



**HAL**  
open science

# Modélisation et satellites, une approche innovante pour la cartographie des bilans carbone

Eric Ceschia

► **To cite this version:**

Eric Ceschia. Modélisation et satellites, une approche innovante pour la cartographie des bilans carbone. 1ère édition du rendez-vous national de l'agroécologie, AFAF et Nataïs, Feb 2023, Samatan, France. hal-04222631

**HAL Id: hal-04222631**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04222631v1>**

Submitted on 29 Sep 2023

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

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

# Modélisation et satellites, une approche innovante pour la cartographie des bilans carbone

Eric Ceschia, Directeur de Recherches INRAE, Centre d'Etudes Spatiales de la BIOshpère (CESBIO)

Avec les contributions de Ahmad Al Bitar, Taeken Wijmer, Rémy Fieuzal, Morgan Ferlicoq, Jean François Dejoux



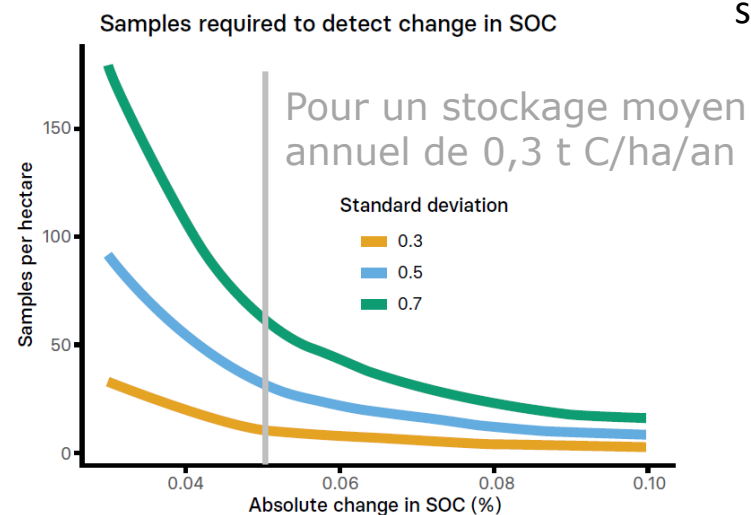
## Qu'est ce que le bilan C d'une parcelle agricole ? Et comment le mesurer ?

- Le bilan C représente un gain ou une perte en carbone d'un sol, principalement sous forme de matière organique, entre deux dates (année culturale, rotation...)

### 2 approches

#### Mesure directe des variations de stocks de C organique du sol

- Nécessite le prélèvement d'un grand nombre d'échantillons entre 2 dates → très coûteux, risque d'échantillonnage peu représentatif (peut être réduit via une cartographie des propriétés de sol/stratification)



➔ **Besoin de prélever entre 25 et 75 échantillons par hectare !!!**



## Qu'est ce que le bilan C d'une parcelle agricole ? Et comment le mesurer ?

- Le bilan C représente un gain ou une perte en carbone d'un sol, principalement sous forme de matière organique, entre deux dates (année culturale, rotation...)

### 2 approches

#### Mesure directe des variations de stocks de C organique du sol

- Nécessite le prélèvement d'un grand nombre d'échantillons entre 2 dates → très coûteux, risque d'échantillonnage peu représentatif (peut être réduit via une cartographie des propriétés de sol/stratification)

#### Comptabilité des entrées-sorties

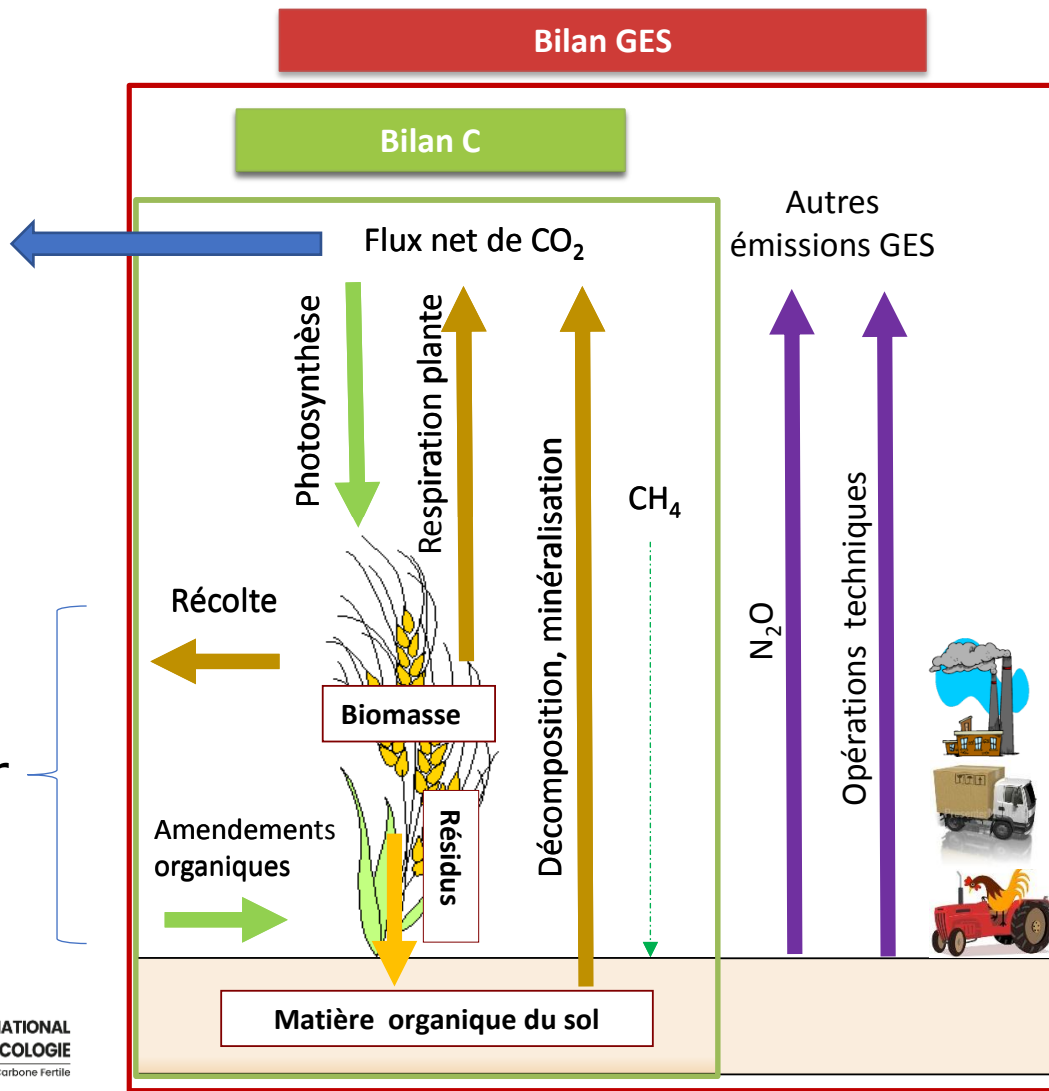
- Approche plus dynamique mais qui nécessite de pouvoir quantifier tous les flux de C entre la parcelle et son environnement (par des mesures ou via la modélisation)



# Approche comptabilité des entrées-sorties et différence entre bilan C et bilan GES



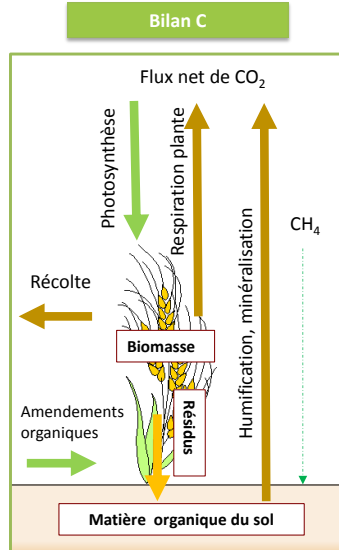
Données agriculteur





# Limites des approches classique entrée-sortie pour une mise en œuvre sur le terrain

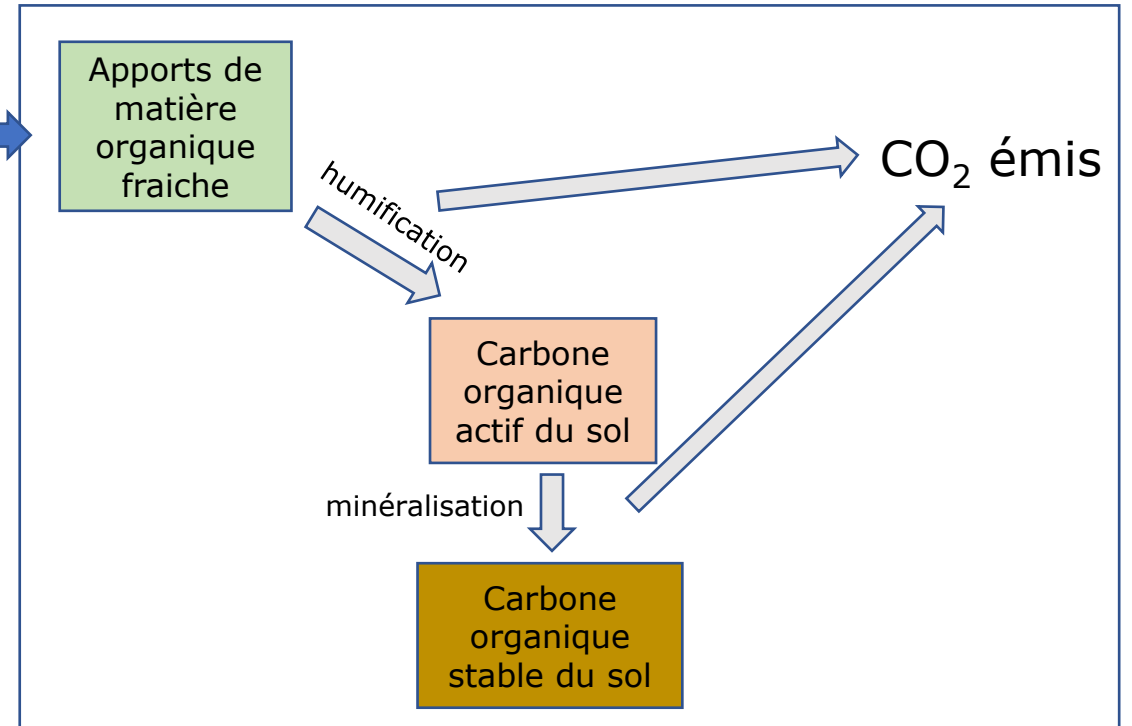
- Souvent axées sur le fonctionnement du sol



## Données d'entrée

- Pratiques :
  - labour,
  - amendements organiques,
- Biomasse moyenne estimée :
  - Culture → part restituée,
  - Couverts végétaux,
- Données climatiques
- Analyses de sol (texture, teneur en MO...)

