



HAL
open science

Indicateurs Carbone

Eric Ceschia, Mathieu Fauvel, Vincent Thiérion, Ludovic Arnaud, Taeken Wijmer, Ainhoa Ihasusta, Al Bitar Ahmad, Rémy Fieuzal, Gaétan Pique, Emmanuel de Laroche, et al.

► **To cite this version:**

Eric Ceschia, Mathieu Fauvel, Vincent Thiérion, Ludovic Arnaud, Taeken Wijmer, et al.. Indicateurs Carbone. Séminaire de restitution du projet NIVA, CESBIO, Nov 2022, Toulouse (31000), France. hal-04222119

HAL Id: hal-04222119

<https://hal.inrae.fr/hal-04222119>

Submitted on 28 Sep 2023

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

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



Indicateurs Carbone

Eric Ceschia (INRAE/CESBIO)

& L. Arnaud, A. Ihasusta, Ahmad Al Bitar, T. Wijmer, G. Pique, R. Fieuzal, V. Thierion, M. Fauvel (CESBIO), E. De Laroche (ASP), A. Tarko, G. Marchand & D. Laurent (IGN)

Séminaire de restitution NIVA, Toulouse le 21 Novembre 2022



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 842009

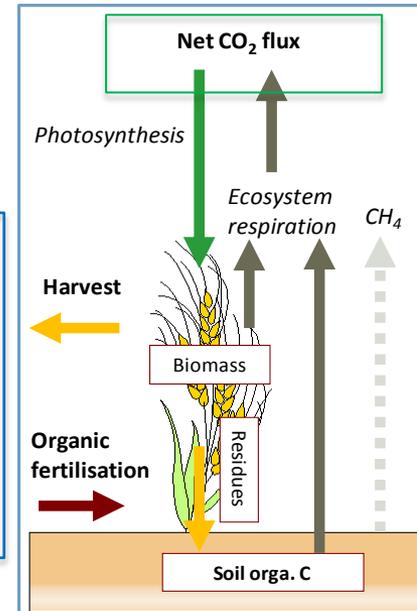
Principe de calcul des Indicateurs C

- Une même approche conceptuelle : Composantes du bilan C (Smith et al 2010)

TIERs 2 & 3

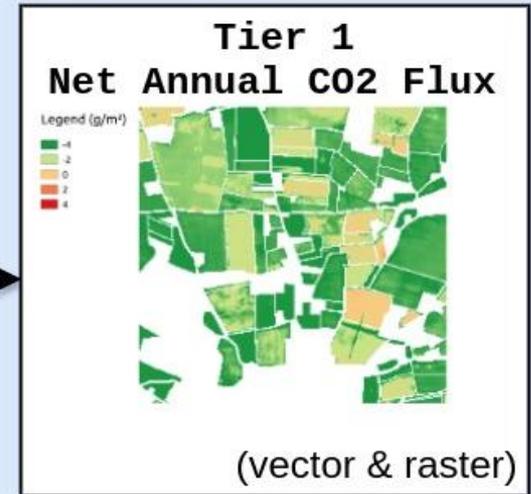
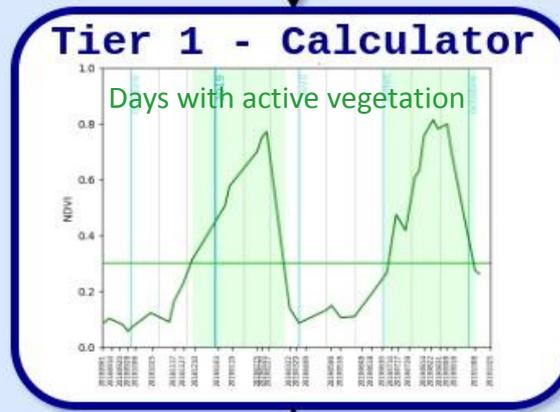
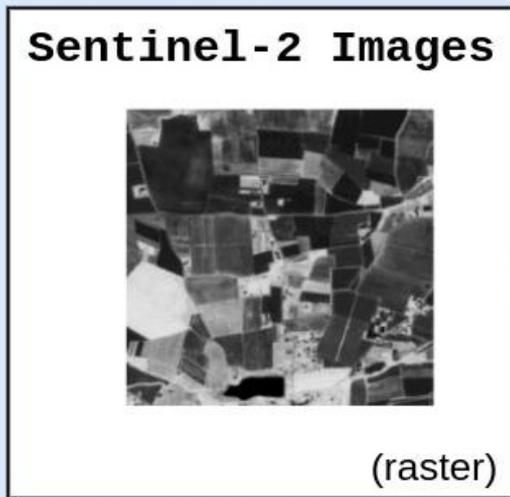
$$\text{C budget} = \text{Net CO}_2 \text{ flux} - \underbrace{\text{C harvested} + \text{Org. manure}}_{\text{Farmer's data (FMIS)}}$$

TIER 1

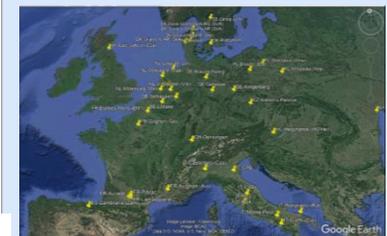
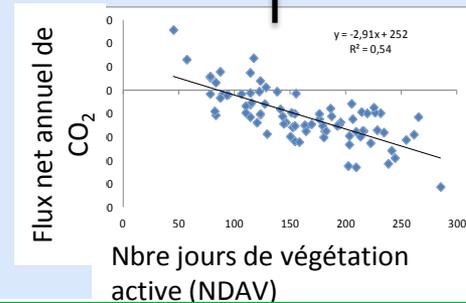


Indicateur Carbone Tier I : méthode

Approche empirique → la plupart des grandes cultures



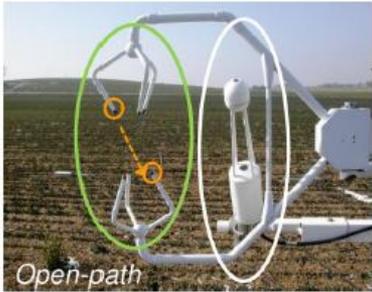
Basé sur Ceschia et al. (2010)



Hypothèse : la durée de végétation active (photosynthèse) observée sur le terrain peut être estimée via la durée de couverture du sol observée par satellite

Indicateur Carbone Tier I : méthode

Eddy covariance method

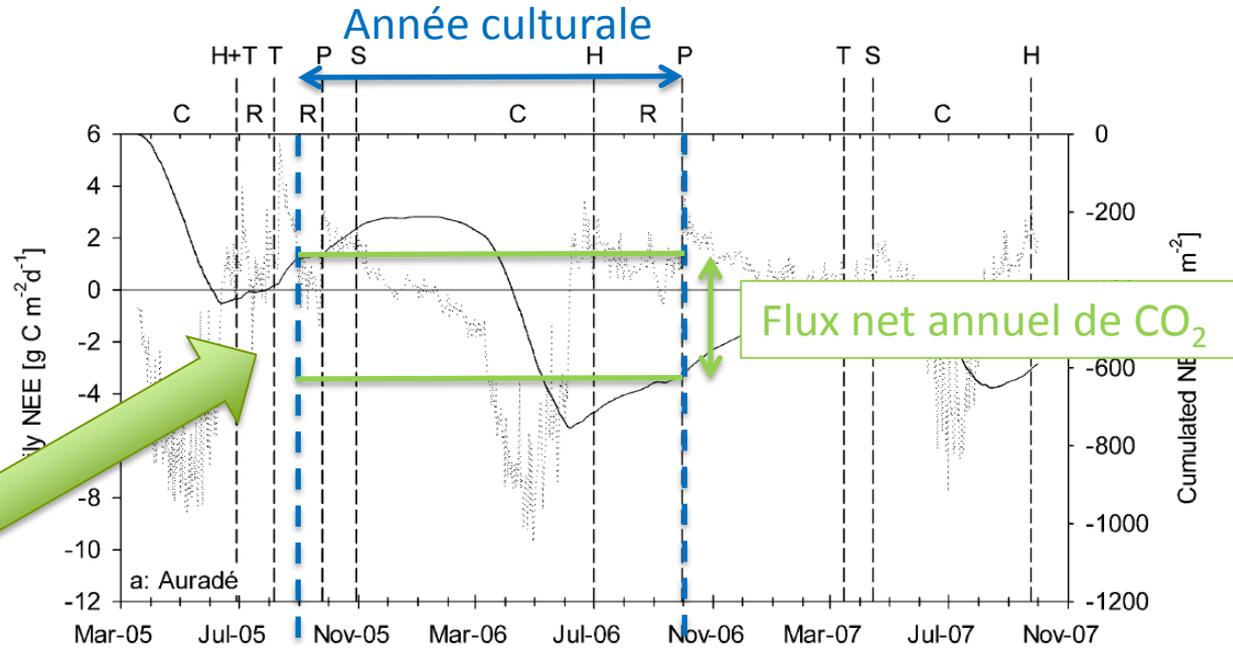


Sonic anemometer and gas analyzer in open path. Source : T.Tallec

Net Ecosystem Exchange :

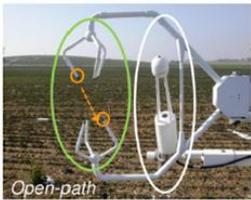
$$NEE = cov(w', [CO_2]')$$

Décomposition du flux net en photosynthèse et respiration (Reichstein al. (2005))



