



HAL
open science

**Etude des flux et bilans d'eau, C, GES des
agro-écosystèmes via des approches combinées terrain,
modélisation et télédétection multispectrale à fine
échelle**

Eric Ceschia

► **To cite this version:**

Eric Ceschia. Etude des flux et bilans d'eau, C, GES des agro-écosystèmes via des approches combinées terrain, modélisation et télédétection multispectrale à fine échelle. Master. Toulouse, France. 2022, 105 p. hal-04223086

HAL Id: hal-04223086

<https://hal.inrae.fr/hal-04223086>

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.

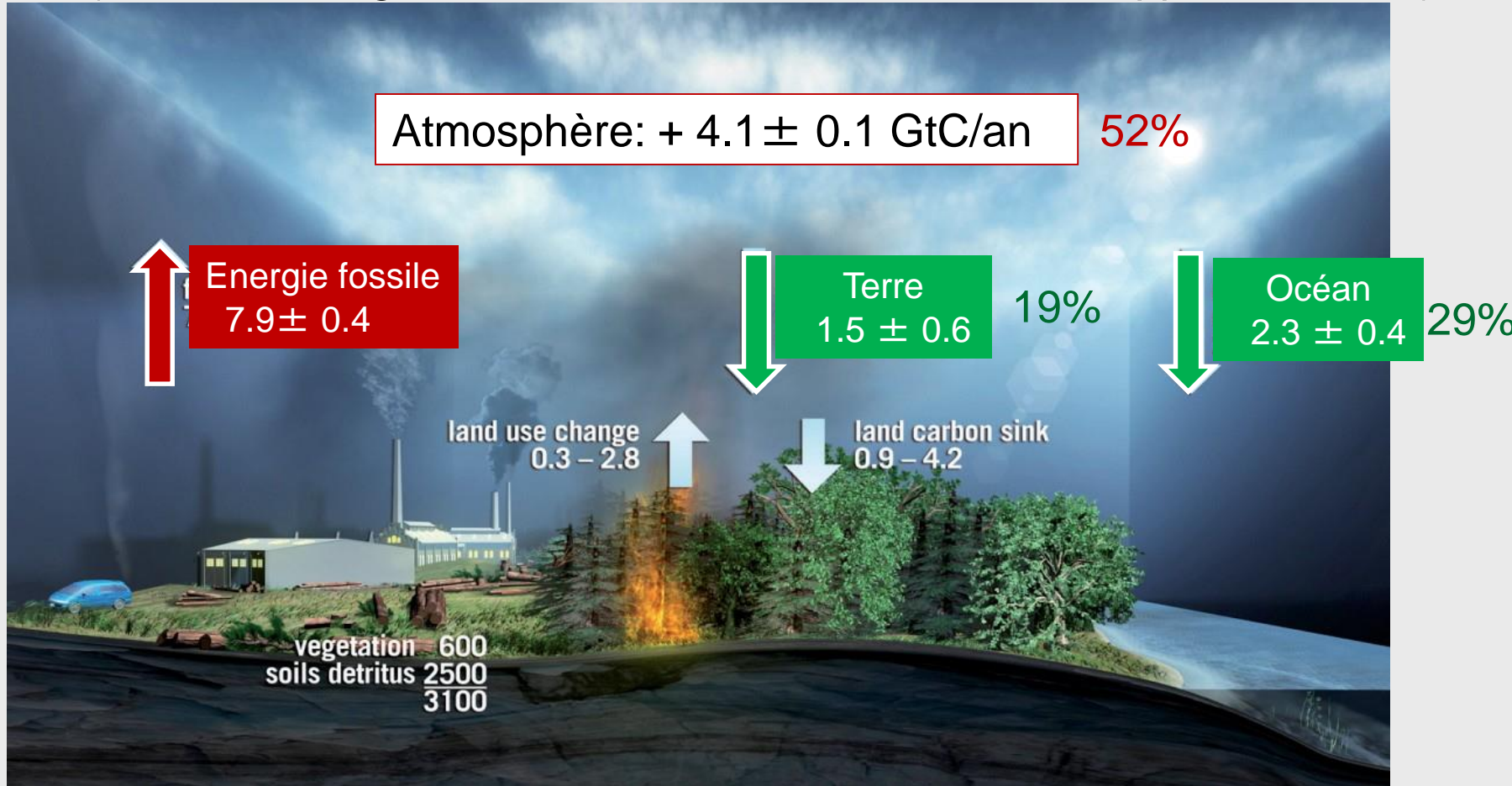


Etude des flux et bilans d'eau, C, GES des agro-
écosystèmes via des approches combinées terrain,
modélisation et télédétection multispectrale à fine
échelle