## Exemple de modèle sol

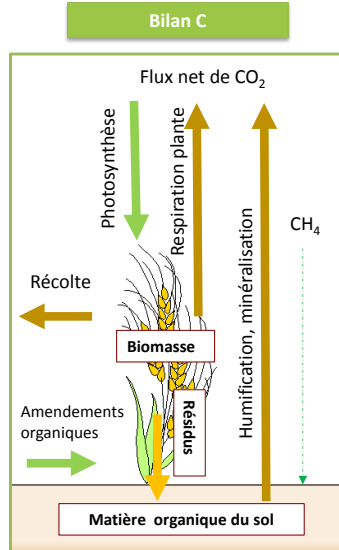




Le carbone, c'est la vie!

# Limites des approches classique entrée-sortie pour une mise en œuvre sur le terrain

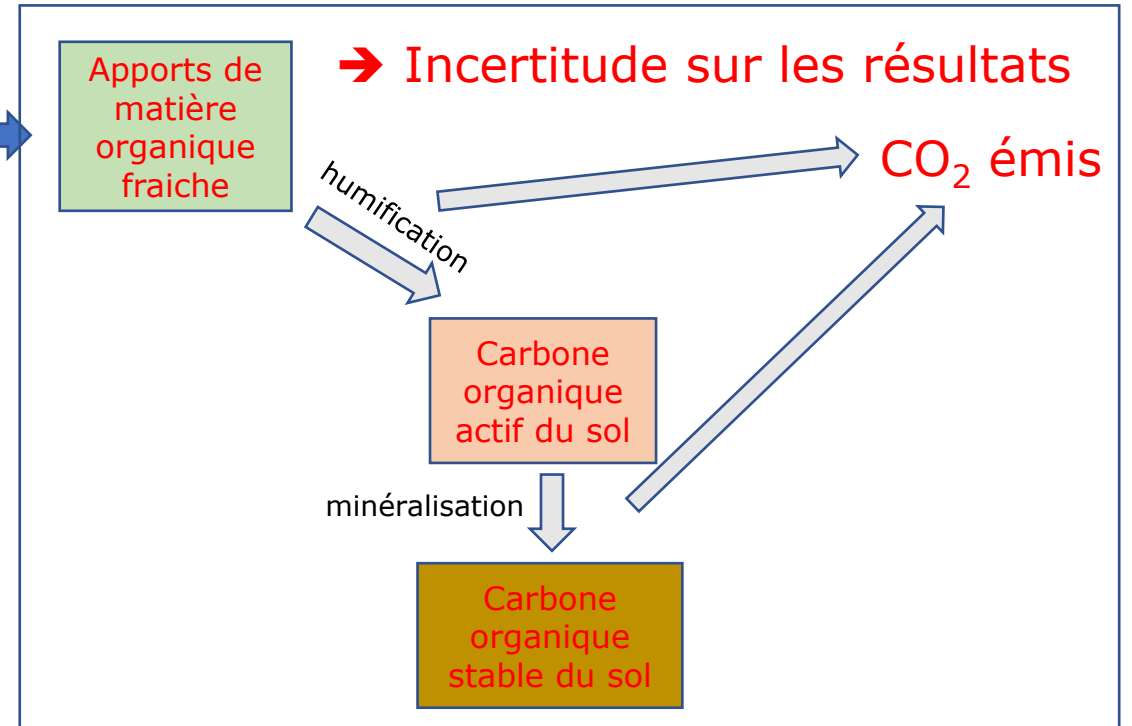
- Souvent axées sur le fonctionnement du sol



## Données d'entrée

- Pratiques :
  - labour,
  - amendements organiques,
- Biomasse moyenne estimée :
  - Culture → part restituée,
  - Couverts végétaux,
- Données climatiques
- Analyses de sol (texture, teneur en MO...)

## Exemple de modèle sol



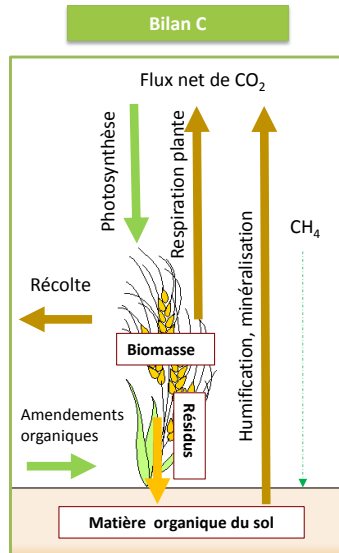
Forte hétérogénéité spatiale !!!



Le carbone, c'est la vie!

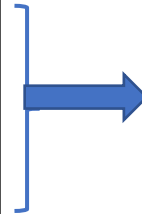
# Limites des approches classique entrée-sortie pour une mise en œuvre sur le terrain

- Souvent axées sur le fonctionnement du sol

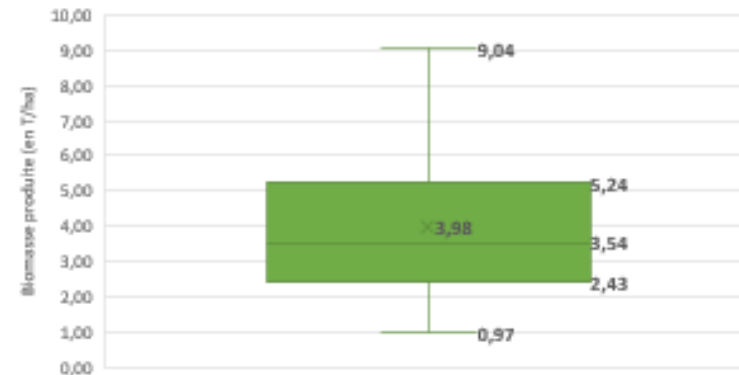


## Données d'entrée

- Pratiques :
  - labour,
  - amendements organiques,
- Biomasse moyenne estimée :
  - Culture → part restituée,
  - Couverts végétaux,
- Données climatiques
- Analyses de sol (texture, teneur en MO...)



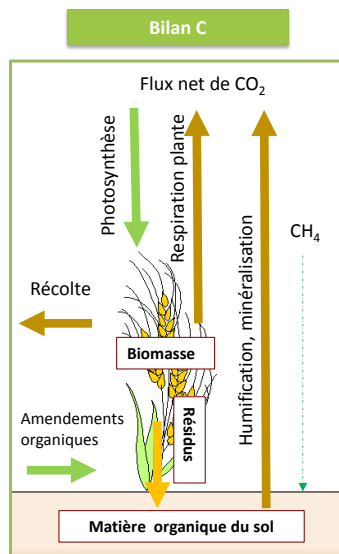
Variabilité des biomasses de couvert végétaux dans le réseau de producteur de Natais en 2019



Source Natais

**Forte hétérogénéité spatiale !!!**



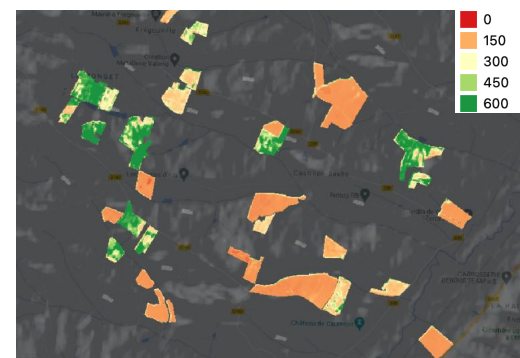


- Souvent axées sur le fonctionnement du sol

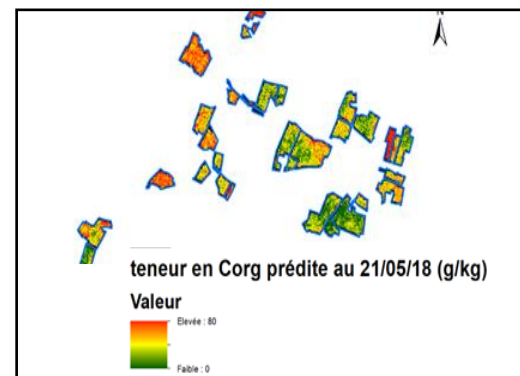
## Données d'entrée

- Pratiques :
  - labour,
  - amendements organiques,
- Biomasse moyenne estimée :
  - Culture → part restituée,
  - Couverts végétaux,
- Données climatiques
- Analyses de sol (texture, teneur en MO...)

Apport de la télédétection pour la cartographie :



- des biomasses de cultures et couverts végétaux

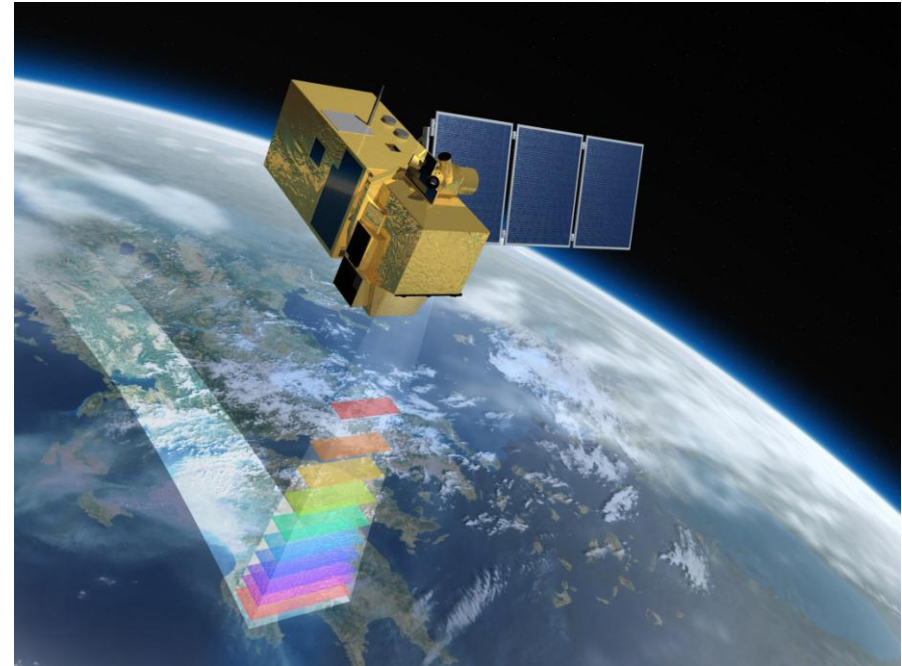


- des propriétés de sol

**Forte hétérogénéité spatiale !!!**

## Les nouveaux satellites au service de l'agriculture

- Exemple de la constellation Sentinel-2 de l'Agence Spatiale Européenne
- 2 satellites en orbite depuis 2017,
- 13 longueurs d'ondes d'observation,
- 10 m de résolution,
- Une nouvelle image acquise tous les 5 jours (par temps clair),
- Sur tout le globe !
- Données gratuites, accessible à tous, facilement téléchargeables et utilisables par les non experts.