Indicateur Carbone Tier I : méthode

Eddy covariance method

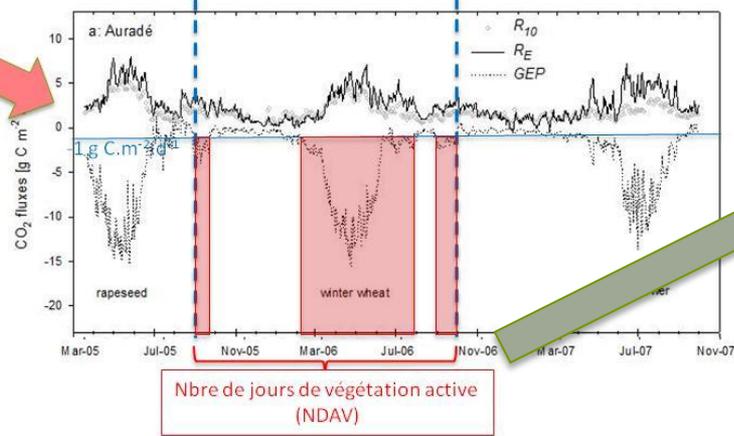
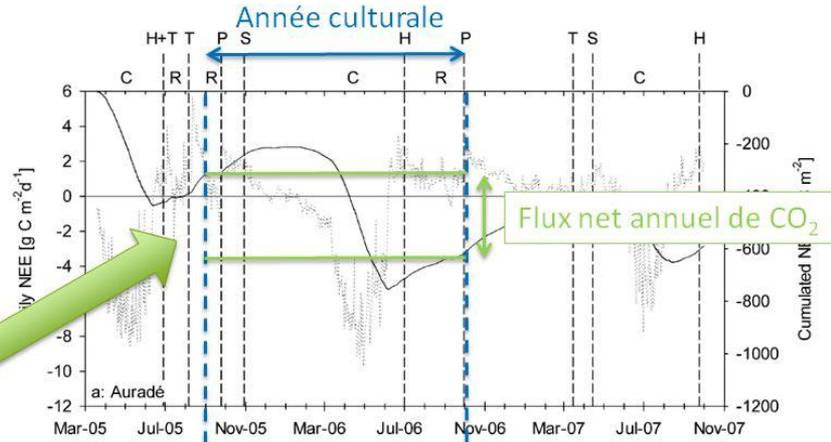


Open-path
Sonic anemometer and gas analyzer in open path. Source : T.Taliec

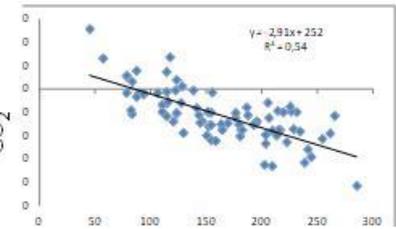
Net Ecosystem Exchange :

$$NEE = cov(w', [CO_2]')$$

Décomposition du flux net en photosynthèse et respiration (Reichstein et al. (2005))



Flux net annuel de CO₂

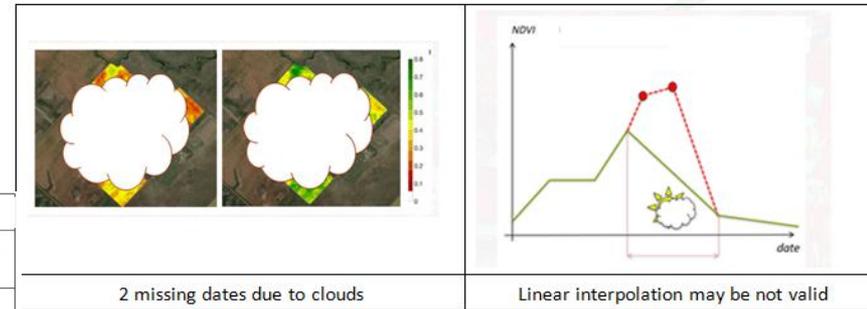
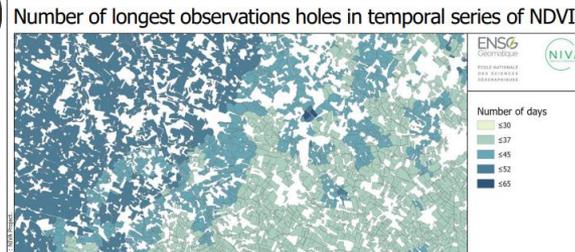


Nbre jours de végétation active (NDAV)

Indicateur Carbone Tier I : incertitudes

- La végétation observée par satellite est verte mais pas activement d'un point de vue photosynthèse → **effets météo en cours d'intégration**

- Risque de dégradation de l'indicateur avec les nuages, mais documenté (métadonnées)



- Incertain lié à la relation native (dispersion)

- Calcul d'incertitude globale

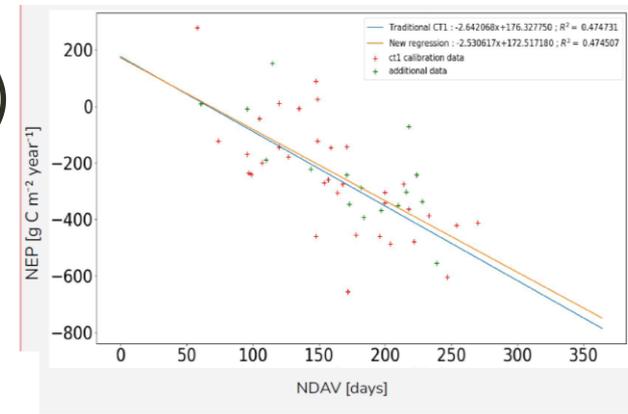
Analytic derivation of the fitting uncertainty :

$$\sigma_{NEP} = \sqrt{\sigma_a^2 NDAV^2 + \sigma_b^2 + a^2 \sigma_{NDAV}^2}$$

Hypothesis :

- Gaussian error model for the flux of CO₂ & NDAV ~ N(μ_{NDAV} = x, σ_{NDAV})
- a and NDAV independants & a ~ N(μ_a=a, σ_a) and b ~ N(μ_b=b, σ_b).

Données de 2003 à 2009 et
de 2010 à 2016



Indicateur Carbone Tier I : résultats

Outil opérationnel à l'échelle d'un pays : à la parcelle

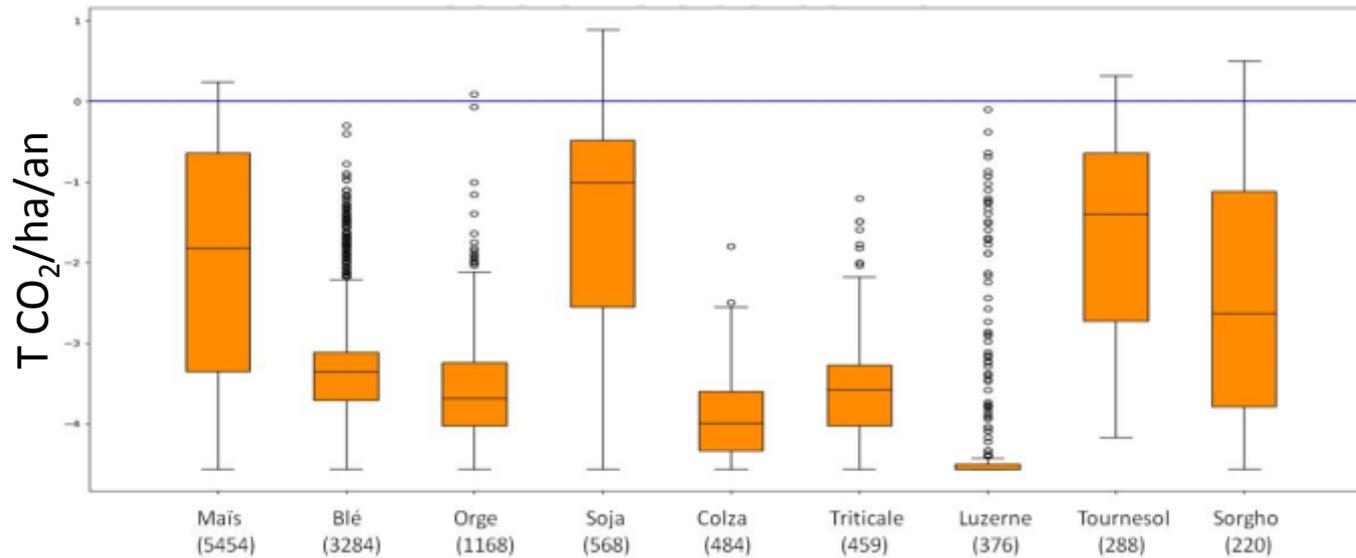


Code open source https://gitlab.com/nivaeu/uc1b_indicators_tool

Testé aussi en Espagne, au Danemark, en France par les Agences de paiement ou leurs partenaires

