filtrage des images, si la superficie d'une tuile est couverte par plus de 60% de nuages à une date donnée, la tuile entière va être éliminée. Ainsi il est fréquent que des zones agricoles proches de forêts (au-dessus desquelles les nuages se forment préférentiellement) soient moins souvent observées que d'autres, ce qui peut entraîner des erreurs plus importantes sur le calcul du NDAV.

Concernant les Etats Unis, on observe au niveau de la Cornbelt (Figure 26) **un gradient avec des flux de CO₂ qui diminuent depuis le Sud-Ouest (fixation de CO₂) vers le lac Michigan (émissions nettes de CO₂).** Une première analyse visuelle semble indiquer que **les zones les plus orangées (émettrices) correspondent aux zones sur lesquelles du soja et du maïs sont majoritairement cultivées.** Ces deux cultures d'été ont un cycle de végétation assez court (en particulier le soja) ce qui pourrait expliquer ce gradient régional. L'utilisation des cartes de cultures produites par l'USDA permettront de confirmer cette analyse.

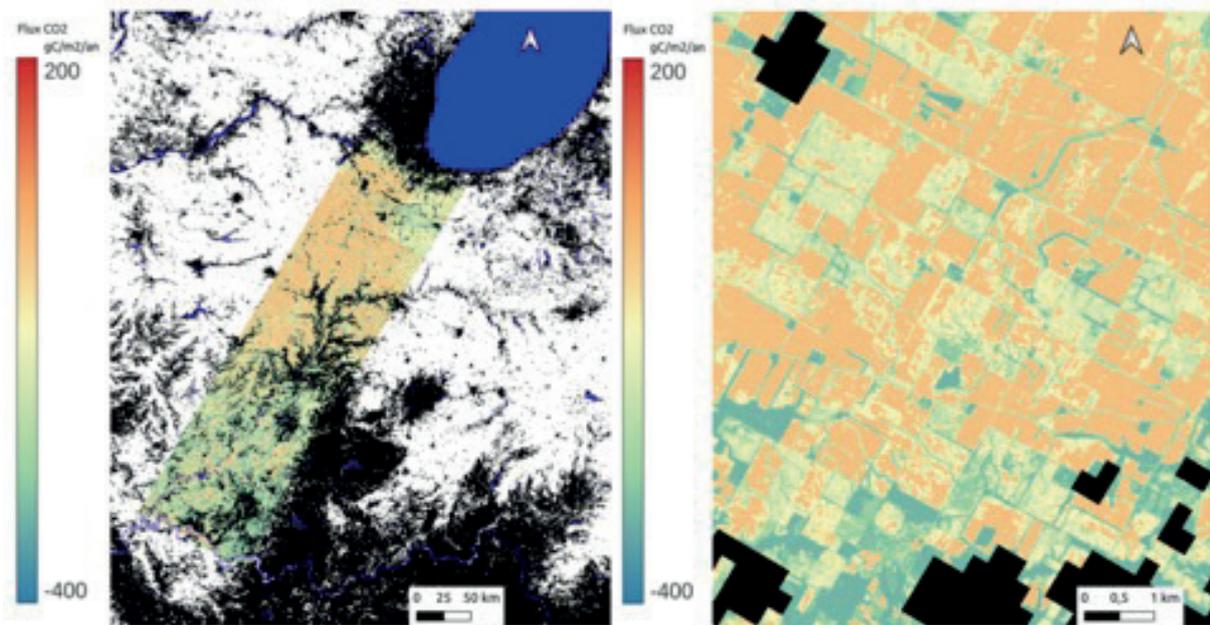


Figure 26 : Cartographie des flux nets annuels de CO₂ au Etats-Unis au niveau de la “Cornbelt”.
 En bleu, le lac Michigan, en noir zones non agricoles.s.

En Géorgie, la proportion de surface cultivées est beaucoup plus faible que dans la Cornbelt. A l’Est, **on observe une zone très verte qui contient pourtant beaucoup de cultures d’été** (on repère facilement les parcelles circulaires qui sont irriguées avec des pivots). Malgré cette forte proportion de cultures d’été, les durées de couvertures du sol semblent importantes puisque les parcelles fixent des quantités de CO₂ importantes. **Ce résultat peut s’expliquer par le fait que la Géorgie est un des Etat américains ayant par la plus forte mise en œuvre de cultures intermédiaires avant les cultures d’été**⁹.