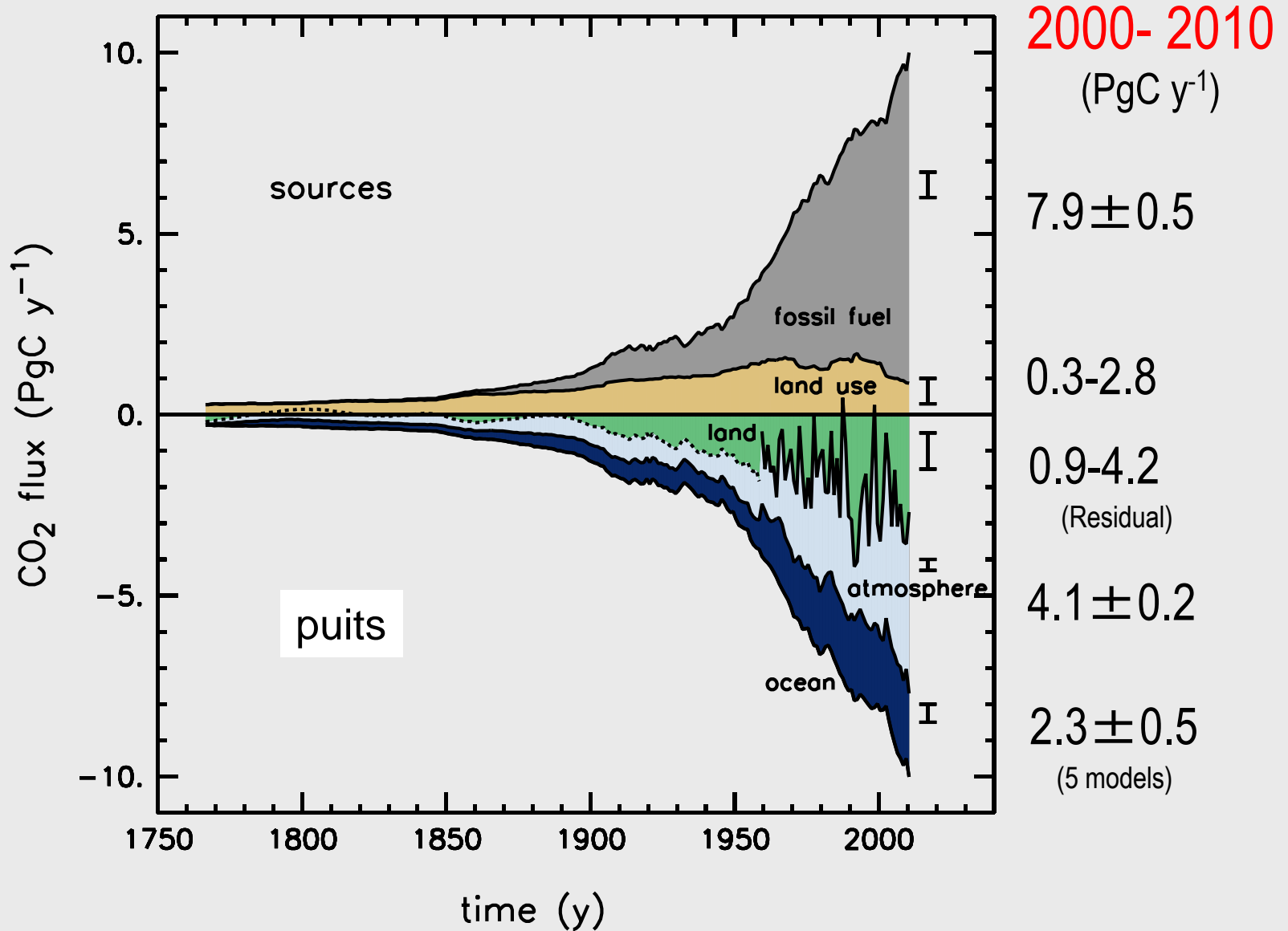
Le cycle du carbone 2000-2009

(Valeurs en Giga tonne de carbone issues du futur rapport du GIEC)