Indicateur Carbone Tier I : résultats

Permet de réaliser des statistiques par cultures



Variabilité des flux nets annuels de CO₂ par type de culture dans l'Ain en 2019

Summary table							
PAC 2020			GRANULE 30 TUM - R137				
UC1b (NIVA)	Num.Parcels	5%	Num.Parcels	Surface (ha)	Average CO ₂ _Flux (tm/ha)	CO ₂ _Total™	
rapeseed	7.130	357	1.081	5.881	-3,610	-21.230	
peas	8.617	431	4.059	15.569	-1,700	-26.467	
winter/summer wheat	301.890	15.095	49.270	163.584	-2,880	-471.122	
winter/summer barley	308.145	15.407	68.176	228.995	-2,400	-549.588	
winter/summer rye	39.224	1.961	1.699	5.662	-2,680	-15.174	
winter/summer oats	41.649	2.082	6.401	20.629	-2,820	-58.174	
triticale	312	16	48	244	-2,670	-651	
sunflower	81.225	4.061	13.355	57.264	-0,270	-15.461	
maize	44.463	2.223	2.922	11.263	-2,410	-27.144	
potatoes	7.234	362	741	2.054	-1,930	-3.964	
sugar beet	4.292	215	1.337	5.351	-3,140	-16.802	
	844.181	42.209	149.089	516.496			
			17,66	%			

Table des statistiques de flux net annuel de CO₂ par type de culture en Castille y Leon (Espagne) entre Oct 2019- Sept 2020

Indicateur Carbone Tier I : résultats

Outils opérationnels à l'échelle d'un pays : au pixel (10m)

NIVA'S algorithm + Iota2
software



With the support of



France
= 94 Sentinel-2 tiles

Flux nets annuels de CO₂ en 2019

Réalisation A. Ihasusta & L. Arnaud

- Blue/green areas: high CO₂ uptake ⇒ high probability of carbon sink.
- Yellow/orange zones: certainty of destocking carbon.
- Climate gradient can't explain spatial variability alone.

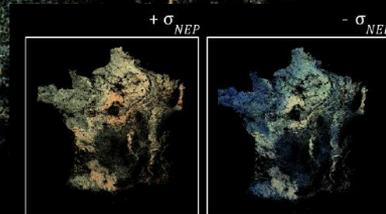
1.76

-7.88

in tC of CO₂/ha

0 100 200 km

CESBIO - INRAE - CNES



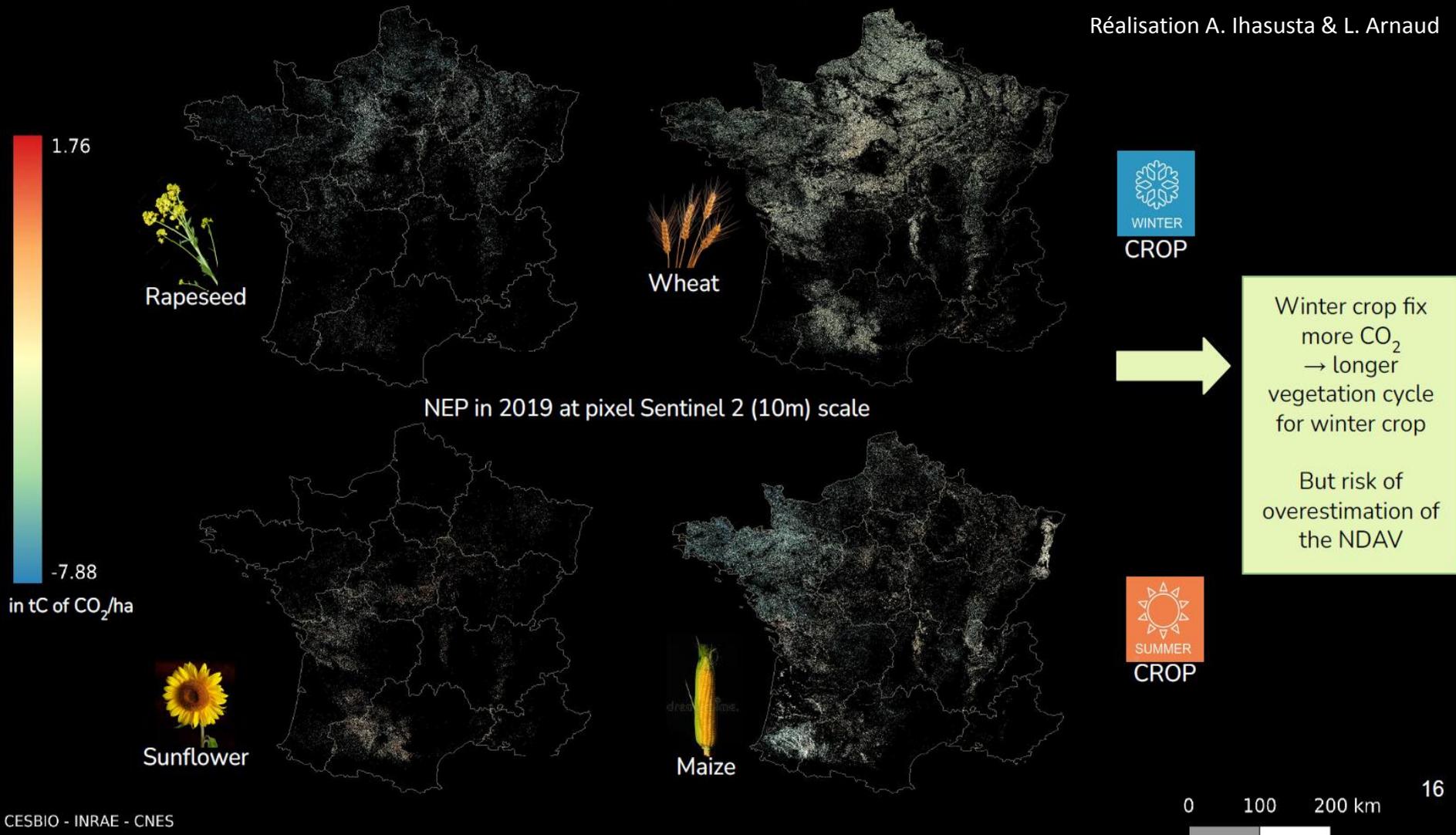
$$\sigma_{NEP} = \sqrt{\sigma_a^2 NDAV^2 + \sigma_b^2 + a^2 \sigma_{NDAV}^2}$$

Stage M2 Aïnhua Ihasusta

Indicateur Carbone Tier I : résultats

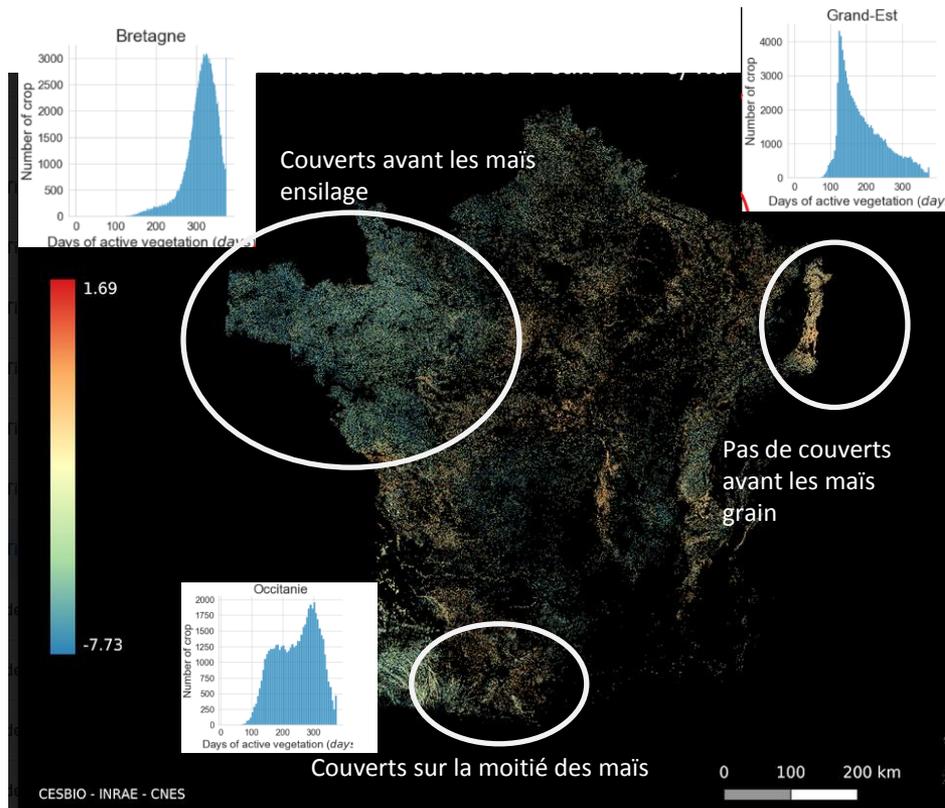
Comparaison des flux nets annuels des cultures en 2019