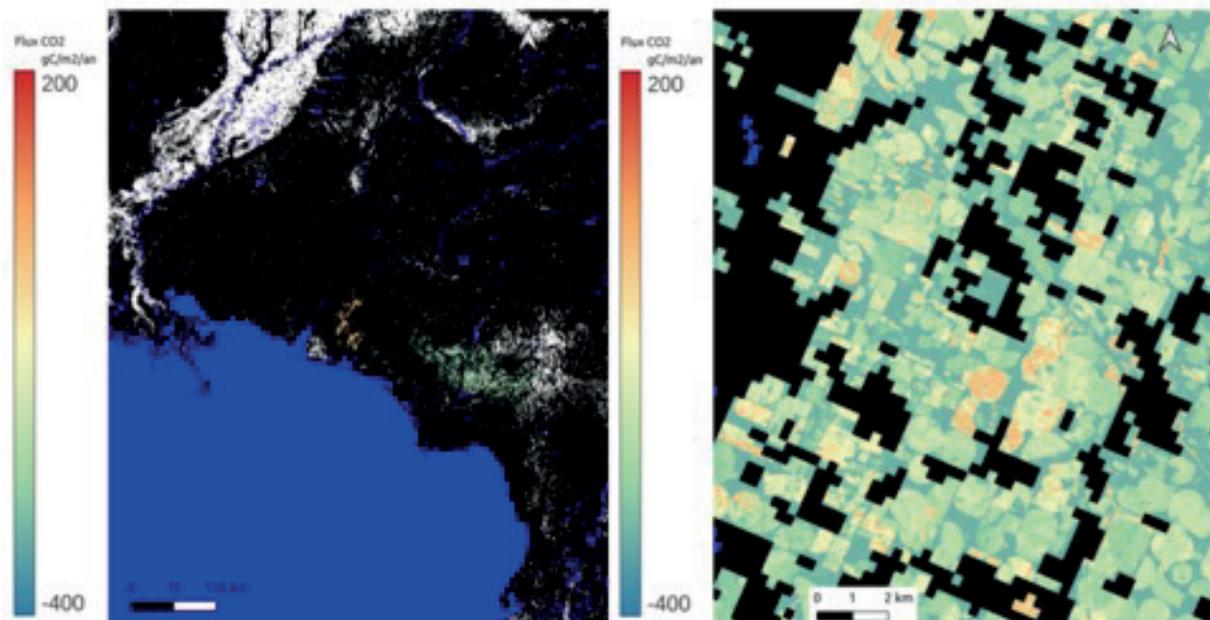


Figure 27 : Cartographie des flux nets annuels de CO₂ au Etats-Unis au niveau de la Géorgie.
 En bleu, zone couverte par l’océan, en noir zones non agricoles.

PERSPECTIVES

Perspectives d'améliorations de la méthode

UTILISATION COMBINÉE DES DONNÉES SENTINEL 2 ET SENTINEL 1

La première étape piste d'amélioration de l'approche concerne l'utilisation combinée de données satellites Sentinel 2 et Sentinel 1. Les deux satellites Sentinel 1 sont des satellites radar dont le signal passe à travers les nuages. Celui-ci, toutefois, ne fournit pas une information sur les surfaces de végétations mais plutôt en lien avec la rugosité de la surface, sa structure et son contenu en eau du sol.

Toutefois, Garioud et al. (2021) ont développé au CESBIO et à l'IGN une méthode permettant de combiner les données optiques de Sentinel 2 avec les données radar de Sentinel 1 pour produire des séries temporelles de NDVI robustes et complètes tout au long de l'année. La méthode repose sur un réseau de neurones qui entraînent les données Sentinel 1 à s'aligner avec les données optiques de Sentinel 2. Cependant, l'étude ne porte que sur une zone géographique restreinte, le processus de calcul est trop long et complexe pour l'instant pour pouvoir l'appliquer sur un pays entier.