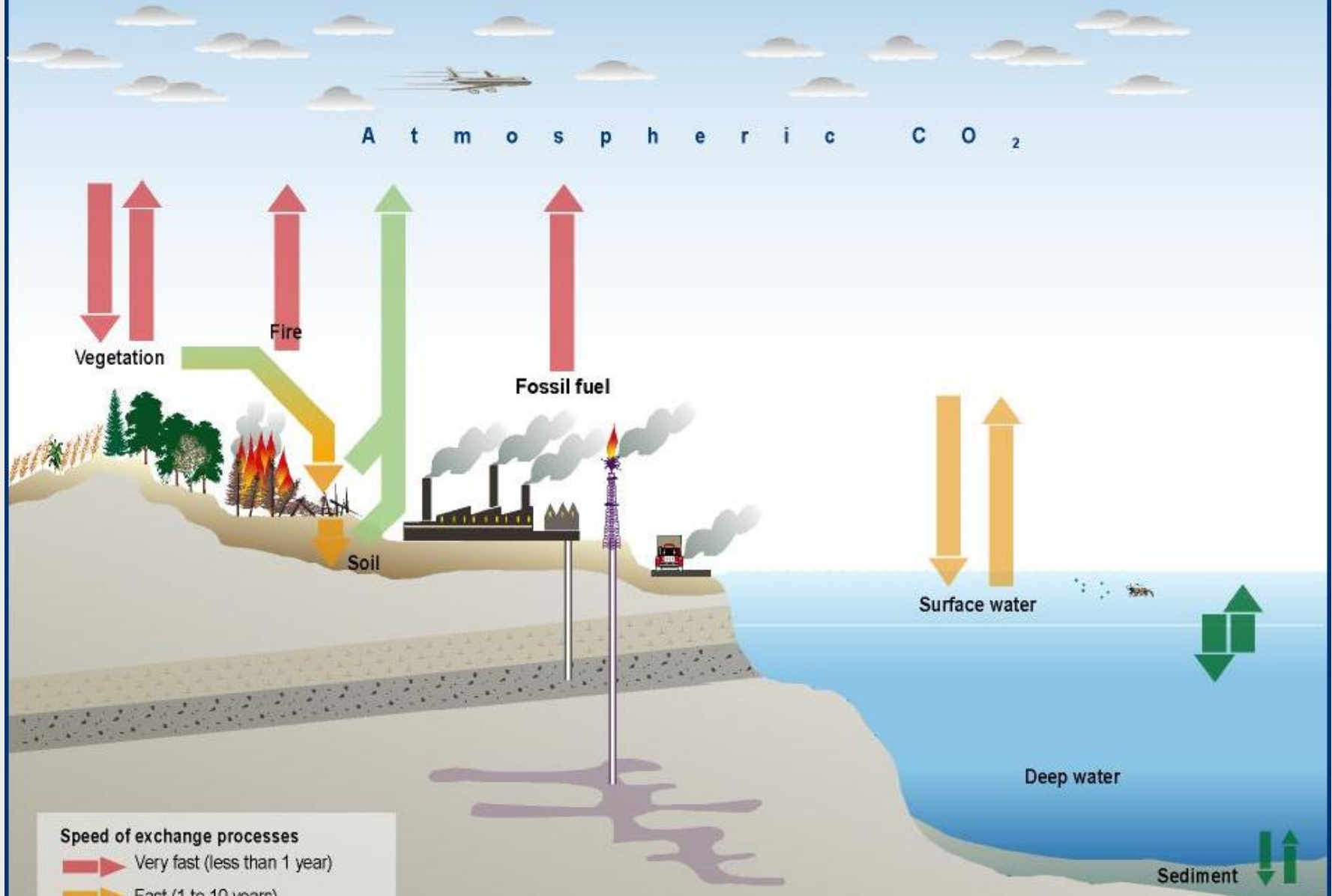


1 Giga tonne = 10^9 tonne (1 milliard de tonnes)

Bilan de carbone global

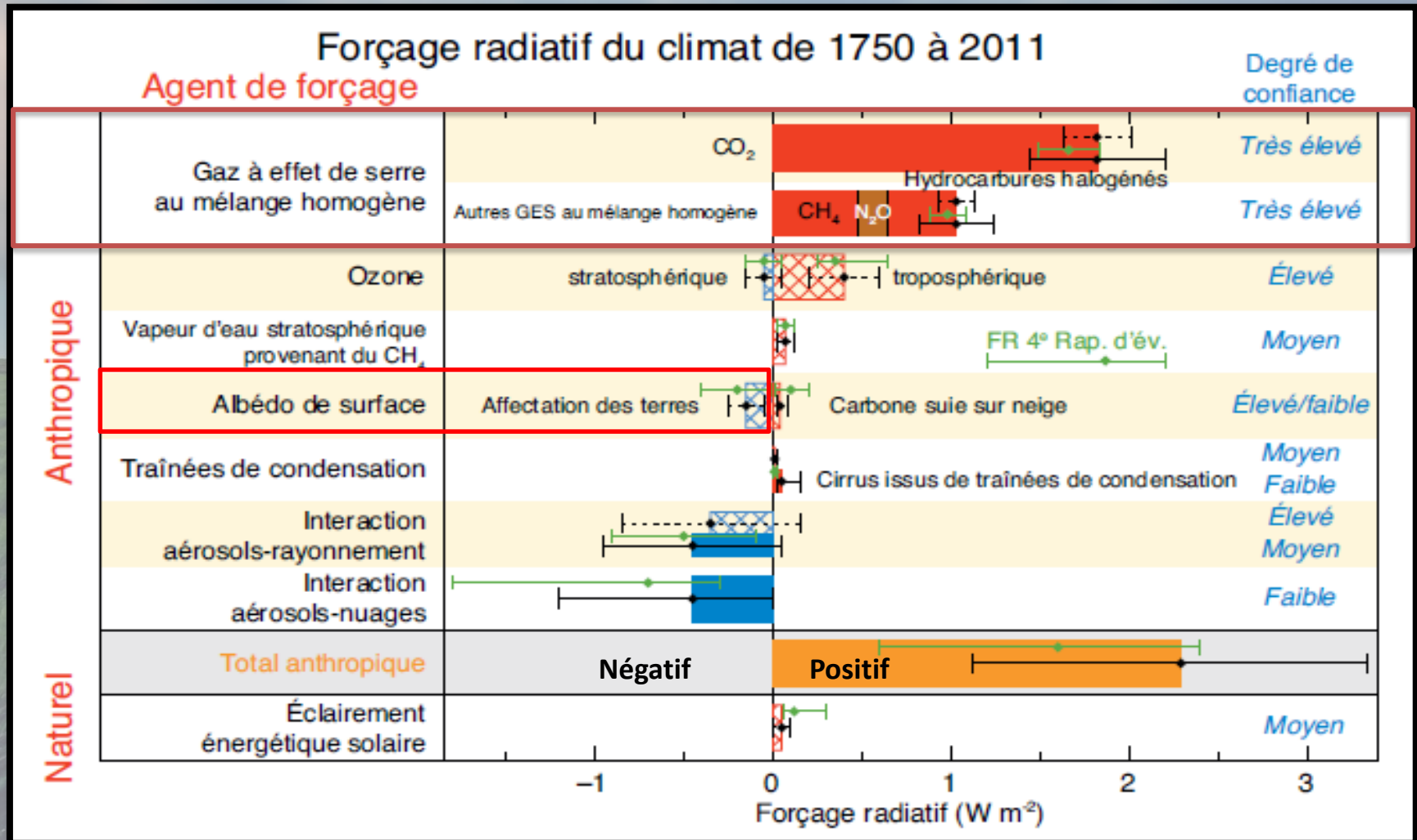


Fast and slow processes in the carbon cycle