Crédits image : CLS



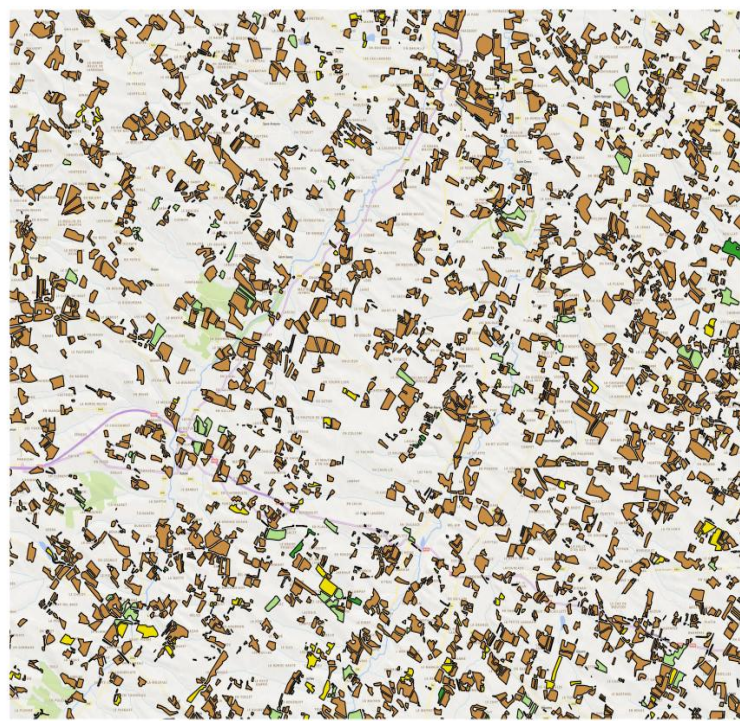
Possibilité de développer des services opérationnels pour l'agriculture



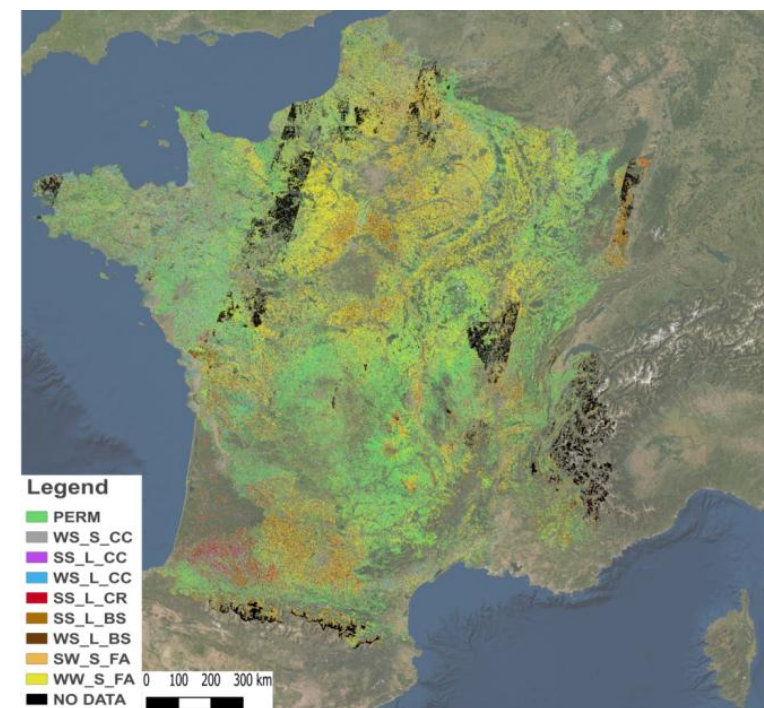
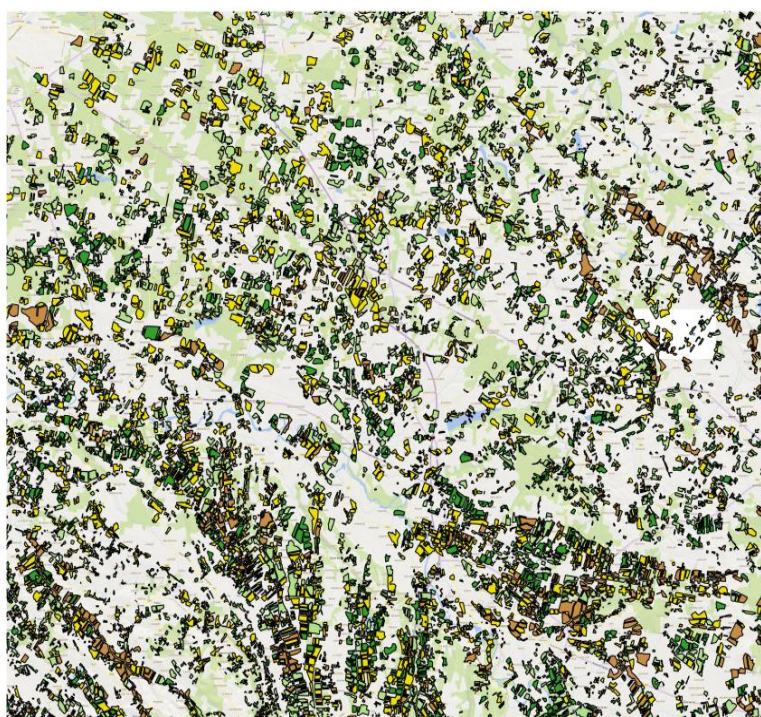
# Les nouveaux satellites au service de l'agriculture

- Pour la cartographie des intercultures...

Autour de Gimont



Autour d'Aire sur Adour

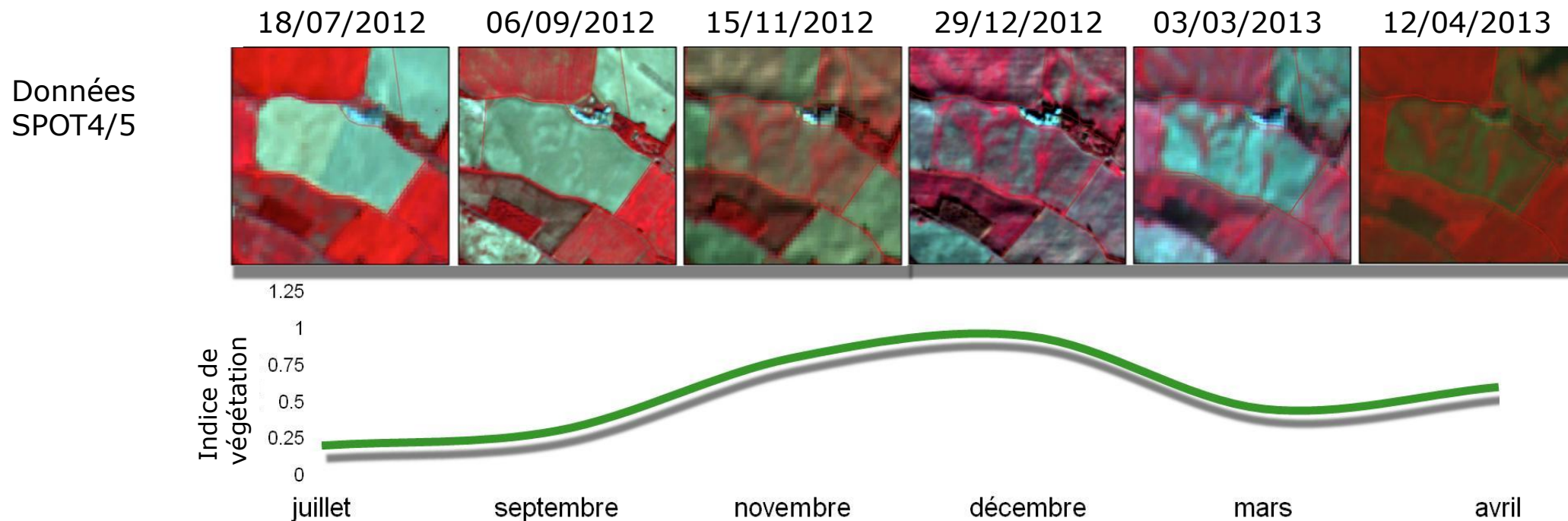


Cartographie des intercultures  
(collaboration CNES/KERMAP/CESBIO)



## Les nouveaux satellites au service de l'agriculture

- Pour la cartographie des dynamiques de croissance des cultures et couverts végétaux