UTILISATION DE DONNÉES CLIMATIQUES COMBINÉES AU NDVI POUR AMÉLIORER L'ESTIMATION DU FLUX NET ANNUEL DE CO₂

Pour tenter d'améliorer l'approche d'estimation empirique du flux net annuel de CO₂ (NEP) il est possible prendre en compte de manière plus mécaniste l'effet de variables météorologiques (ex. température, rayonnement) sur la NEP que ce que nous avons fait pour l'évolution de la méthode CT1 appliquée sur les zones hors France. **En effet la végétation, même verte, n'est pas photosynthétiquement active si la température est négative ou si les rayonnements sont trop faibles, ce qui va impacter le flux net de CO₂** (Veloso et al., 2014). L'impact des processus propres au sol, aussi pilotés par les variables météorologiques, contribuent significativement pendant certaine période de l'année.

Un premiers jeu d'analyse sur les données de flux acquises sur le réseau de sites flux ICOS en Europe permettent de vérifier ces hypothèses (voir un exemple sur la Figure 28).

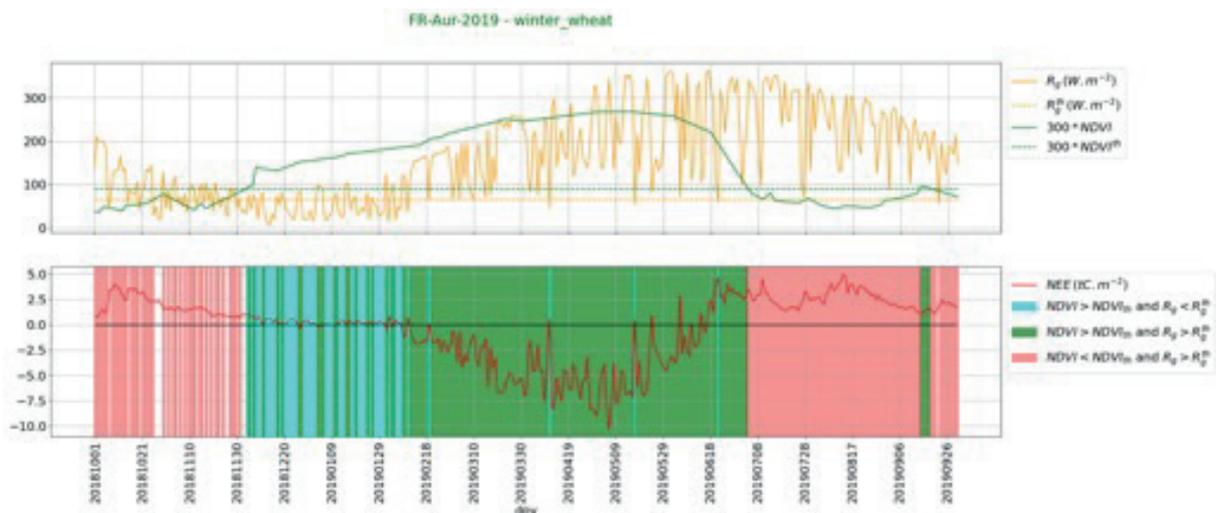


Figure 28 : Dynamique de la végétation vue par satellite (NDVI), du rayonnement global (R_g) et des flux de CO_2 (NEE) sur l'année culturale 2019 pour le site ICOS d'Auradé (FR-Aur).

Les zones colorées en vert représentent les jours pour lesquels il y a de la végétation et suffisamment de rayonnement ($R_{gth} > 65 \text{ W.m}^{-2}$) pour permettre la photosynthèse. Les zones en bleu représentent les jours pour lesquels il y a de la végétation mais pas suffisamment de rayonnement pour permettre la photosynthèse. Les zones en rouge représentent les périodes durant lesquelles le rayonnement est suffisant pour la photosynthèse mais où il n'y a pas de végétation détectée.