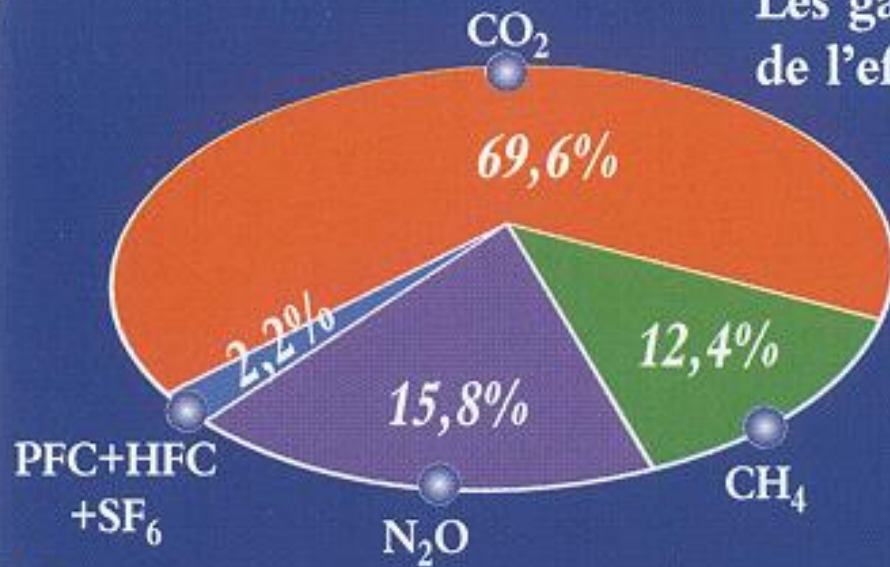


Source IPCC

Les causes du réchauffement climatique



Les gaz contribuant au renforcement de l'effet de serre

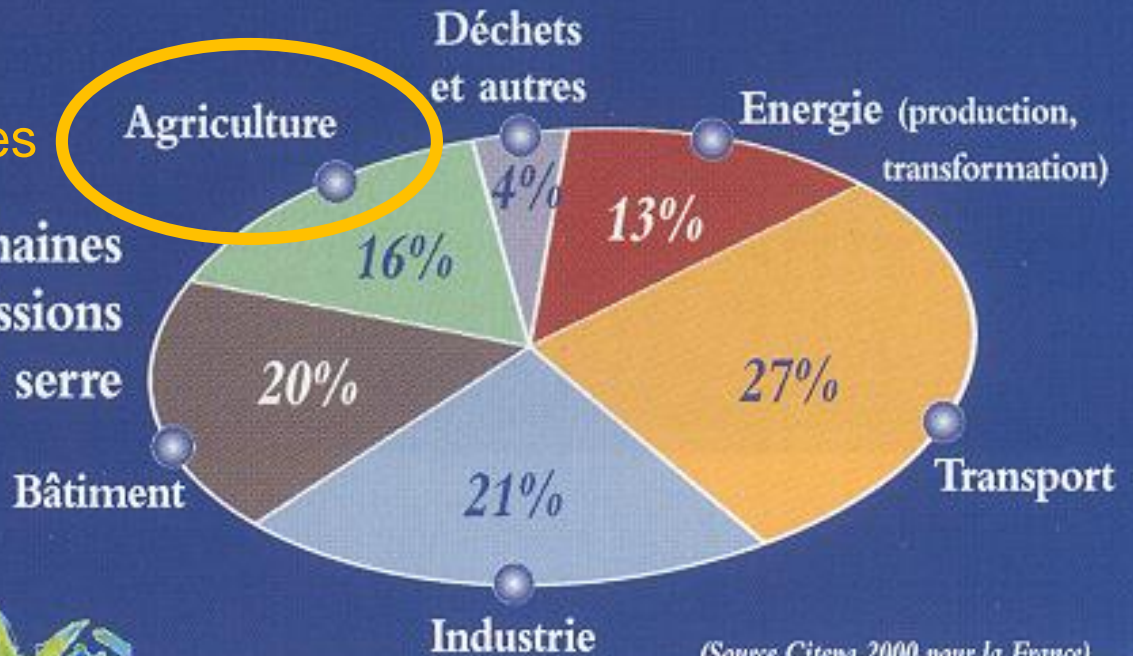


Tous les gaz qui absorbent les rayonnements dans l'infrarouge thermique sont potentiellement des gaz à effet de serre.

CO₂ : dioxyde de carbone
N₂O : protoxyde d'azote
CH₄ : méthane
PFC : perfluorocarbones
HFC : hydrofluorocarbones
SF₆ : hexafluorure de soufre