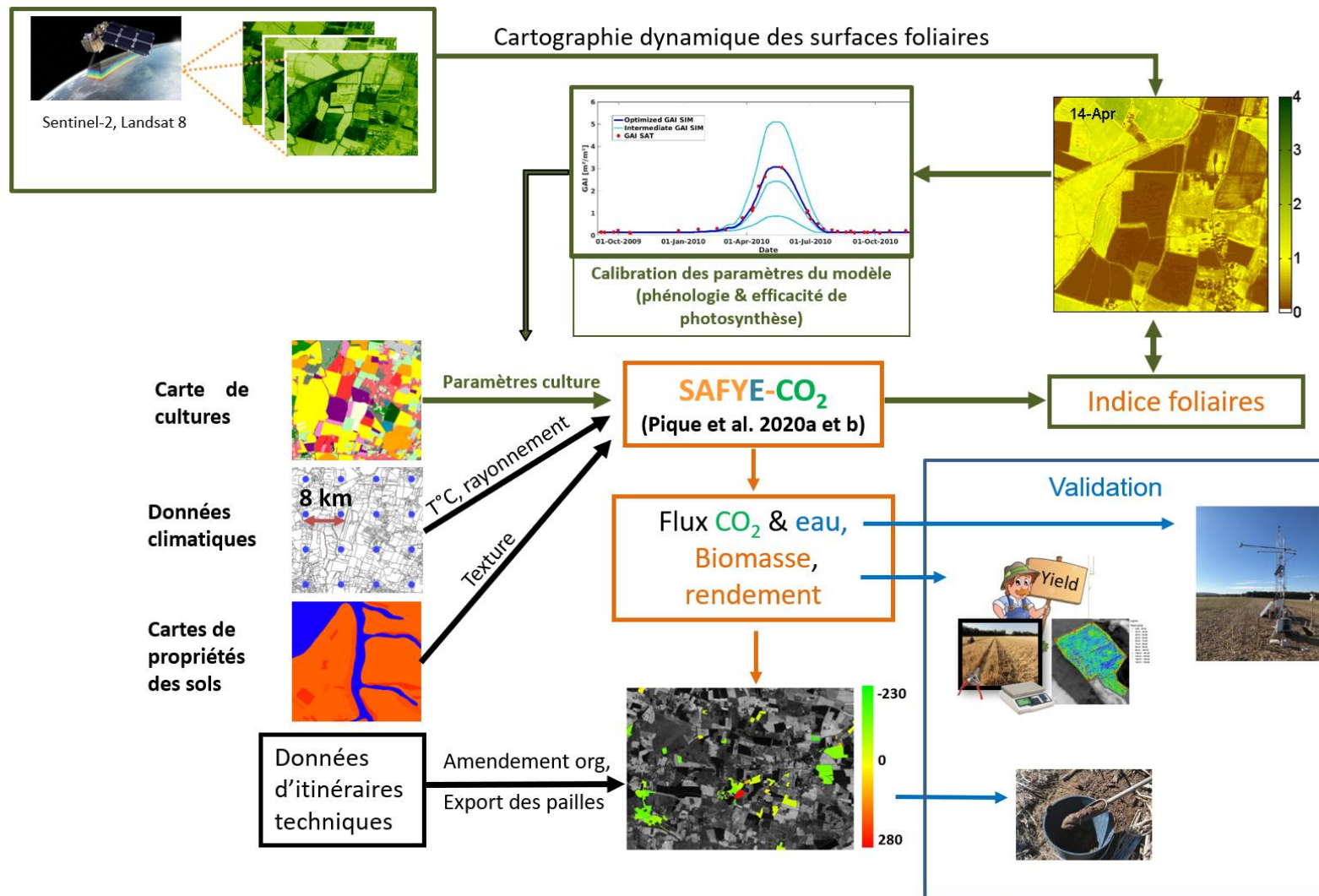
**AUCUN MODÈLE AGRONOMIQUE NE PEUT PRÉDIRE CETTE HÉTÉROGÉNÉITÉ DE LEVÉE ET LES IMPACTS SUR LES BILANS C**



Initiée il y a 10 ans...

## Objectif :

- 1) Obliger le modèle de culture (SAFYE-CO2) à reproduire la dynamique et l'intensité de développement de la culture vue par satellite → biomasses plus précises et objectives, prise en compte implicite des stress (N, eau...) et de certaines pratiques,
- 2) Processus de minéralisation matière de la organique volontairement très simple (car forte incertitude des cartes propriétés de sol)



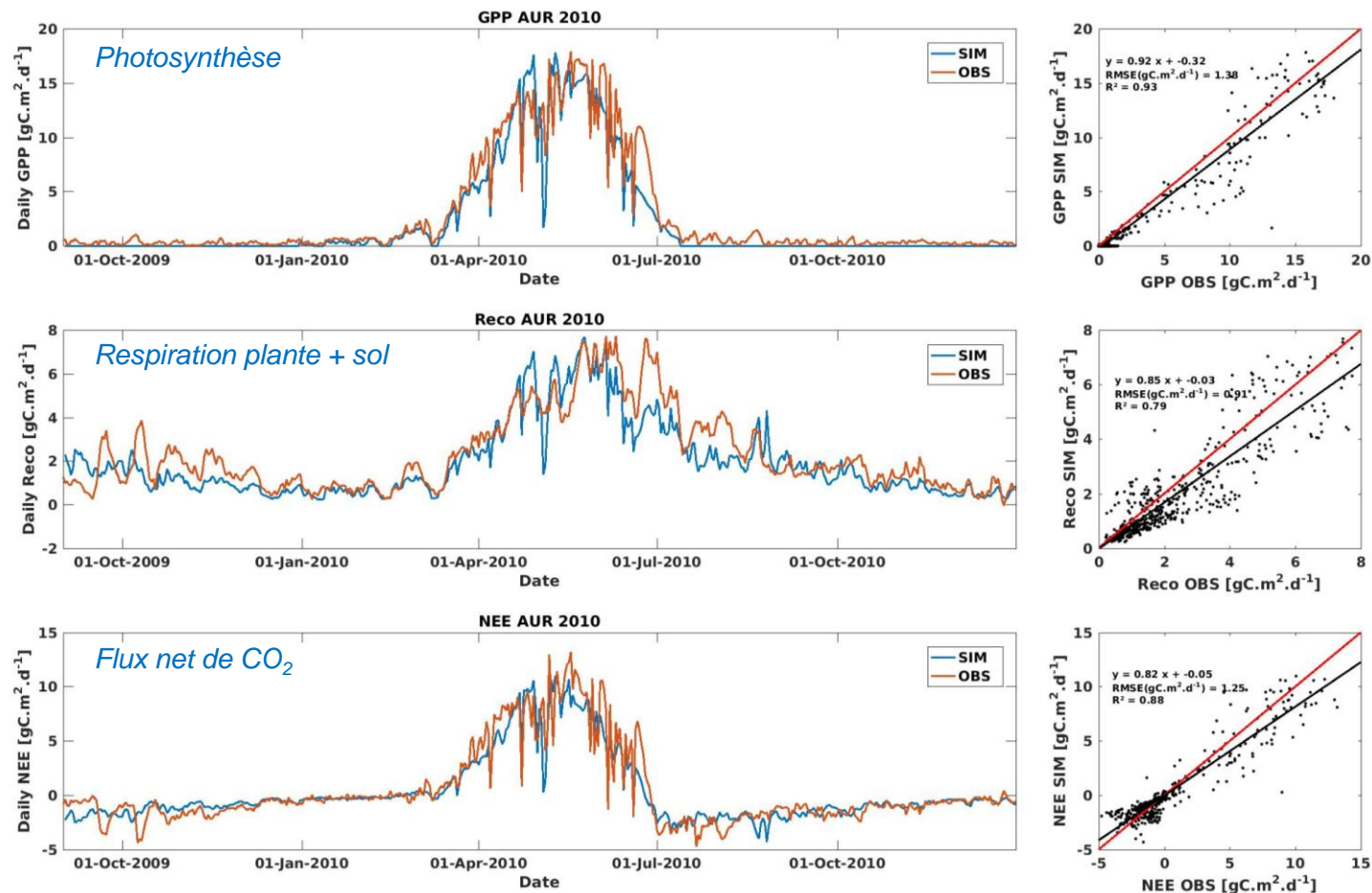
# Exemple de résultats et précision de l'approche : estimation des flux de CO<sub>2</sub>



- Très bon accord mesures/modèle
- Performances statistiques pour les flux nets de CO<sub>2</sub> sur 8 années de mesures : : **R<sup>2</sup> = 0,86** ; **RMSE = 1,29gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>**

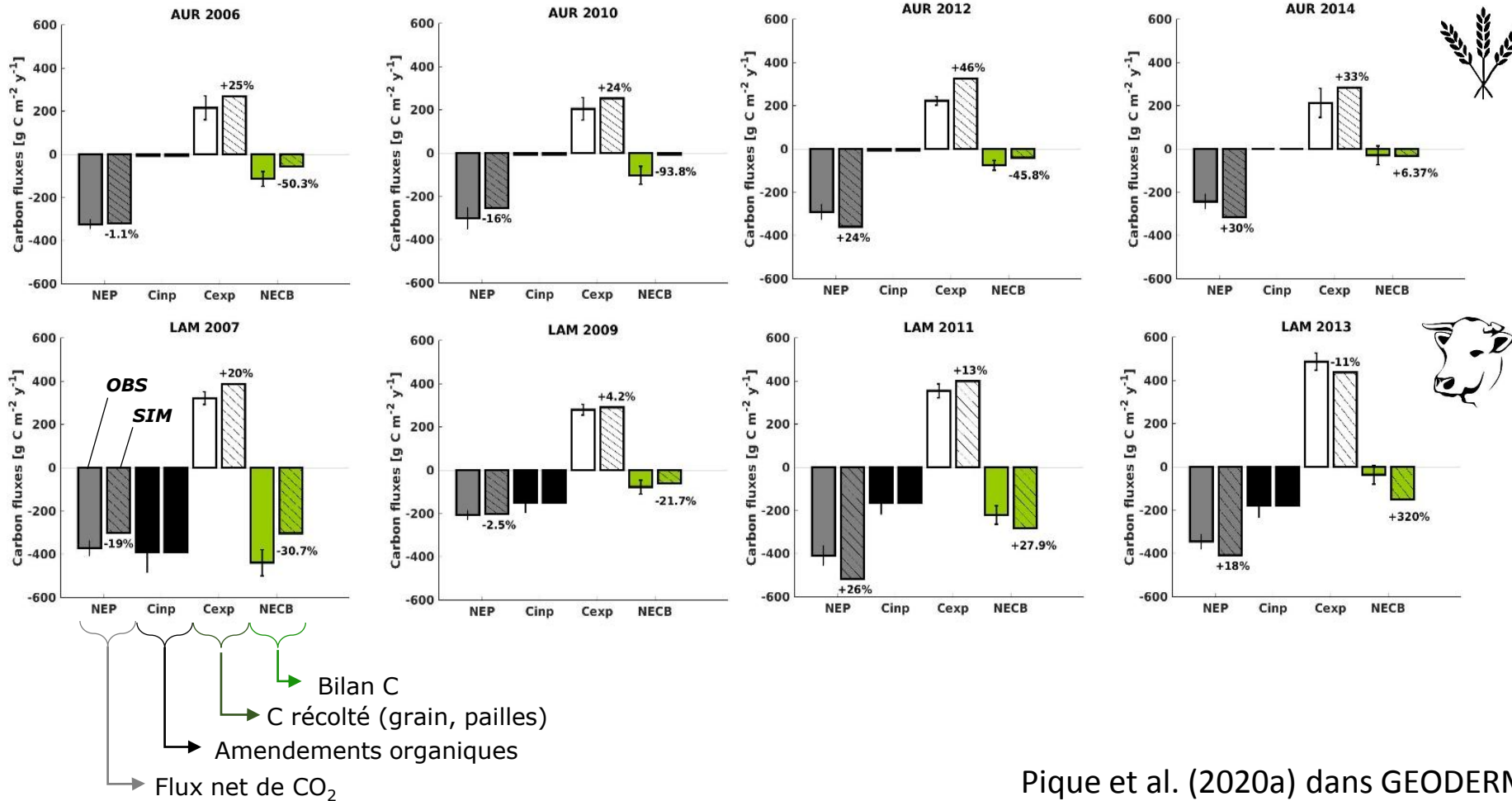
➔ Possibilité de calculer le bilan carbone sur l'année culturale