PRISE EN COMPTE DE L'INTENSITÉ DE DÉVELOPPEMENT DE LA VÉGÉTATION EN PLUS DE SA DURÉE DE COUVERTURE DU SOL

Afin de prendre en compte non seulement la durée de couverture du sol mais aussi l'intensité de développement de la végétation qui impacte les flux de CO_2 , (une végétation plus développée fixe plus de CO_2 par photosynthèse) l'utilisation de l'intégrale du signal NDVI au niveau du seuil de 0,3 plutôt que du nombre de jours où la végétation est active pourrait être testée.

UTILISATION DES RÉSULTATS DE LA COMPARAISON AVEC STICS POUR AMÉLIORER L'APPROCHE

La comparaison de nos résultats avec les simulations STICS laisse envisager la possibilité d'améliorer l'approche SOCCROP en combinant une approche basée sur l'exploitation de données d'observation satellites et de données issues de modèles de simulation comme STICS ou SAFYE- CO_2 . Cela aurait pour intérêt de diminuer l'incertitude des résultats obtenus de manière indépendante par chacune des deux méthodes.

Perspectives de production opérationnelle sur la France ou le monde et coût financier

Concernant la France, nous avons demandé la création d'un Centre d'Expertise Scientifique (CES) THEIA¹⁰ intitulé « Flux de CO₂ et bilan carbone en grandes cultures ». Dans le cadre de ce CES, il est envisagé de produire en ensemble de données dont les cartes haute résolution de flux de CO₂ avec la méthodologie SOCCROP ou une version améliorée prenant en compte l'effet des variables climatiques et de l'intensité de développement de la végétation. Ainsi, les cartes de durée de couverture des sols et de flux nets annuels de CO₂ pourraient être produites annuellement sur l'ensemble de la France avec le soutien du CNES (ex. moyens de calcul, stockage de données) et mise à disposition gratuitement de n'importe quel utilisateur via un processus de téléchargement.

Nous envisageons aussi à terme de développer et mettre à dispositions d'autres couches d'informations produite via la chaîne de traitement AgriCarbon-EO¹¹ pour les grandes cultures. Cette approche de modélisation basée sur une méthode d'assimilation de séries temporelles de données de télédétection optique à haute résolution (ex. Sentinel 2, Landsat 8) permettrait de produire des cartes de durées de couverture du sol sans doute plus précises, mais aussi des cartes de biomasse, de rendement, de photosynthèse, respiration de l'écosystème, de flux net de CO₂, d'eau et de bilans C. Cette méthode est toutefois beaucoup plus longue et complexe à mettre en œuvre et, de ce fait, est pour le moment limitée à quelques cultures.

Pour ce qui est de produire des cartes à l'échelle du globe, il faudra d'abord envisager l'utilisation couplée de données Sentinel 1 et 2 pour garantir une production opérationnelle y compris sur les zones à forte couverture nuageuse. Le coût de production et de stockage de ces données serait toutefois élevé. A titre d'information, nous avons estimé que pour produire l'indicateur durée de couverture des sols sur l'ensemble des tuiles Sentinel 2 hors France (soit 20 tuiles en tout ou 242 000 km²) le coût s'élève à environ 35k€. Pour couvrir l'ensemble des zones cultivées dans le monde (environ 20 millions de km² soit 100 fois plus grand), le coût de production s'élèverait donc environ à 3.5 M€, auquel il faudrait ajouter un coût de stockage et de mise à disposition des données.

Comparaison des simulations QTICS et de l'approche SOCCROP sur des années plus récentes

Comme mentionné précédemment, au-delà des différences d'approches méthodologiques et des incertitudes relatives aux deux approches on peut donc supposer à partir de ces comparaisons que soit les hypothèses d'adoption des cultures intermédiaires ont été sous-estimées à partir des enquêtes de pratiques culturales de 2010 pour les simulations STICS, soit que l'adoption des cultures intermédiaires s'est répandue entre 2010 et 2019. **Pour conclure, il serait nécessaire de refaire des simulations avec STICS en se basant sur les enquêtes de pratiques culturales les plus récentes et de les comparer à nouveau avec l'approche satellitaire.**