Réalisation A. Ihasusta & L. Arnaud



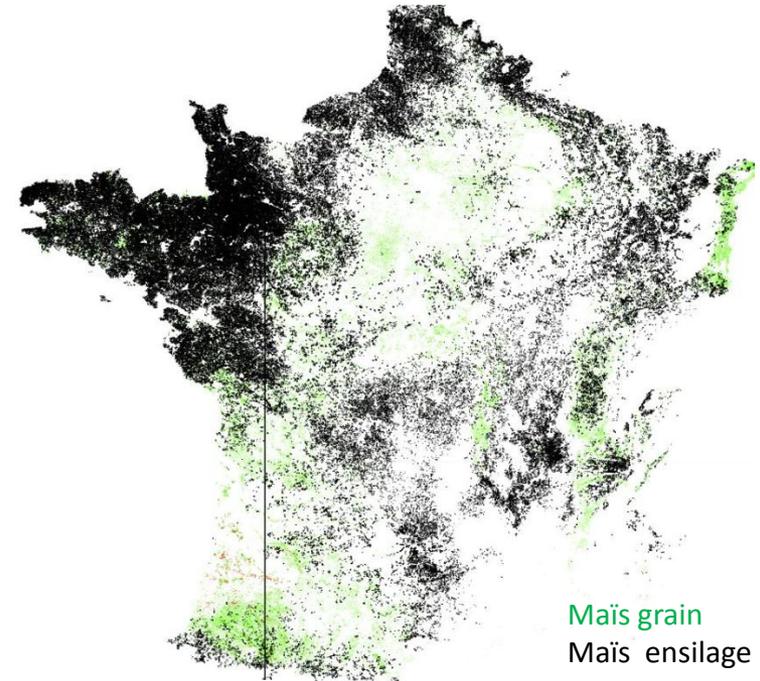
Indicateur Carbone Tier I : résultats

Flux nets annuels de CO₂ pour les maïs en France en 2019



Réalisation A. Ihasusta & L. Arnaud

Types de maïs (données RPG)



Malgré un cycle de végétation plus courts, les maïs ensilage fixent plus de CO₂ que les maïs grains car ils sont précédés par des couverts végétaux (directive nitrate).

Approche très simple qui permet de visualiser des effets gestion (date récolte, cult. intermédiaires) et réglementation (directive nitrate) sur la durée de couverture du sol

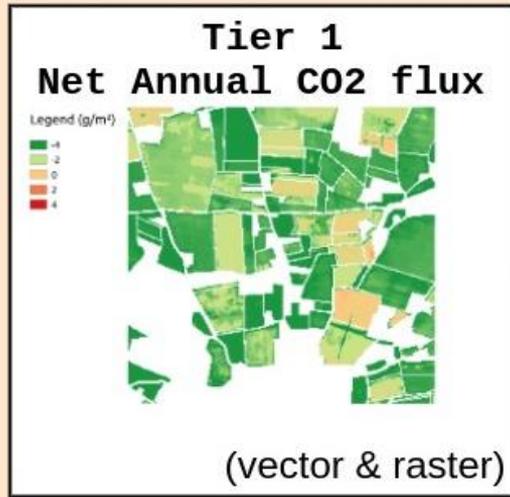
Indicateur Carbone Tier I : conclusion et perspectives

- Une méthode de calcul simple et 2 outils :
 - échelle parcelle : très simple d'utilisation/installation → permet de traiter quelques tuiles Sentinel 2
 - échelle pixel (nécessite formation à IOTA2) → permet une production nationale voire plus
- Amélioration en cours via la prise en compte des facteurs climatiques → validation indépendante de la méthode avec des données flux concomitantes aux données Sentinel 2 (Thèse Ainhoa Ihasusta)
- Test de la méthode en cours aux USA, Brésil, Australie, Sénégal, Italie, Allemagne, Belgique → 
- Demande de création d'un CES THEIA → production annuelle opérationnelle

Indicateur carbone Tier 2 (bilan C)

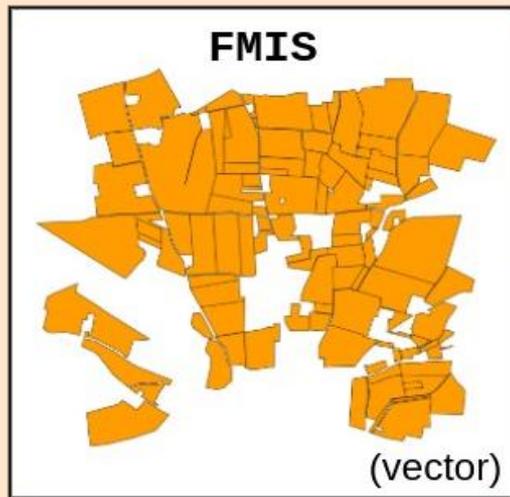
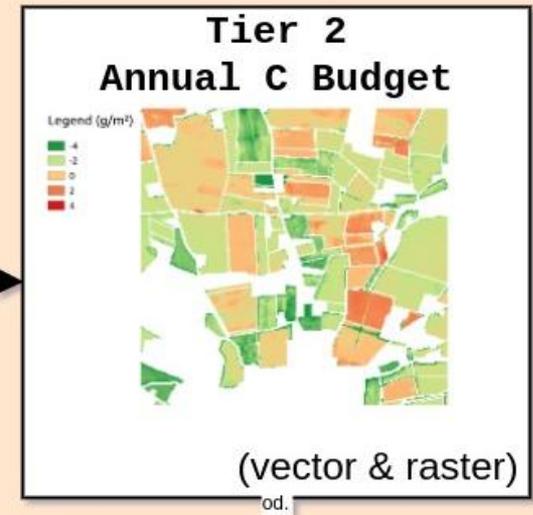
Indicateur Carbone Tier 2 : méthode

Approche empirique → la plupart des grandes cultures



Tier 2 - Calculator

$$\begin{aligned} \text{T2- Annual Carbon Budget} &= \\ \text{T1- Net Annual CO}_2 \text{ flux} &+ \text{Carbon Harvested} \\ &- \text{Organic Amendments} \end{aligned}$$



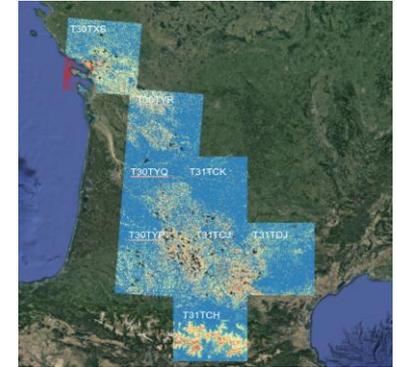
Le bilan de Carbone dépend du flux de CO₂ calculé par l'approche Tier1 et des données agriculteurs concernant les imports/exports latéraux de C

Indicateur Carbone Tier 2 : résultats

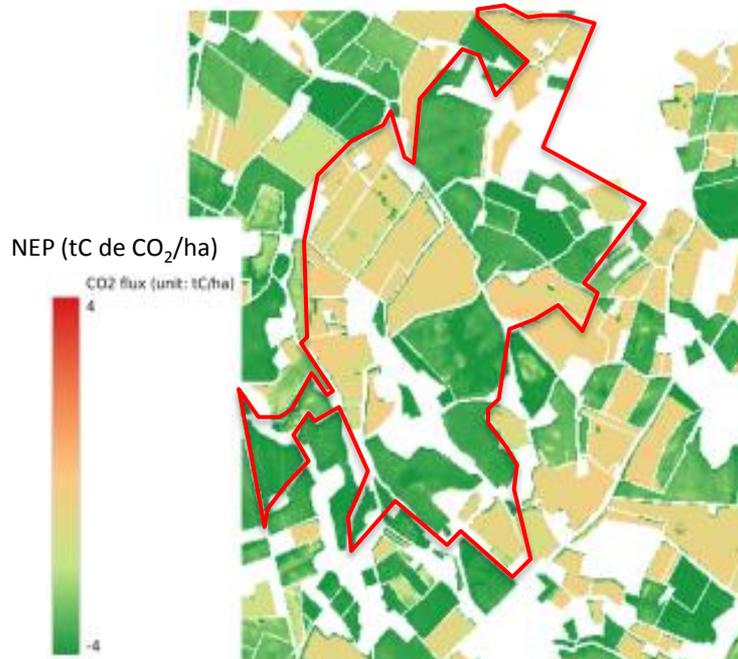
Outils disponible : https://gitlab.com/nivaeu/uc1b_indicators_tool

Testé dans le Sud Ouest de la France avec APCA, CA 32, CA 81,

et  **AGRO D'OC**
UNION DES CETA D'OC



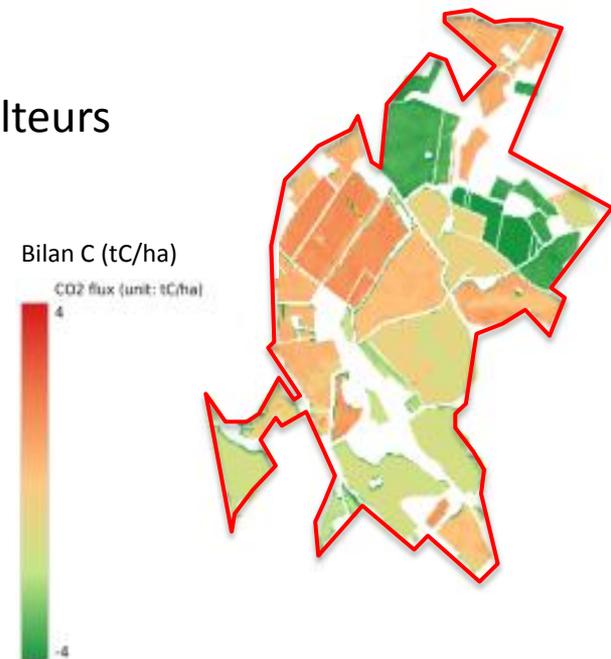
Carte des flux nets annuels de CO₂



+ données agriculteurs



Carte de bilan carbone



Indicateur Carbone Tier 2 : conclusion

- Une méthode de calcul simple
- Mais difficile d'accéder aux données agriculteurs
 - Conventions avec les CA & coopératives, gestion du consentement...
 - Données sur un petit nombre d'exploitations
 - Les résultats ne sont pas publiables (confidentialité)