## Dynamique des flux de CO<sub>2</sub> pour le blé (site d'Auradé en 2010)

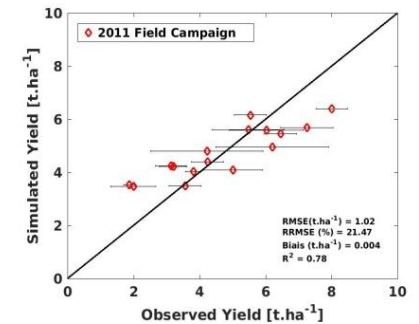


# Exemple de résultats et précision de l'approche : bilans de C à la parcelle

Comparaison des simulations des composantes du bilan C avec des données in-situ pour 8 années de blé sur 2 parcelles appartenant à des fermes céréalière et laitière



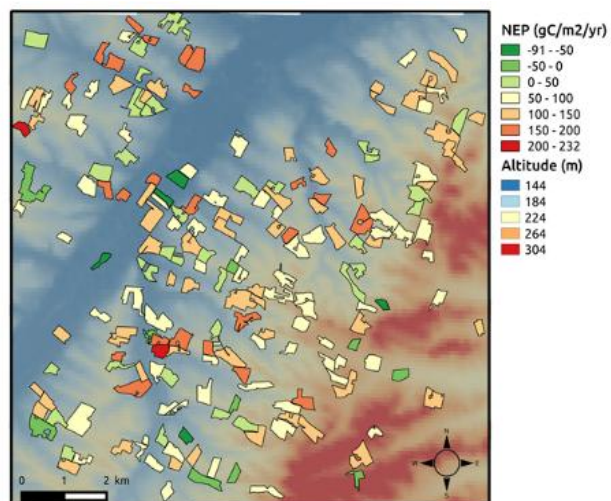
- 1.8 < Erreur bilan C < 135 gC.m<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>
- Dans la gamme des modèles sols classiques **mais avec très peu de données sur les pratiques,**
- Incertitude sur donnée rendement agriculteur (moyennes exploitation) → incertitude sur les bilans C in situ mais réduite quand on utilise nos propres données de rendement.



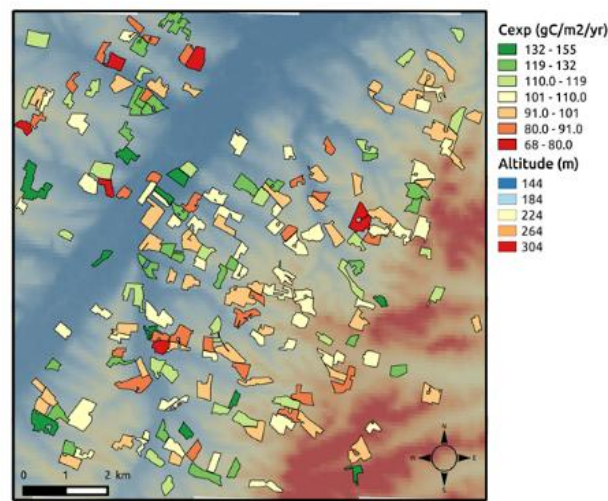


# Variabilité spatiale des bilans C pour les tournesols

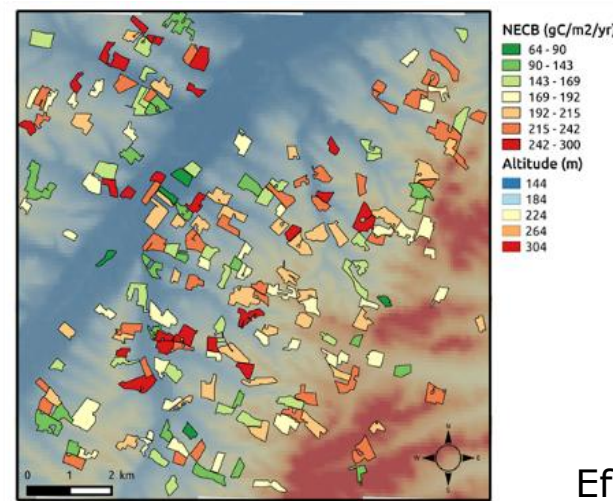
Pique et al (2020b) dans Remote Sensing



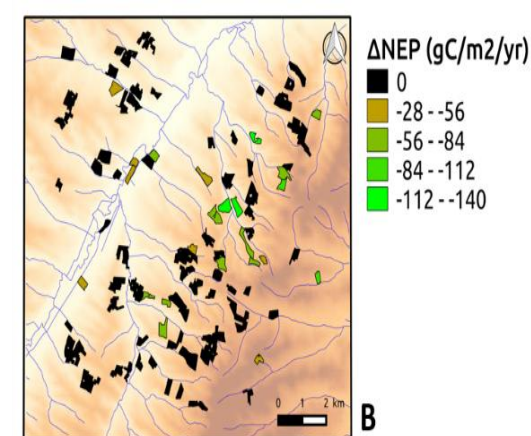
Flux net de CO<sub>2</sub>



C récolté



Bilan C



Effet des repousses/adventices/couverts estivaux sur les flux nets annuels de CO<sub>2</sub> → seule une approche satellitaire comme SAFYE-CO2 permet de le faire

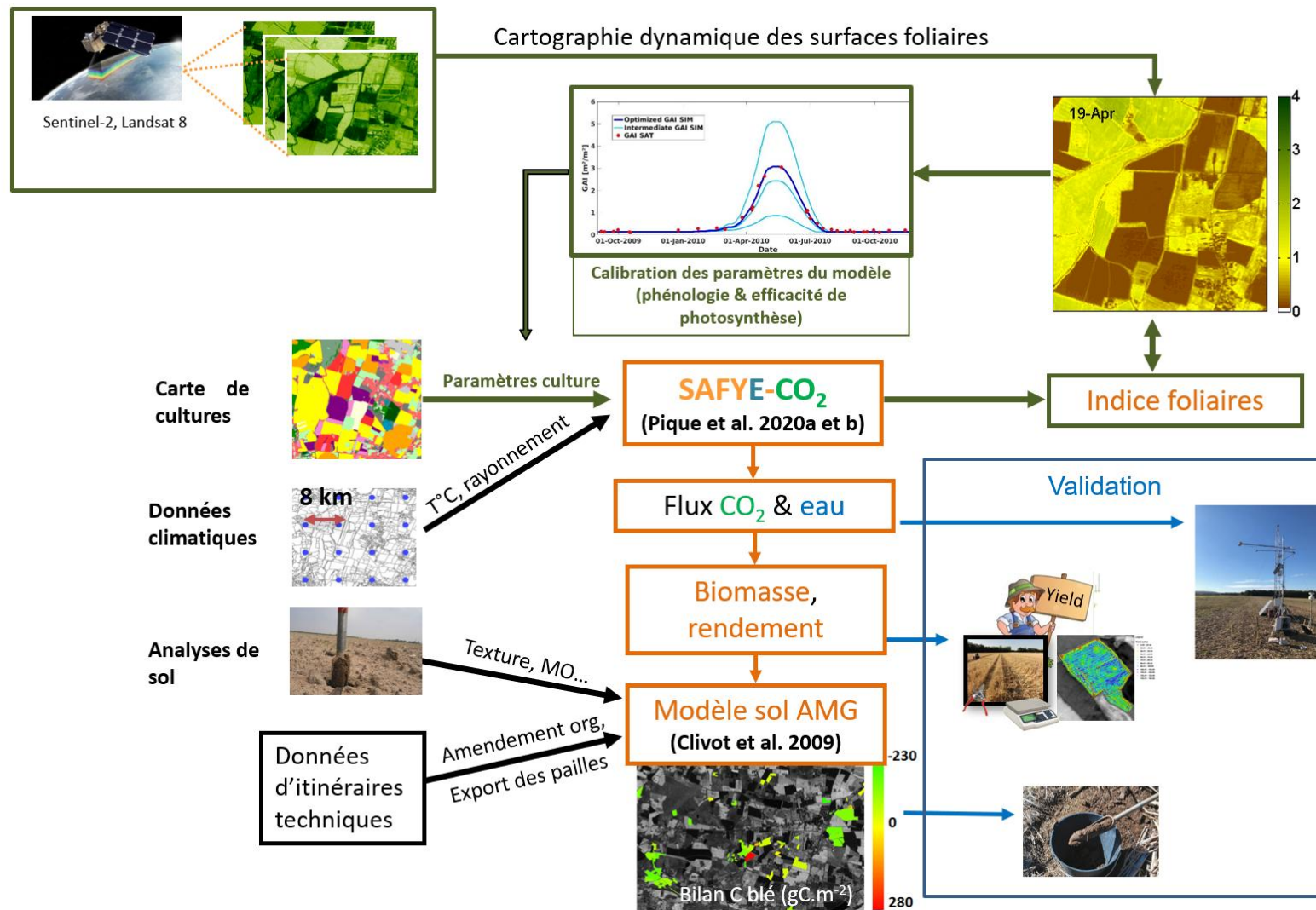
Mais deux limites fortes à cette approche :