Elevage et grandes cultures

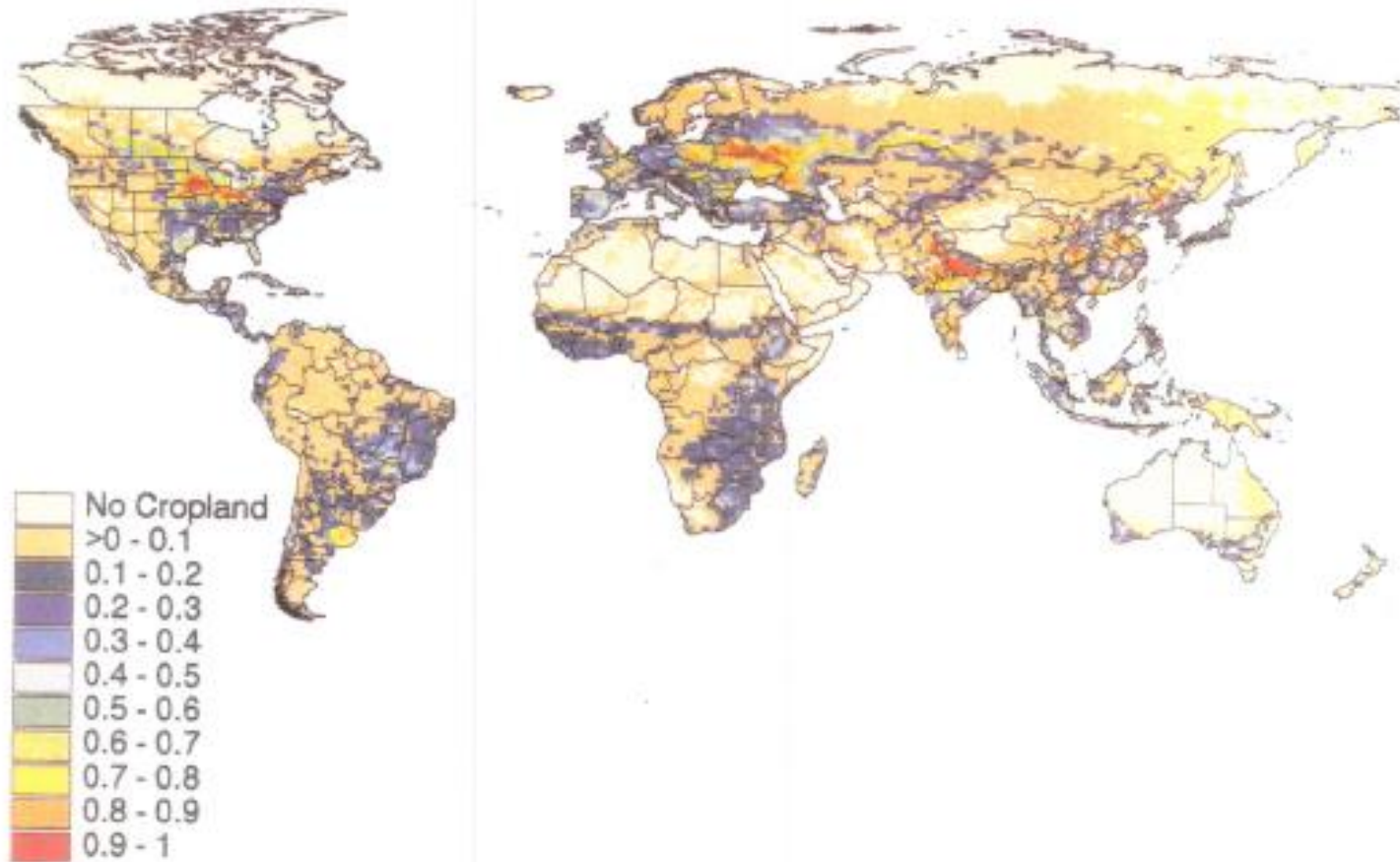
Les activités humaines participant aux émissions de gaz à effet de serre



(Source Citepa 2000 pour la France)

Effet du Changement d'utilisation des terres sur les stocks de C du sol

ESTIMATION DE LA SUPERFICIE DES CULTURES (résolution = 10 km)
(agriculture = 1er mode de transformation de l'occupation du sol)



(Ramankutty and Foley, 1998)

Résultats : 18 millions de km² (13.8% des surfaces)

Effet du Changement d'utilisation des terres sur les stocks de C du sol

Guo & Gifford 2002, *Global Change Biology* 8, 345-360.