Demande de création d'un service THEIA de production annuelle du Tier1 sur France entière pour que chaque structure (fermes, coopératives, chambres...) puisse calculer elle-même le Tier2 à partir de ses propres données d'itinéraires techniques

Indicateur carbone Tier 3 (modélisation du bilan C)

Indicateur Carbone Tier 3 : méthode

Données météo (Safran, ERA5)



Modèle de culture → céréales à paille, maïs, tournesol, colza, couverts



Pique et al. (2020 a & b)

RPG (vector)

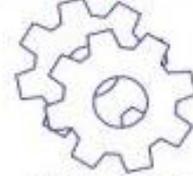


Sentinel-2 Images (raster)



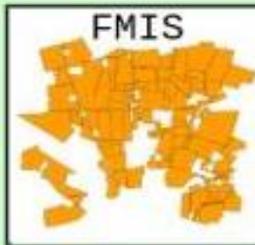
Tier 3 - Calculator

Modélisation



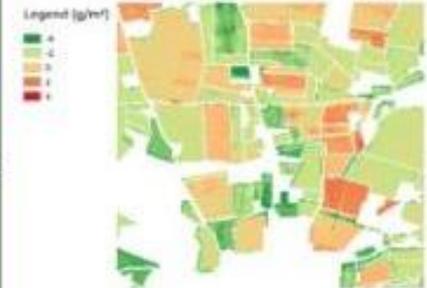
SAFYE-CO2 + AMG

FMIS



Farmer data (vector)

Tier 3
Annual C Budget



(vector & raster)

+ rendement, biomasse, flux de CO₂

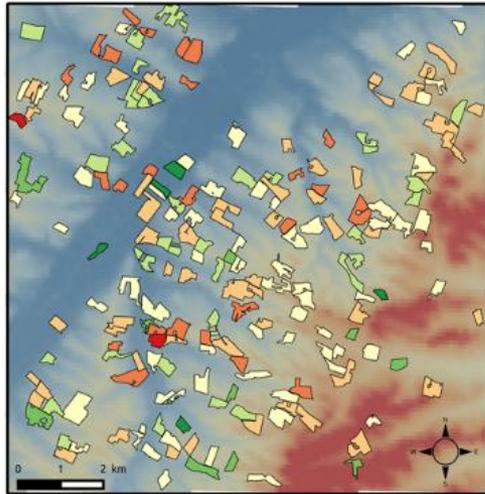
Large jeu de données de validation:
stations flux ICOS, Observatoire Spatial
Régional

Les flux de CO₂ sont calculés par SAFYE-CO₂ dont la phénologie et l'efficacité de photosynthèse sont calibrées via l'indice foliaire (LAI observé par Sentinel-2). Les sorties de biomasse et les données de pratiques servent à finaliser le calcul de bilan C dans AMG

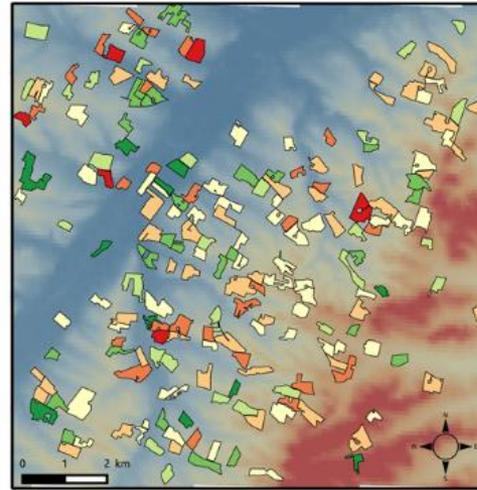
Indicateur Carbone Tier 3 : méthode

A la parcelle (SAFYE-CO2)

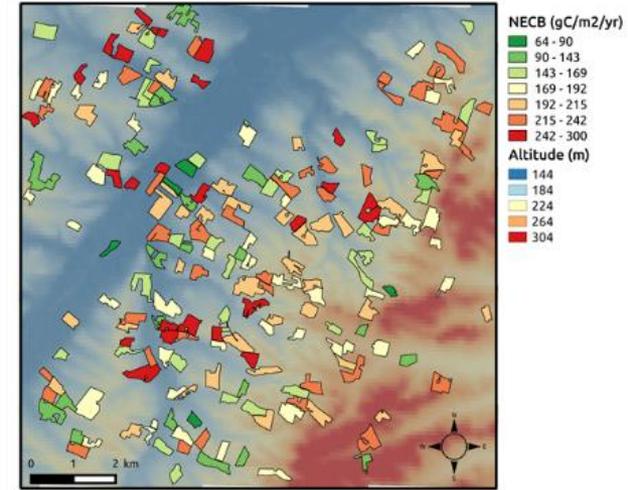
Pique et al (2020b) in Remote Sensing



Flux net de CO₂

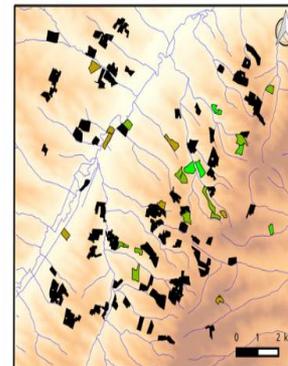


C récolté



Bilan C

Analyse de la variabilité spatio-temporelle des composantes du bilan C



ΔNEP (gC/m²/yr)
0
-28--56
-56--84
-84--112
-112--140

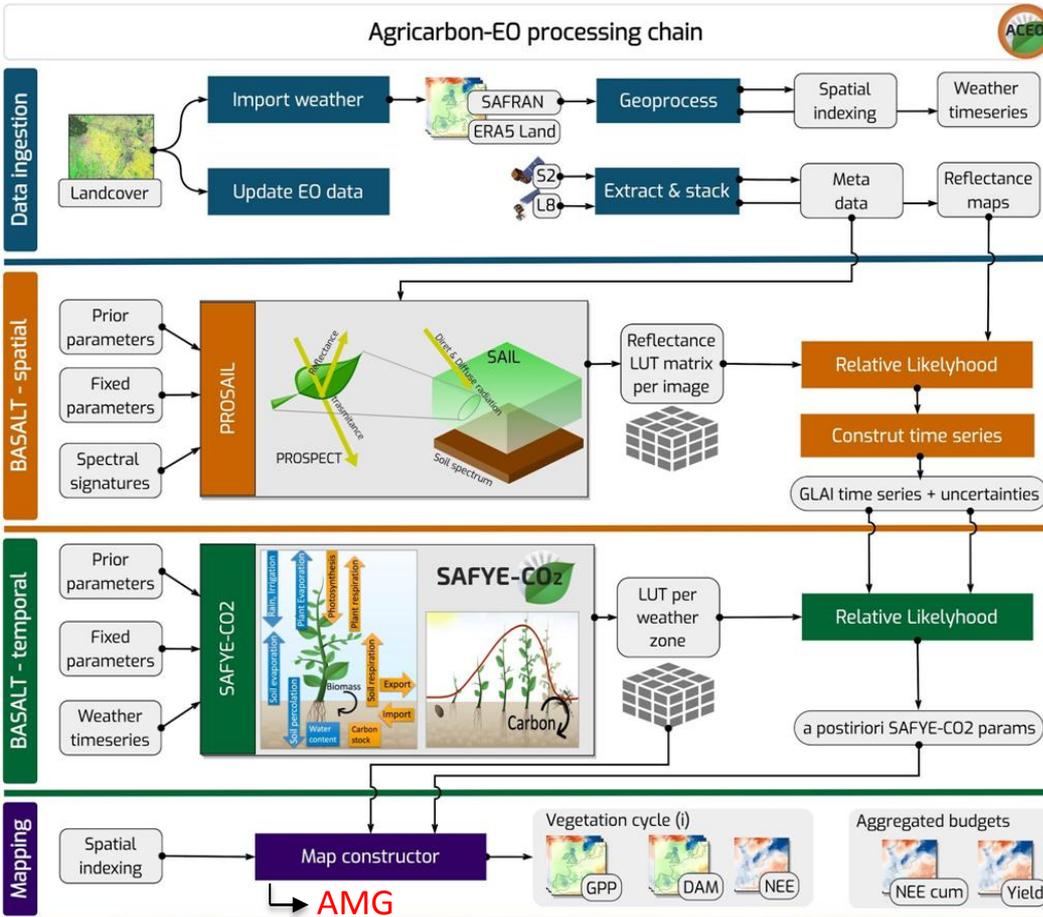
Effet des repousses/adventices/couverts estivaux sur les flux nets de CO₂ → seule une approche satellitaire comme SAFYE-CO₂ permet de le faire