- Pas de simulation de l'évolution des pools de matière organique du sol → **pas éligible Label Bas Carbone**,
- Méthode de calibration du modèle très lente → analyses limitées à quelques milliers d'objets et estimation moyenne à la parcelle : **pas satisfaisant vu la variabilité spatiale fine des développements de la végétation.**



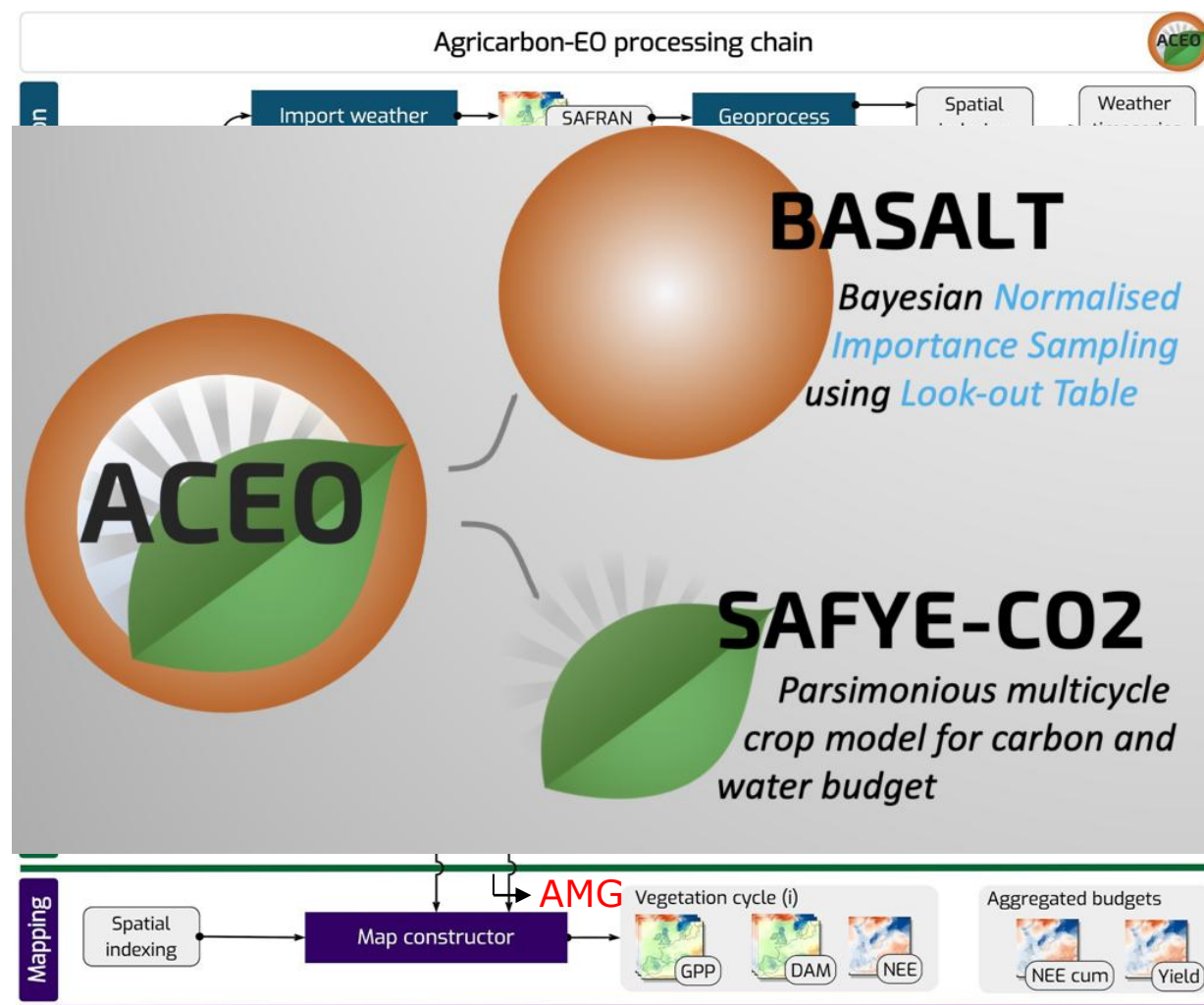
# Première amélioration : couplage SAFYE-CO2/AMG

- Ce couplage avec le modèle sol (AMG) devient pertinent quand des données de propriétés de sol plus précises sont disponibles en entrée du modèle sol,
- C'est le cas dans le cadre du Label bas Carbone ou du marcher volontaire du Carbone → analyses de sol sont réalisées en amont des projets.



## Seconde amélioration : chaine AgriCarbon-EO

Approche très innovante qui ouvre la possibilité d'analyses à 10m de résolution sur de grands territoires avec analyses d'incertitudes



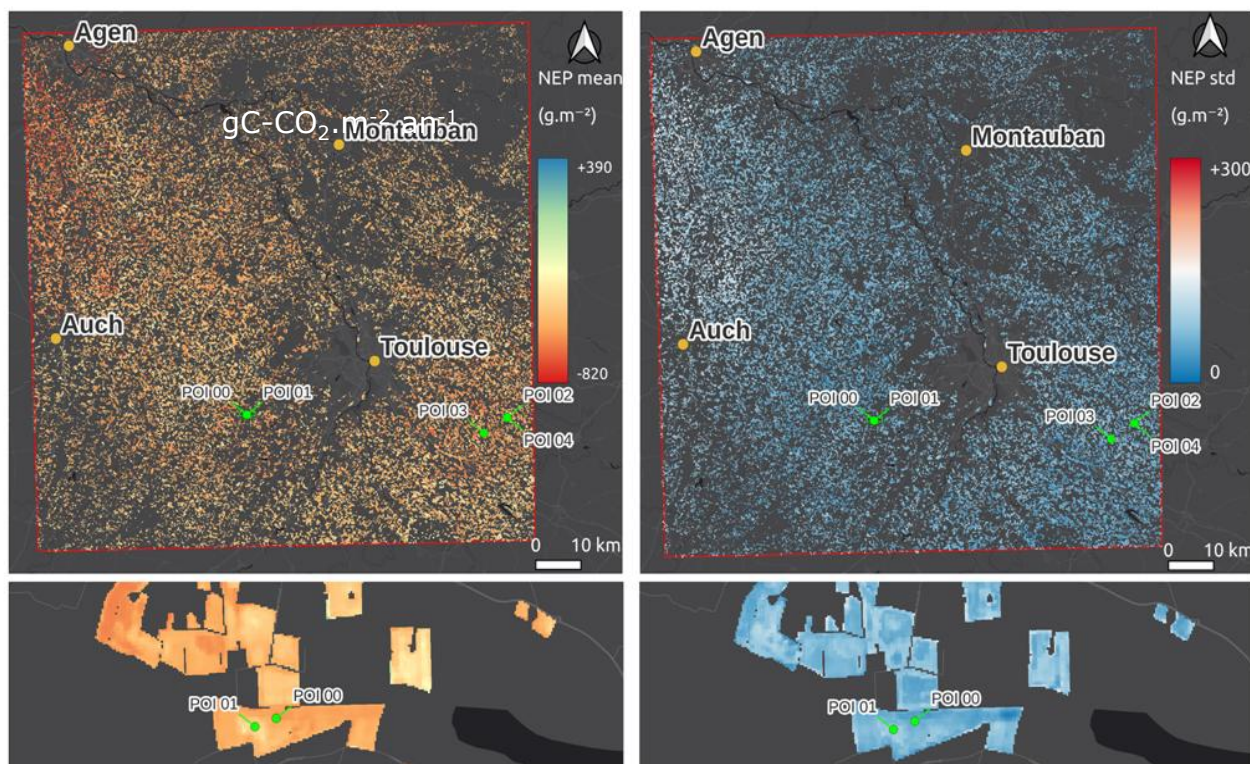
### (Al Bitar & Wijmer et al. soumis)

- Génération de la grille spatio-temporelle de simulation
- Téléchargement (API) et mise en forme des données d'entrée :
  - Images satellites
  - Données météorologiques et sol
  - Et bientôt Itinéraires techniques
- Calcul des surface foliaires (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 ou variables à un temps t ou de variables intégrées
  - Calcul de statistiques de précision
  - Utilisation des sorties de SAFYE-CO2 (biomasse restituée) → modèle sol AMG pour le calcul des bilans C



Thèse de Taeken Wijmer co- financée par NIVA et Naturellement Popcorn

## Flux net annuel de CO<sub>2</sub> à 10m de résolution pour des blés en 2017 (moyenne à gauche et incertitude à droite)