LIMITES DE L'APPROCHE ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS

Limites de l'approche

Au-delà des aspects ennuagement et prise en compte des variables climatiques qui ont été évoqués précédemment, la précision de l'approche est aussi conditionnée à la valeur du seuil de NDVI que nous avons considéré. Il faudrait idéalement effectuer une analyse de sensibilité à la valeur du seuil et valider l'estimation de la durée de couverture du sol à partir de réseaux d'observation de la phénologie. Aussi, il sera nécessaire de valider l'indicateur flux net annuel de CO_2 à partir de données de flux acquises après 2017 (année de lancement des satellites Sentinel 2). Nous avons essayé de le faire après avoir collecté les données de flux récentes du réseau Européen ICOS, mais les modèles d'instruments de mesures ont été changés entre 2015 et 2016, ce qui induit un biais méthodologique et les données sont encore trop peu nombreuses pour pouvoir effectuer cette validation.

Enfin, la méthode d'estimation des flux de CO_2 à partir de la relation empirique fonction du NDAV n'est valide que pour une quinzaine de cultures principales. Elle ne peut donc s'appliquer à tous les types de cultures et couverts intermédiaires. Aussi, elle a été établie sur des parcelles agricoles ayant des sols appauvris en matière organique. Il est donc possible que sur des sols plus riches en matière organique, et donc ayant une respiration du sol plus forte, la relation empirique ne soit pas valide. Ces différents points pourront être étudiés dans les années à venir via l'acquisition de nouvelles données terrain de flux sur les sites du réseau ICOS.

Perspectives d'applications

Tout d'abord il est important de rappeler que l'indicateur CTI qui représente la fixation nette annuelle de CO_2 d'une parcelle de grande culture n'est pas la même chose que le bilan C. C'est toutefois un des 3 termes qui permet de le calculer comme le montre la Figure 29. Les deux autres termes sont l'export de C à la récolte et l'import de C sous forme d'amendement organique.

Aussi **cette approche empirique n'est par définition pas basée sur l'utilisation d'un modèle mécaniste** (approche TIER3) comme STICS ou SAFYE- CO_2 couplé au modèle sol AMG.

Pour ces deux raisons, **cette approche n'est pas compatible avec la méthodologie Label Bas Carbone pour les grandes cultures, ni avec les méthodes classiquement employées pour le marché volontaire du carbone en agriculture** (ex. méthodologie VM 0042 de Verra).

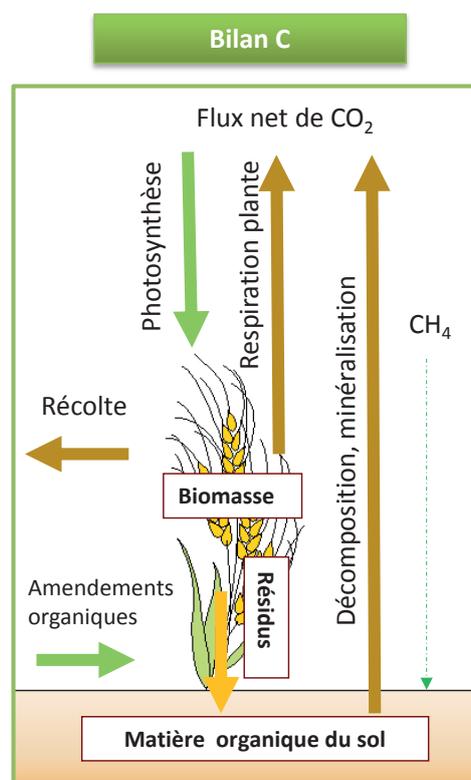


Figure 29 : Composantes du bilan C pour une parcelle de grandes cultures.

La méthode de production de l'indicateur CT1 ou son évolution prenant en compte l'effet des variables climatiques pourrait en revanche être adapté à une production opérationnelle à destination des agences de paiement de la PAC pour le paiement de services environnementaux (éco-schémas) et notamment climatiques. En effet, il servirait alors d'indicateur permettant d'évaluer l'effet de certaines pratiques (choix des cultures, mise en œuvre ou non de cultures intermédiaires) favorables à la fixation nette de CO₂ et donc au stockage de C. Notons en effet que l'allongement de la durée de couverture des sols permet aussi de limiter l'érosion des sols et les risques de lixiviation de nitrates et qu'elle permet d'accroître la biodiversité et l'albédo des surfaces (réflexion d'énergie solaire), ce qui contribue, tout comme le stockage de C à limiter le réchauffement climatique.