B

Indicateur Carbone Tier 3 : méthode

Au pixel (chaîne opérationnelle AgriCarbon-EO) Thèse Taeken Wijmer

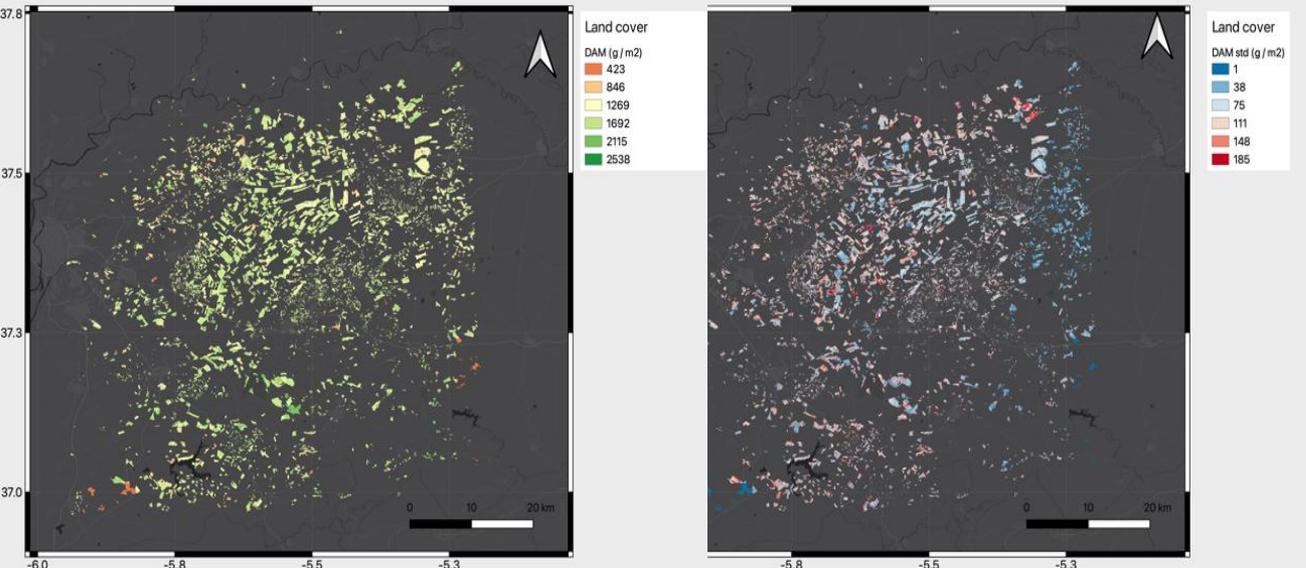
Adaptée à une application large échelle/10m de résolution : méthode d'assimilation BASALT (Bayesian Normalised Importance sampling via Look-up Table generation) → (Wijmer et al. submitted)



- Génération de la grille spatio-temporelle de simulation
- Téléchargement et mise en forme des :
 - Images satellites
 - Données météorologiques
- Inversion du GLAI avec Prosail + incertitudes
 - Génération de look up tables **prosail** par image
 - Calcul de la vraisemblance relative des entrées de LUT sachant les observations satellites
 - Approximation gaussienne de la distribution a posteriori
- Inversion du modèle SAFYE-CO2 + incertitudes
 - Génération de look up tables **SAFYE-CO2** par zone météo
 - Calcul de la vraisemblance relative des entrées de LUT sachant les GLAI inversés
- Postprocessing :
 - Construction de cartes de paramètres de variables à un temps t ou de variables intégrées
 - Calcul de statistiques de fitting
 - Utilisation des sorties de SAFYE-CO2 (biomasse restituée) → modèle sol AMG pour le calcul des bilans C

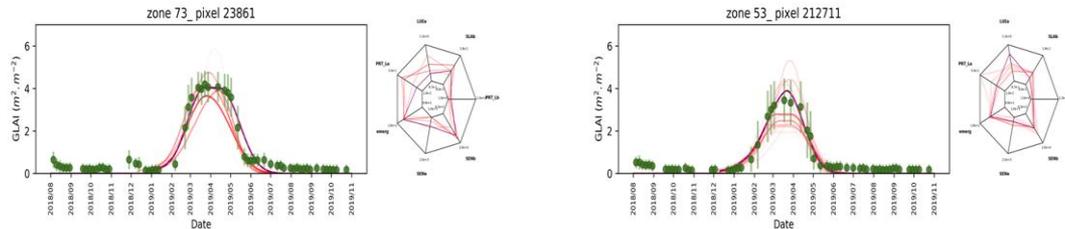
Indicateur Carbone Tier 3 : résultats

Carte de biomasse du blé à 10m de résolution dans la région de Séville



Modélisation spatialisée des blés de la région de Séville

- Processus totalement automatisé (juste à fournir le RPG)
- Bonne reproduction des cycles de végétation sans recalibration du modèle



Deux exemples de séries temporelles de LAI simulées (rouge) et observées par satellite (vert)

Run Agricarbon EO sur une Tuile Sentinel 2 (110 x 110 km)

- Serveur 500Gb de Ram 72 coeurs
- Moins de 24h, téléchargement inclus dont simulation de SAFYE-CO₂ ± 3h

Indicateur Carbone Tier 3 : résultats

Thèse Taeken Wijmer co-financée par NIVA et Naturellement Popcorn **bpi**france

Flux net annuel de CO₂ (en gC-CO₂.m⁻².an⁻¹) à 10m de résolution pour des blés en 2017

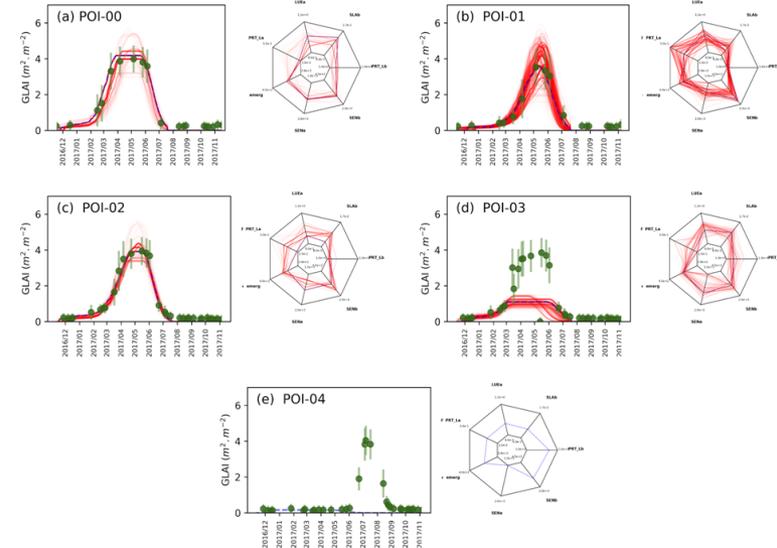
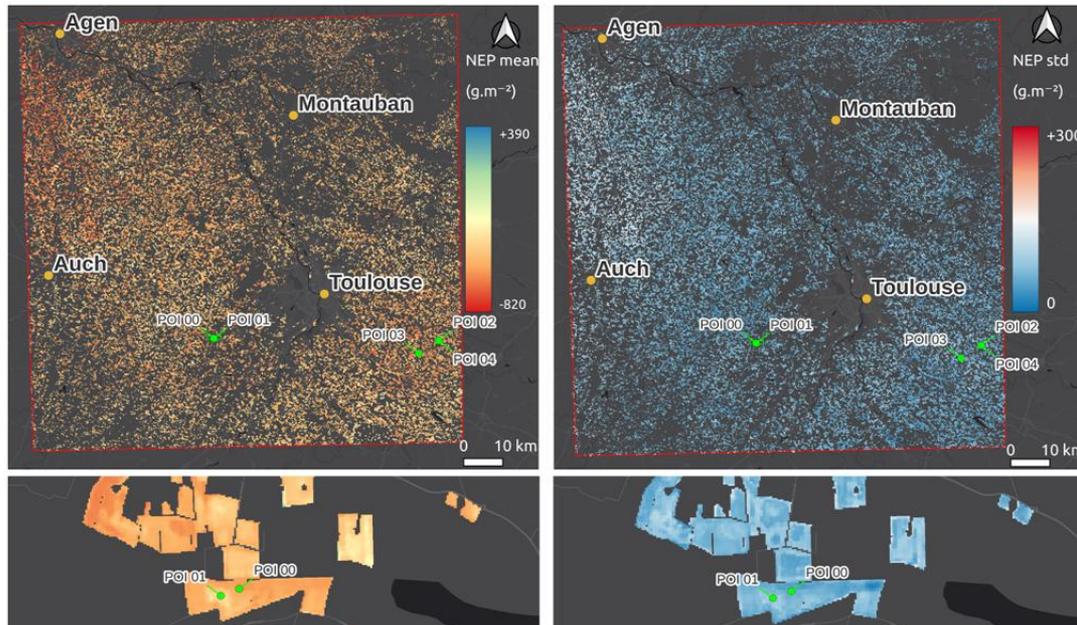


Illustration des simulations pour 5 Points d'intérêts :