## (Al Bitar & Wijmer et al. soumis)

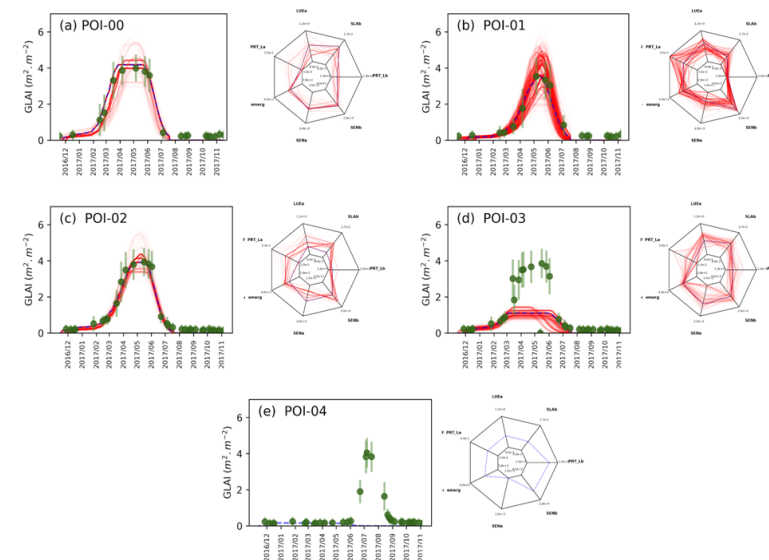
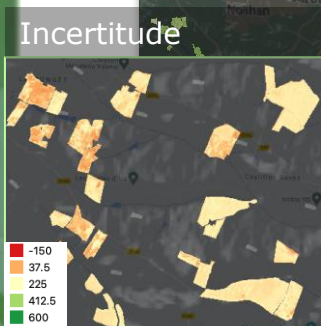
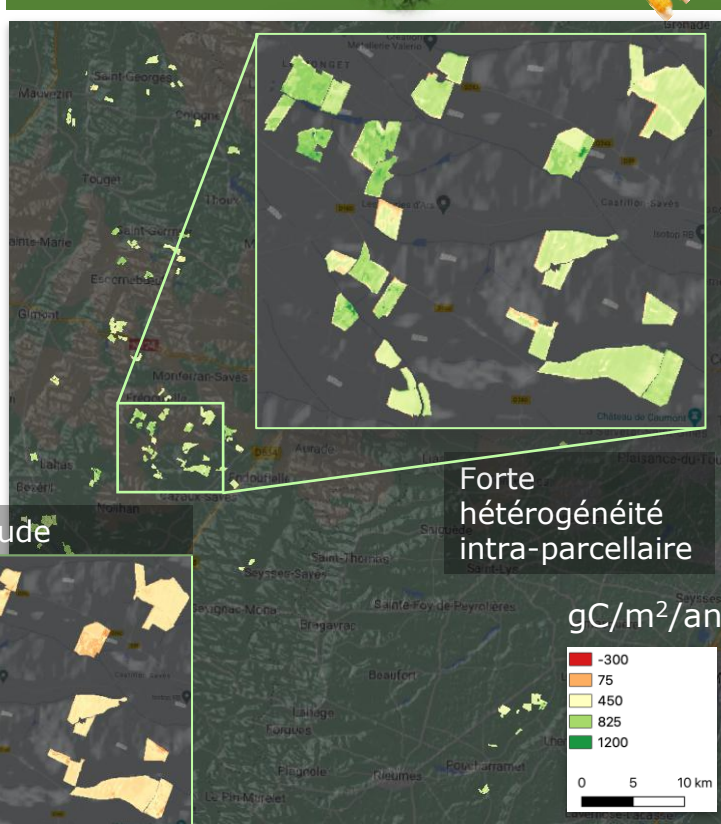


Illustration des simulations pour 5 pixels d'intérêts :

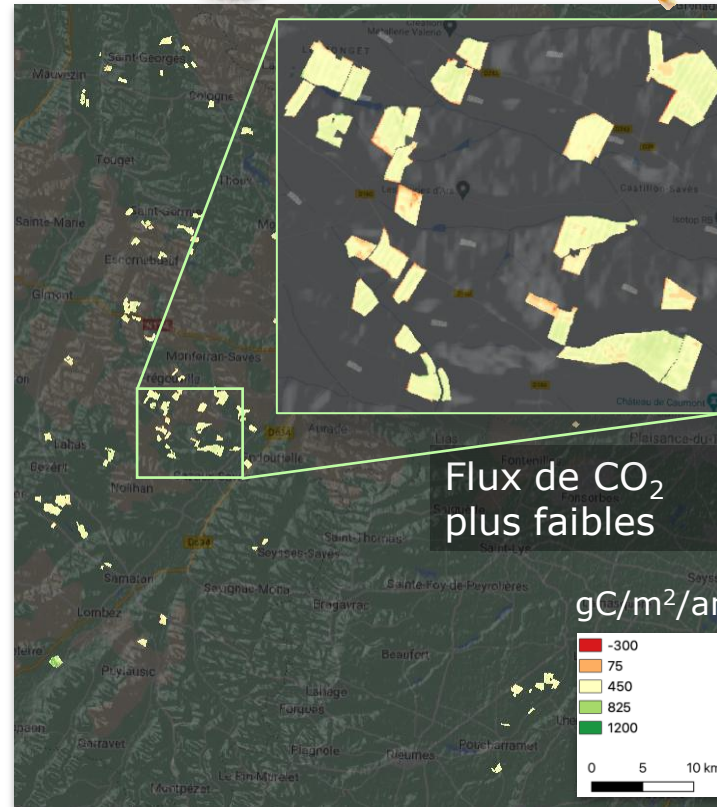
- a et b - pixels dans la même parcelle
- c et d - effet d'un nuage non filtré
- e - erreur du RPG (mauvaise déclaration ou accident de culture)

## Double exercice de simulation :

Culture intermédiaire + Maïs

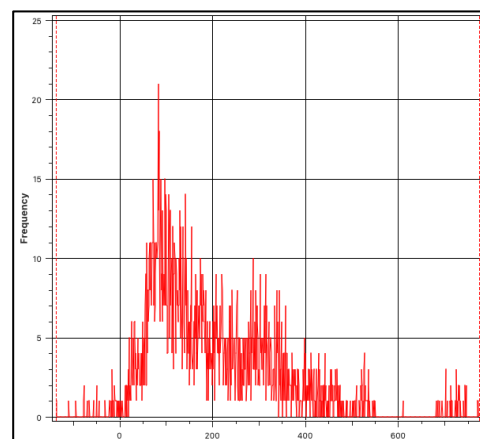


Sol nu + Maïs



## Distribution des différences entre les 2 simulations

Nombre de pixels concernés

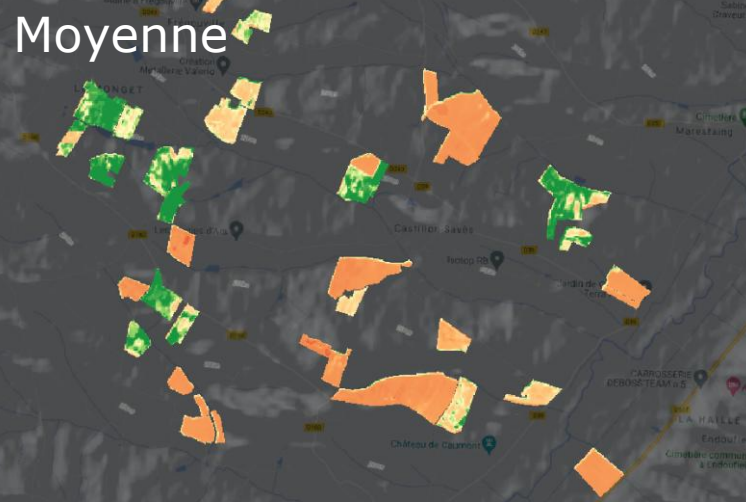


Soit en moyenne 200gC de MS/ha/an ou environ 0,3 t C/ha stocké par an (ou 1,1 t de CO<sub>2</sub>-eq stocké/ha/an)



## Couverts de féverole

Faibles biomasses et très hétérogènes

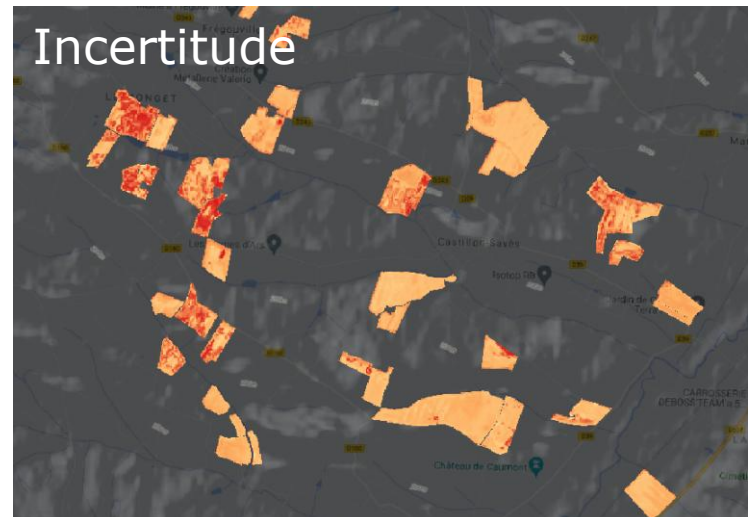
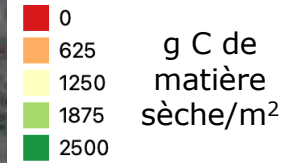
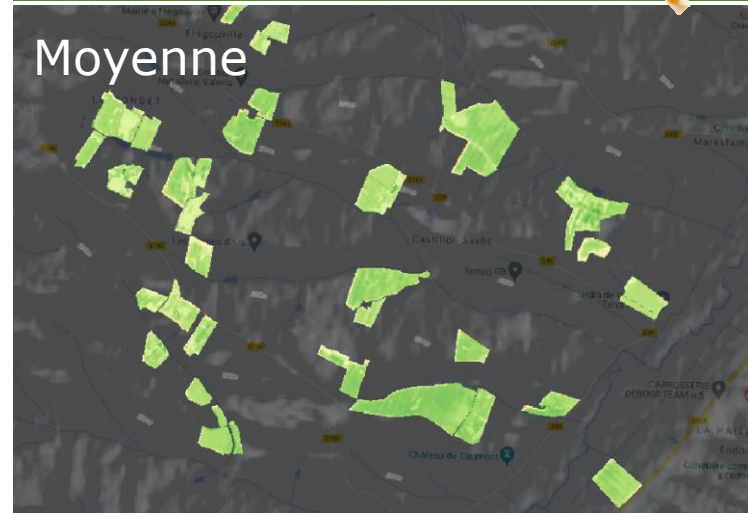