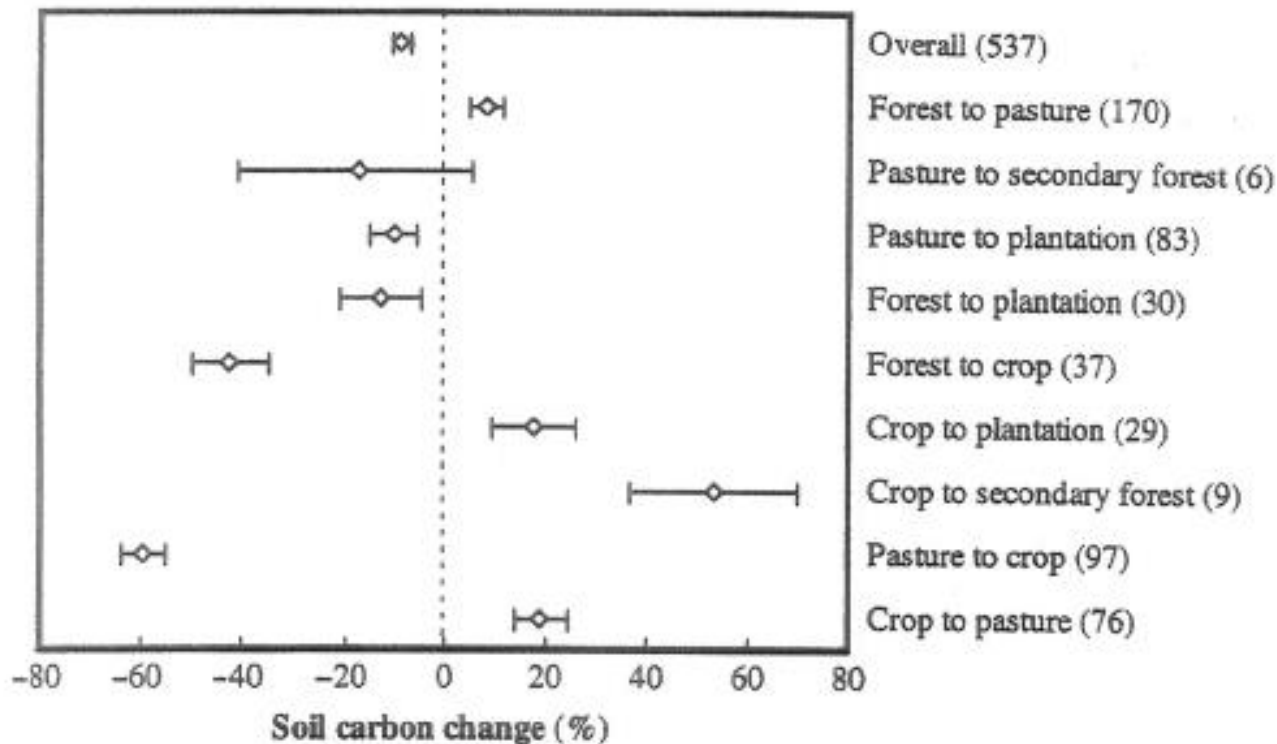


Fig. 1 Soil carbon response to various land use changes (95% confidence intervals are shown and numbers of observations are in parentheses).

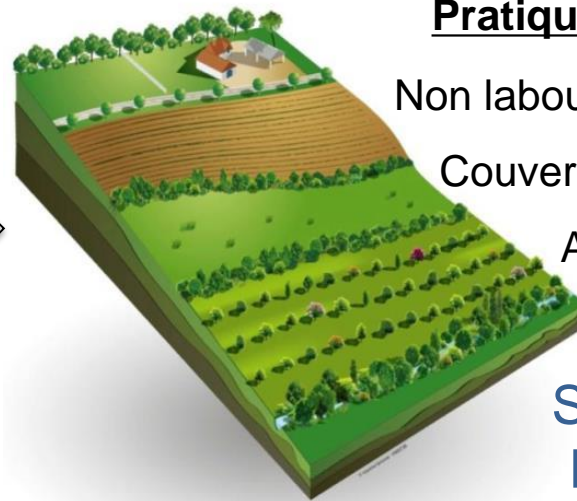
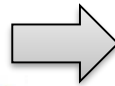
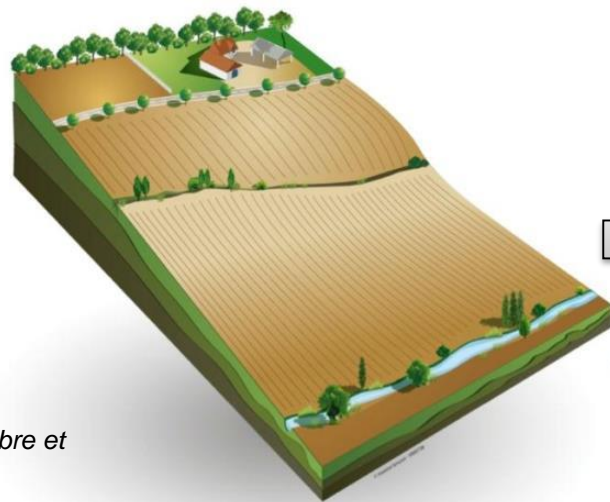
Pourquoi s'intéresser aux grandes cultures ?

- Les surfaces cultivées représentent 1/3 des terres émergées d'Europe et 11.6 % des surfaces continentales en 2007 (source FAOStat).
- L'accroissement des surfaces agricoles des derniers siècles a modifié la surface terrestre :
 - effets sur le ruissellement/infiltration/évaporation de l'eau (effets sur le climat),
 - sur l'albédo des surfaces (fraction d'énergie solaire réfléchi par la surface) qui conditionne au premier ordre la quantité d'énergie à la surface de la terre et dans l'atmosphère (effet de serre) et autres paramètres biophysiques (rugosité...)
- L'agriculture contribue aussi environ à 12.5% des émissions de GES dans le monde (contribution à l'effet de serre) mais forte incertitude concernant les émissions de GES des parcelles cultivées (ou en amont) : notamment concernant les variations de stocks de C dans le sol !!
- Stocks de C faibles dans les sols agricoles (pauvres en matière organique = moins fertiles) : fort potentiel de capture du CO₂ atmosphérique pour le séquestrer dans la matière organique du sol (réduction de l'effet de serre et amélioration du sol).
- Forts enjeux socio-économique : production alimentaire, survie de la filière agricole, enjeux paysagers...
- Sensibles aux aléas climatiques (problématique dans un contexte de changements climatiques)

Enjeux sociétaux/Contexte

Remise en question de l'agriculture conventionnelle et changements globaux

➔ Vers des pratiques agroécologiques à l'échelle des territoires



Pratiques agro-écologiques

Non labour

Couverts intermédiaires

Agroforesterie



Stocker du C,
biodiversité,
lutte contre
l'érosion...