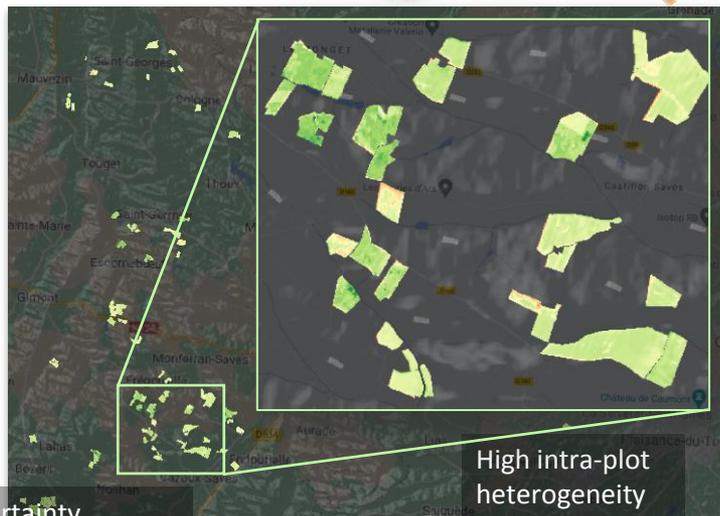
- a et b - pixels dans la même parcelle
- c et d - effet d'un nuage non filtré
- e - erreur du RPG

Zone de 110x110 km dans la région de Toulouse (Tuile 31 TCJ)

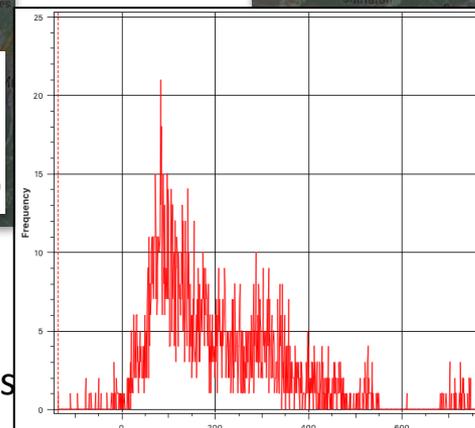
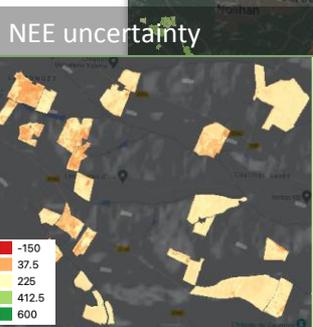
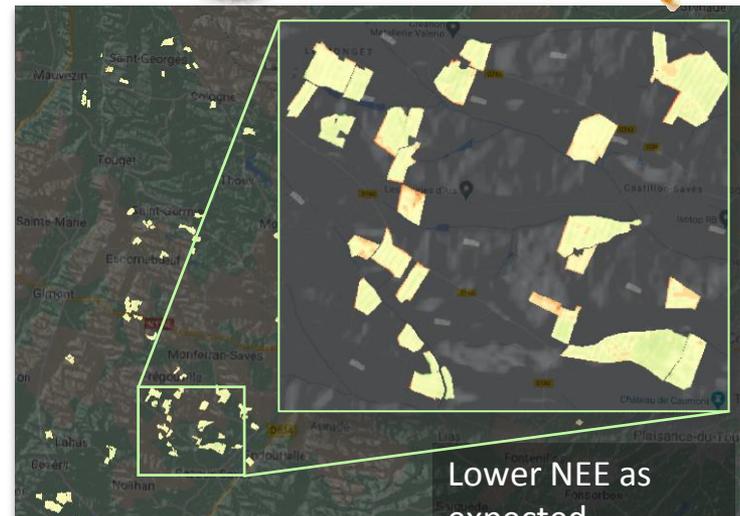
Indicateur Carbone Tier 3 : résultats

Double exercice de simulation : parcelles de maïs précédées d'un couvert ou en ignorant sa présence (région Toulousaine)

Culture intermédiaire + Maïs



Sol nu + Maïs



Distribution en fréquence des différences entre les 2 simulations

Parfois + de 500 gC/m² fixés par les couverts

Indicateur Carbone Tier 3 : résultats

Net annual CO₂ fluxes for 2018 straw cereals in South West France (10 m resolution) → 4h of computing

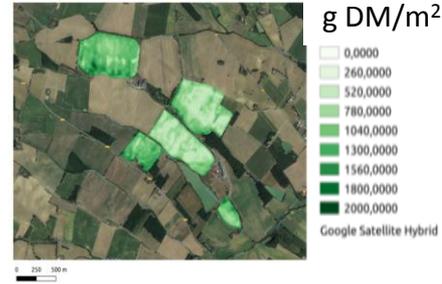


Whole Sentinel 2 Tile (31TCJ)

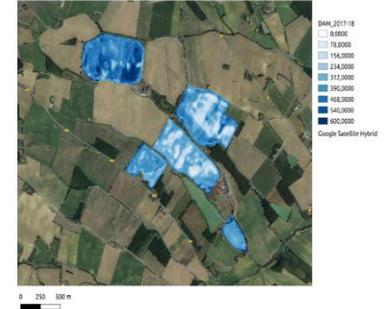
CO₂ fixation / soil C storage 😊

CO₂ losses / soil C losses ☹️

Cover crop biomass



Uncertainty map



Net annual CO₂ flux (gC-CO₂/m²/yr)

NEE for wheat in 2017

- 🟠 -125
- 🟡 150
- 🟢 425
- 🔵 700

Google Terrain

10m resolution C budget map for cover crop/maize/wheat crop rotations (Villeneuve farm, France)

+ farmer's data



bpi**france**



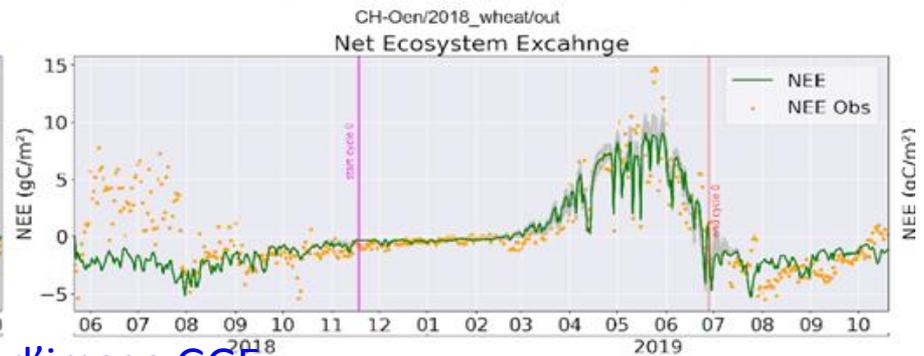
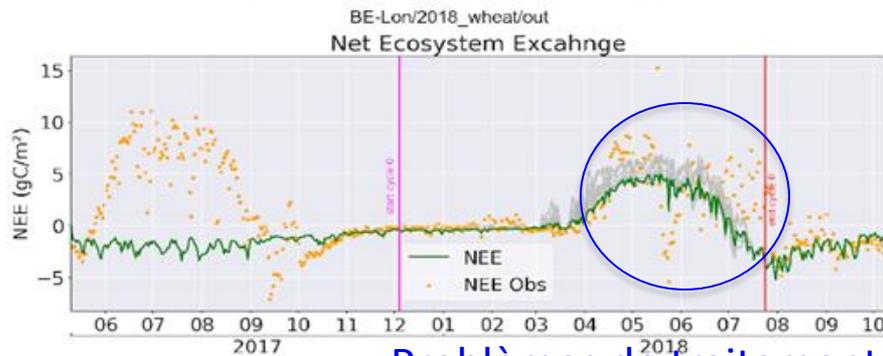
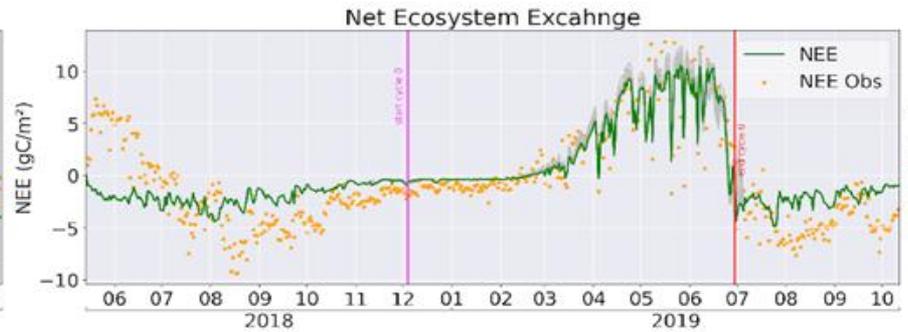
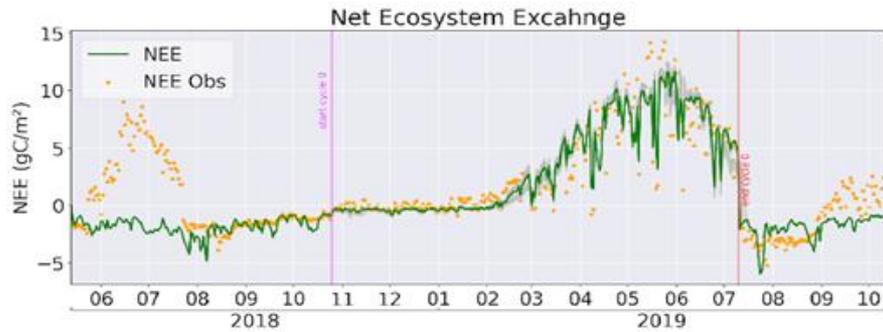
Collab. with the Nataïs company (Naturellement popcorn project) → farmers get a bonus according to the C they store in the soil with cover crops