Incertitude relative assez élevée

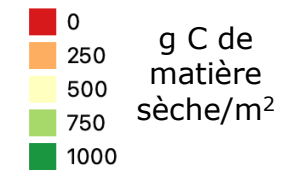


## Maïs popcorn

Biomasses élevées typiques et assez homogènes



Incertitude variable au sein des parcelles mais moins que pour les couverts



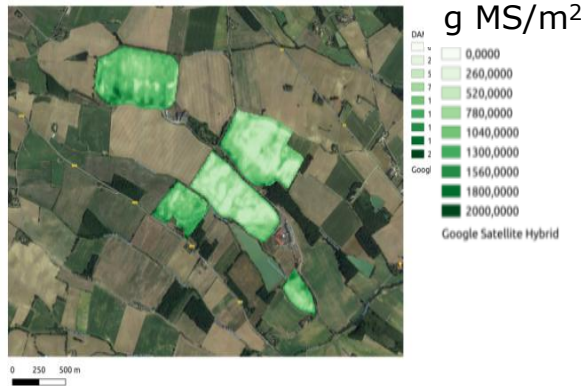
# Calcul de bilan C à haute résolution



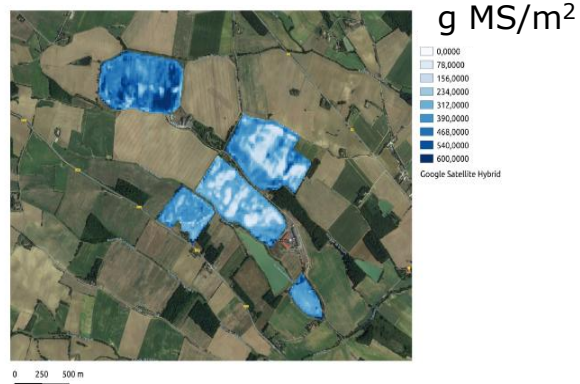
**Projet Naturellement popcorn** → les agriculteurs peuvent recevoir une prime selon la quantité de C qu'ils stockent dans le sol avec des cultures de couverture



Biomasse de cultures + Incertitudes



Biomasse de couverts + Incertitudes



+ données d'itinéraires techniques et modèle sol AMG

**Première carte de bilans C à 10m de résolution C en 2019, pour des parcelles en rotation couverts/maïs/blé (Ferme de Villeneuve, Bézéril, France)**



Stockage C par le sol 

Destockage C par le sol 



## A quoi ça sert d'estimer des bilans C à 10m de résolution ?

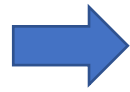
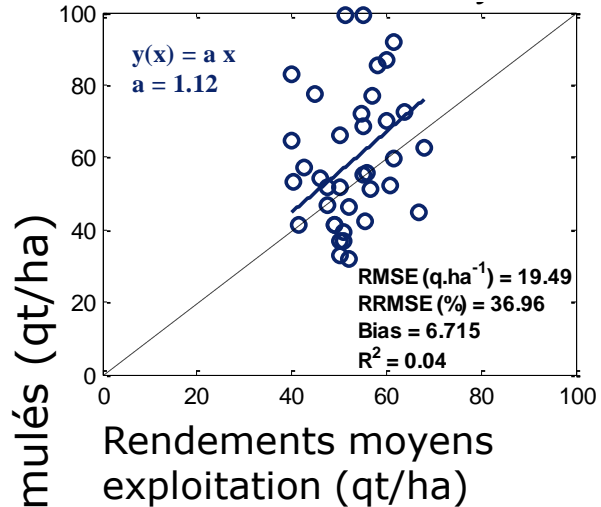


- Permet d'analyser l'impact de l'hétérogénéité du sol, des maladies...sur la biomasse restituée et donc les bilans C → analyse agronomique des leviers d'amélioration (agriculture de précision),
- Utilisation possible de ces cartes pour définir en amont des projets de stockage C un plan d'échantillonnage du sol :
  - → échantillonnage plus représentatif des dynamiques de stockage/déstockage au sein des parcelles,
  - Besoin de prélever moins d'échantillons pour évaluer la dynamique moyenne de stockage/déstockage de la parcelle/de l'exploitation → économie substantielle
- Possibilité de valider les bilans carbone !!! Mais aussi les variables intermédiaires (biomasse, rendement...)

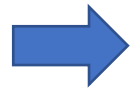
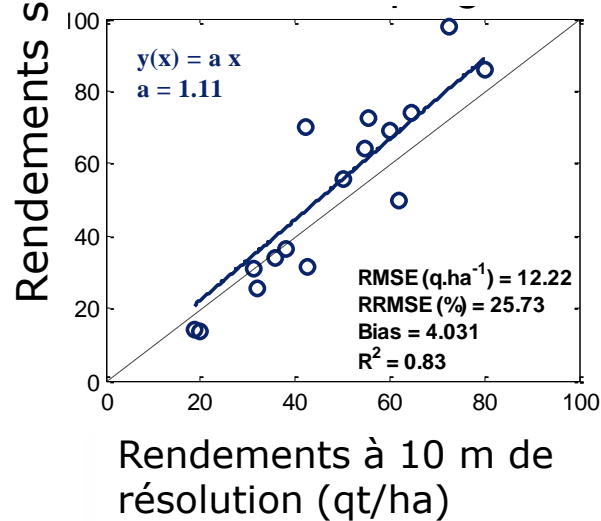


## A quoi ça sert d'estimer des bilans C à 10m de résolution ?

Démonstration avec les rendements :



Gomme la variabilité observée sur le terrain : impossible de valider le modèle

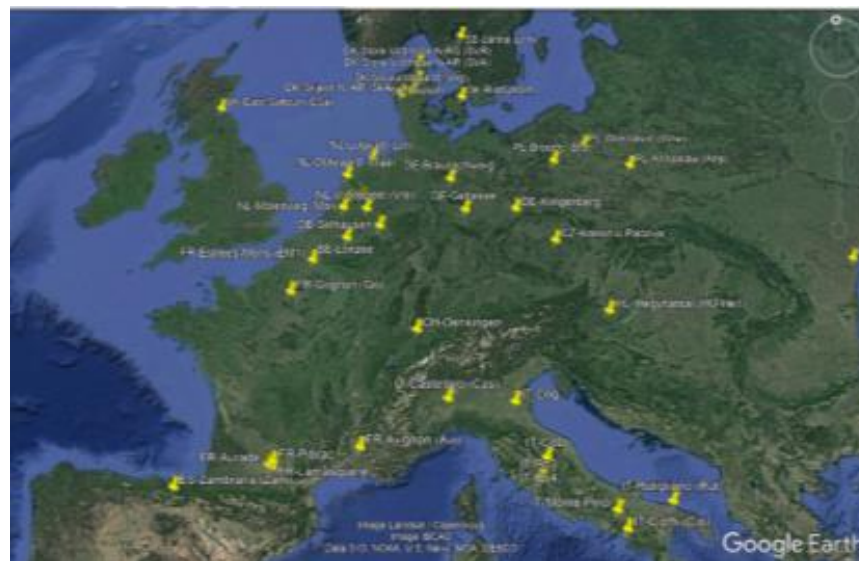


Tient compte de la variabilité observée sur le terrain : possibilité de valider le modèle

- Permet d'analyser l'impact de l'hétérogénéité du sol, des maladies...sur la biomasse restituée et donc les bilans C → analyse agronomique des leviers d'amélioration (agriculture de précision),
- Utilisation possible de ces cartes pour définir en amont des projets de stockage C un plan d'échantillonnage du sol :
  - → échantillonnage plus représentatif des dynamiques de stockage/déstockage au sein des parcelles,
  - Besoin de prélever moins d'échantillons pour évaluer la dynamique moyenne de stockage/desctokage de la parcelle/de l'exploitation → économie substantielle
- Possibilité de valider les bilans carbone !!! Mais aussi les variables intermédiaires (biomasse, rendement...)

## Perspectives d'amélioration

- Cette approche ne permet pour le moment d'estimer les biomasses que sur quelques grandes cultures (blé, maïs, tournesol, colza) et types de couverts végétaux → étendre l'approche à d'autres cultures/couverts voire les prairies temporaires pour pouvoir simuler la plupart des rotations de culture (action CROP 2021, 2 thèses qui démarrent → A. Ihasusta & A. Géraud),



Stations de flux du réseau Européen ICOS

## Perspectives d'amélioration

- Cette approche ne permet pour le moment d'estimer les biomasses que sur quelques grandes cultures (blé, maïs, tournesol, colza) et types de couverts végétaux → étendre l'approche à d'autres cultures/couverts voire les prairies temporaires pour pouvoir simuler la plupart des rotations de culture (action CROP 2021, thèses A. Ihasusta & T. Wijmer),
- Utilisation d'autres sources de données satellite (radar → Sentinel-1) pour pouvoir suivre le développement des cultures/couverts même en présence de nuages → approche plus opérationnelle (thèses A. Géraud en collab. avec NetCarbon),



## Perspectives d'amélioration

- Cette approche ne permet pour le moment d'estimer les biomasses que sur quelques grandes cultures (blé, maïs, tournesol, colza) et types de couverts végétaux → étendre l'approche à d'autres cultures/couverts voire les prairies temporaires pour pouvoir simuler la plupart des rotations de culture (action CROP 2021, thèses A. Ihasusta & T. Wijmer),
- Utilisation d'autres sources de données satellite (radar → Sentinel-1) pour pouvoir suivre le développement des cultures/couverts même en présence de nuages → approche plus opérationnelle (thèses A. Géraud en collab. avec NetCarbon),
- Utiliser des cartes de propriétés de sol à haute résolution issues d'outils embarqués (terrain) ou de données de télédétection → meilleure précision et représentativité des données sol en entrée du modèle sol AMG (ex. projet Européen EJP Soil Steropes).



## Conclusions

- Nécessité de mettre en œuvre une approche cohérente de simulation/validation des bilans C prenant en compte la variabilité spatiale des restitutions de biomasse et des propriétés de sol (plan d'échantillonnage végétation et sol).

A partir de ce constat:

- Développement d'une approche innovante permettant de réaliser un suivi dynamique (annuel) et plus objectif de l'impact des pratiques sur les bilans C → meilleure prise en compte de l'effet des restitutions de biomasse sur les bilans C,
- Automatisable, applicable à grande échelle, à haute résolution et à un faible coût,
- Adaptée à différents contextes d'application : compensation C au sein des filières agroalimentaires (insetting), marché volontaire du C (offsetting) et Label Bas Carbone, PAC, inventaires nationaux → mise en œuvre dans le cadre de plusieurs projets/initiatives en France (Naturellement popcorn, Solnovo, Quantica) et en Europe avec pour objectif de définir un cadre méthodologique international pour le Monitoring du C (ex. projets ClieNfarms, ORCASA, MARVIC)

# Merci pour votre attention !!



ORCaSa



Naturellement  
popcorn  
**bpi**france  
planet **A**

Pour en savoir plus : <https://www.cesbio.cnrs.fr/agricarboneo/>



Contact : [eric.ceschia@inrae.fr](mailto:eric.ceschia@inrae.fr)