Cet indicateur pourrait aussi être utilisé par les conseillers agricoles (ex. Chambres d'agriculture, instituts techniques) **pour guider les agriculteurs vers certaines pratiques stockant du carbone** (ex. cultures intermédiaires) **et établir un premier diagnostic de tendance concernant les bilans C d'une exploitation selon ces pratiques actuelles.** Notons en effet que les agriculteurs ou leurs conseillers qui disposent des informations à la parcelle concernant les rendements (exports de C) et les amendements organiques pourraient facilement calculer le bilan C des parcelles de l'exploitation à partir du moment où la donnée CT1 leur est fournie (voir Figure 29).

CONCLUSION

Malgré sa simplicité, ce modèle nous a permis d'estimer les flux nets annuel de CO₂ des principales grandes cultures sur l'ensemble de la France et sur plusieurs autres zones test dans le monde grâce à la télédétection. L'indicateur a montré une bonne cohérence 1) avec les pratiques connues sur le terrain comme la mise en œuvre de cultures intermédiaires (ex. en Bretagne ou en Géorgie) et 2) avec les simulations réalisées avec le modèle STICS même si cet exercice de comparaison mériterait d'être refait avec des données d'enquêtes culturales plus récentes.

C'est donc une approche facilement utilisable sur la France pour estimer un indicateur lié au bilan C des grandes cultures dans une optique de versement de primes environnementales (éco-schémas) pour la PAC. Elle permet aussi d'identifier l'effet de certaines pratiques agricoles sur les flux nets annuels de CO₂ (type de culture et leur utilisation, présence de cultures intermédiaires) et d'observer l'impact de la réglementation (ex. Directive nitrates). Cependant cette approche ne permet pas de prendre en compte l'effet de l'ensemble des pratiques sur les bilans C des parcelles. Pour ce faire, il faudrait intégrer au calcul de l'indicateur CT1 des données relatives aux récoltes et aux amendements organiques (ce qui correspond à la méthode TIER 2 du projet NIVA). C'est cette méthode qui serait à privilégier dans le cadre d'un financement des agriculteurs en fonction de la quantité de carbone qu'ils stockent. Pour y parvenir, les agriculteurs et les autorités devront s'accorder pour que les données de pratiques soient systématiquement accessibles aux Agences de Paiement de la PAC comme ce sera le cas dans plusieurs pays de l'UE (mais pas la France) lors de la mise en œuvre de la prochaine PAC en 2023.

L'approche a toutefois montré ses limites dans les zones à fort ennuagement comme en Belgique ou au Brésil. Pour une production opérationnelle à l'échelle globale, il serait donc nécessaire d'utiliser des données satellitaires radar (ex. Sentinel-1) en complément des données optiques Sentinel-2. L'utilisation des données Sentinel-1 pour interpoler de manière opérationnelle les trous dans les séries temporelles de NDVI issues de Sentinel-2 est explorée par plusieurs unités de recherches. Ce n'est donc probablement qu'une question de mois ou de quelques années avant que l'approche mise en œuvre dans le cadre de SOCCROP puisse être appliquée de manière opérationnelle à l'échelle globale en s'appuyant sur l'utilisation combinée des données Sentinel 1 et 2.

Rappelons toutefois que le coût de mise en œuvre, les temps de calculs et le volume de stockage de données qui seraient nécessaire pour une application à échelle globale sont abordables uniquement pour quelques très grosses entreprises du numérique, pour certaines agences spatiales, ou agences pluri-étatiques (ex. services Copernicus de l'Europe).

Lexique

¹ <https://www.cesbio.cnrs.fr/outils/iota2/>

² <https://www.niva4cap.eu/uploads/NIVA%20UC1b%20description.pdf>

³ <https://www.icos-cp.eu/observations/ecosystem>

⁴ <https://www.cesbio.cnrs.fr/outils/maja/>

⁵ <https://www.esa-landcover-cci.org/?q=node/158>

⁶ <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article788>

⁷ Inra, Base de données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000, 1998.