Indicateur Carbone Tier 3 : conclusion

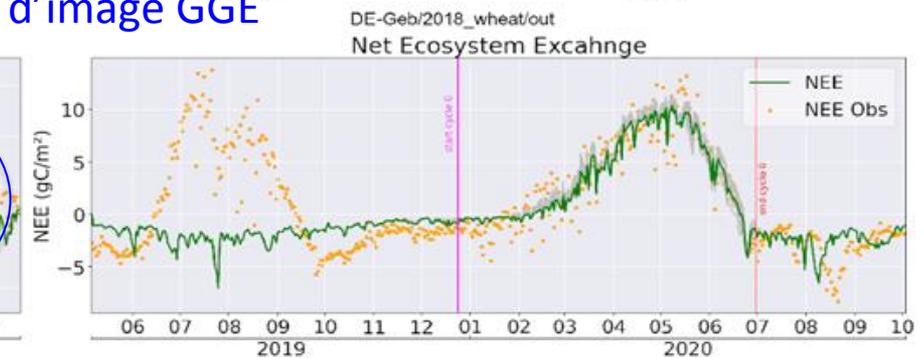
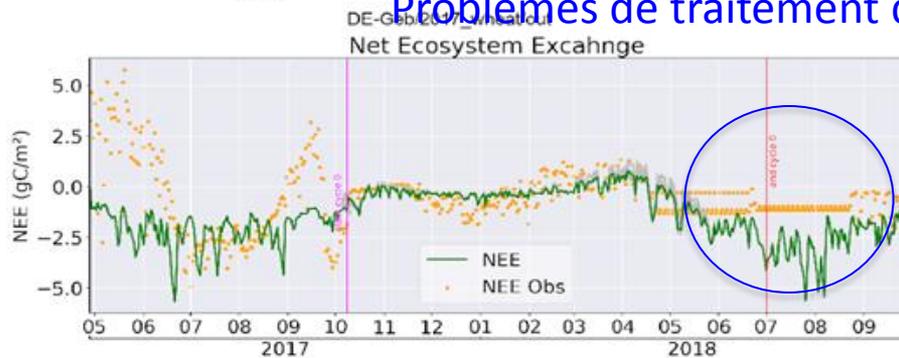
- Il existe 2 outils → composantes du bilan C
 - Calcul à la parcelle : SAFYE-CO2
 - Calcul au pixel: AgriCarbon-EO
- Applications possibles pour :
- marché volontaire du C,
- filières, PAC, Inventaire nationaux
- Prise en main plus difficile (que TIER 1 & 2)
 - formation préalable
 - besoin de grosses ressources informatiques
 - Intégration progressive de nouvelles cultures → long travail
 - Transposabilité
 - Autres cultures et pédoclimats → en cours sur les sites flux du réseau ICOS en Europe (initiative Crop2021)
 - Tests multi-pays : France et Espagne dans le cadre de NIVA puis Italie, Pays bas... → projets Horizon ClieNFarm, OrCasa

Indicateur Carbone Tier 3 : transposabilité

Test de transposabilité sur sites flux en Europe pour le blé (sans modif. des paramètres d'origine) → données Google Earth Engine (à refaire avec données Airbus)



Problèmes de traitement d'image GEE



FR-Gri/2017_wheat/out

FR-Gri/2019_wheat/out

Conclusions

➤ A partir de données et outils principalement open source, les indicateurs C ont été produits avec 3 niveaux de complexité sur de larges territoires mais avec une même approche conceptuelle (composantes du bilan C);

➤ TIER 1: facile à mettre en œuvre à grande échelle/haute résolution, mais ne tient pas compte de certaines pratiques de l'agriculteur qui peuvent avoir une incidence sur les résultats (ex., amendements biologiques),

➤ TIER 2: plus précis, facile à mettre en œuvre sur le plan technique, la principale limite est l'accès à des données de pratiques fiables (connexion via des API aux logiciels de gestion des données de pratiques : ex. SMAG, MesP@arcelles...),

➤ TIER 3 (modèle) : exige également des données des agriculteurs, offre des niveaux de précision plus élevés et fournit d'autres indicateurs agro. utiles (rendement, biomasse, besoins en eau, incertitudes), mais moins opérationnels car pour chaque nouveau type de culture le modèle doit être re-paramétré/validé,

PAC,
inventaires
nationaux

PAC,
inventaires
nationaux,
Marché C,
filères

➤ Intégration en cours des 3 approches (TIERs) dans AgriCarbon-EO

➤ Il existe donc des solutions pour le monitoring à grande échelle/haute résolution des composantes du bilan C, mais l'accès à des données agriculteurs fiables est le principal facteur limitant → initiatives telles que AgDataHub, Just Connect, Join Data permettront sans doute de lever cette contrainte. Quid d'une action nationale centralisée comme aux Pays bas pour la prochaine PAC ?



Merci pour attention et merci aussi à
nos autres financeurs



Naturellement
popcorn

bpi**france**

planet **A**

ORCaSa

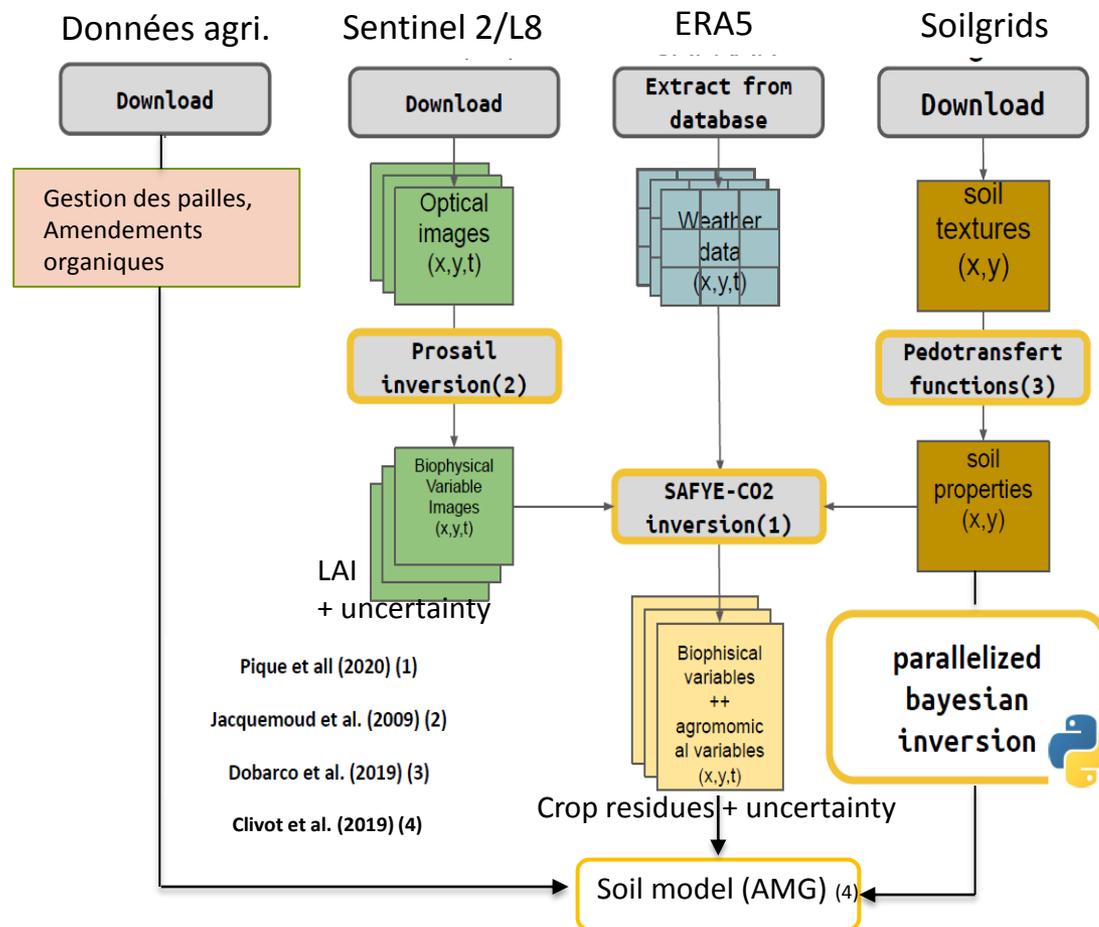
Pour plus d'informations:

- visitez: <https://www.cesbio.cnrs.fr/agricarboneo/>
- contactez moi : eric.ceschia@inrae.fr

Indicateur Carbone Tier 3 : méthode

Au pixel (AgriCarbon-EO)

Chaine opérationnelle adaptée à une application large échelle/10m de résolution : parallelized bayesian inversion approach → uncertainty analysis, super computers...(Wijmer et al. submitted)



AGRIcarbon-EO

Tool regrouping all the discussed functionalities.

- Replicability/Archiving
- automatised
- parallelized

-Taeken Wijmer
-Eric Ceschia (**Scientific officer**)
-Ahmad al bitar (**Technical officer**)
-Ludovic Arnould
-Rémy Fieuzal
-Gaetan Pique

A scalable solution for large scale/high resolution cropland carbon budget monitoring compliant with recommendations by the CIRCASA initiative (Smith et al. 2020) and the voluntary C market standards