⁸ <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-cultureales/>

⁹ <https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/100551/eib-222.pdf>

¹⁰ <https://www.theia-land.fr/teledetection-pour-lobserver-les-surfaces-continentales/>

¹¹ <https://www.cesbio.cnrs.fr/agricarboneo/agricarbon-eo/>

Références bibliographiques

Baetens, Louis, Camille Desjardins, et Olivier Hagolle. 2019. Validation of Copernicus Sentinel-2 Cloud Masks Obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask Processors Using Reference Cloud Masks Generated with a Supervised Active Learning Procedure. *Remote Sensing* 11 (4): 433. doi.org/10.3390/rs11040433.

Baveye, P.C., Berthelin, J., Tessier, D., Lemaire, G., 2018. The “4 per 1000” initiative: A credibility issue for the soil science community? *Geoderma* 309, 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.005>

Brisson, N. et al., 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(5-6): 311-346.

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., Olioso, A., Osborne, B., Sanz, M.J., Saunders, M., Smith, P., Soegaard, H., Wattenbach, M., 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139, 363-383. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.09.020>

Chabbi, A., Lehmann, J., Ciais, P., Loescher, H.W., Cotrufo, M.F., Don, A., SanClements, M., Schipper, L., Six, J., Smith, P., Rumpel, C., 2017. Aligning agriculture and climate policy. *Nat. Clim. Change* 7, 307-309. <https://doi.org/10.1038/nclimate3286>

Garioud, A., Valero, S., Giordano, S., Mallet, C., (2021) Recurrent-based regression of Sentinel time series for continuous vegetation monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 263, pp.112419. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112419>

Kaye J.P., Quemada M., 2017. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 4. DOI 10.1007/s13593-016-0410-x

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., Stolbovov, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>

Montandon, L. M., et E. E. Small. 2008. The Impact of Soil Reflectance on the Quantification of the Green Vegetation Fraction from NDVI. *Remote Sensing of Environment, Remote Sensing Data Assimilation Special Issue*, 112 (4): 1835-45. doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.007.

Pellerin Sylvain et Bamière Laure (pilotes scientifiques), Camille Launay, Raphaël Martin, Michele Schiavo, Denis Angers, Laurent Augusto, Jérôme Balesdent, Isabelle Basile-Doelsch, Valentin Bellassen, Rémi Cardinael, Lauric Cécillon, Eric Ceschia, Claire Chenu, Julie Constantin, Joël Darroussin, Philippe Delacote, Nathalie Delame, François Gastal, Daniel Gilbert, Anne-Isabelle Graux, Bertrand Guenet, Sabine Houot, Katja Klumpp, Elodie Letort, Isabelle Litrico, Manuel Martin, Safya Menasseri, Delphine Mézière, Thierry Morvan, Claire Mosnier, Jean Roger-Estrade, Laurent Saint-André, Jorge Sierra, Olivier Théron, Valérie Viaud, Régis Gâteau, Sophie Le Perchec, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère (coordinateur), 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 p. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport%20Etude%204p1000.pdf>

Poeplau, C., Don, A., 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 200, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>

Poulton, P., Johnston, J., Macdonald, A., White, R., Powlson, D., 2018. 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. *Glob. Change Biol.* 24, 2563-2584. <https://doi.org/10.1111/gcb.14066>

Veloso, A. (2014) Modélisation spatialisée de la production, des flux et des bilans de carbone et d'eau des cultures de blé à l'aide de données de télédétection : application au sud-ouest de la France. Mémoire de thèse de l'Université Paul Sabatier, 299 p. <http://thesesups.tlse.fr/2695/1/2014TOU30092.pdf>

planet A

INNOVATIVE AGRICULTURE FOR A SHARED WORLD

Juin 2023 - Crédits photos : © xxxxxxxxxx

contact@planeta-initiative.com

Tel.+33 7 72 16 45 43

planet A® - 1 place de la Comédie
51000 Châlons-en-Champagne, France

planeta-initiative.com

 @i_Planet_A  Planet-A

Ce projet a été financé par l'association planet A® avec le soutien de la ville de Châlons-en-Champagne