*Illustrations: Arbre et
Paysage 32*

Manque d'**outils de diagnostics spatialisés multi-critères** pour dresser un état des lieux, guider ces nouvelles pratiques et objectiver leurs bénéfices environnementaux (services écosystémiques) et éventuellement leurs disservices.

Enjeux stratégiques pour la profession agricole/les décideurs

Agroécologie : de quoi parle-t-on ?

Un gradient d'intensification écologique des agrosystèmes :

- Améliorer l'effcience des intrants
→ *modulation intra-parcellaire des apports d'engrais (agriculture de précision)*
- Substitution des intrants chimiques (engrais)
→ *Recours à des engrais verts (couverts végétaux) mais besoin d'outils d'aide à la décision basés sur de nouvelles règles, de la parcelle à l'exploitation (voire territoire) :*
- Re-conception des systèmes de cultures basée sur une forte diversification des espèces
→ *Outils et méthodes de raisonnement nouveaux, forte importance de l'observation et de définir des règles de décision en situation d'incomplétude de connaissances*



weak agroecology

*+++ observations
+++ anticipation
+++ gestion avec
incomplétude de
connaissances*

*strong
agroecology*

*Couplage entre télédétection
(observation) et modélisation
(simulation/ optimisation)*

Questions

Quelle est la part des différents flux dans les bilans d'énergie, d'eau, de carbone et GES ?

- **Part des flux verticaux** : albédo, CO₂, N₂O, CH₄...
- **Part des flux latéraux** : imports, exports de C, irrigation, ruissellement...
- **Émissions de GES liées à la gestion des parcelles ?**

Comment quantifier l'influence des principaux facteurs contrôlant ces flux et bilans à différentes échelles spatiales ?

- **Facteurs biotiques** : dynamique de la végétation, micro-organismes du sol
- **Facteurs abiotiques** : climat, sol
- **Facteurs anthropiques** : rotation des cultures, pratiques culturales...

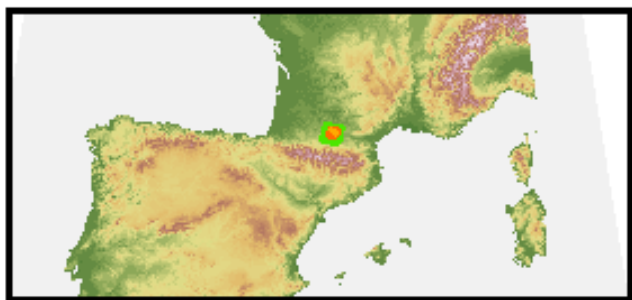
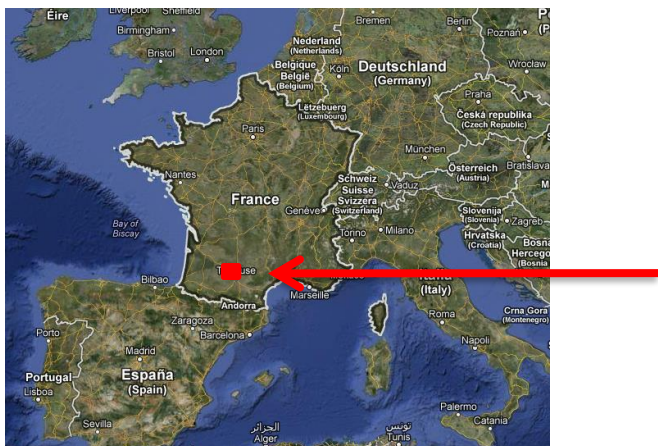
Quels sont les leviers nous permettant de maintenir de bons niveaux de production et :

-de réduire significativement les émissions de GES, voire de re-stocker du C dans les sols et globalement réduire le forçage radiatif des cultures

- d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau des agro-écosystèmes : quels critères prendre en compte ? ¹²

Zone d'étude de l'Observatoire Spatial Régional-Sud Ouest

Intégré dans le réseau international JECAM











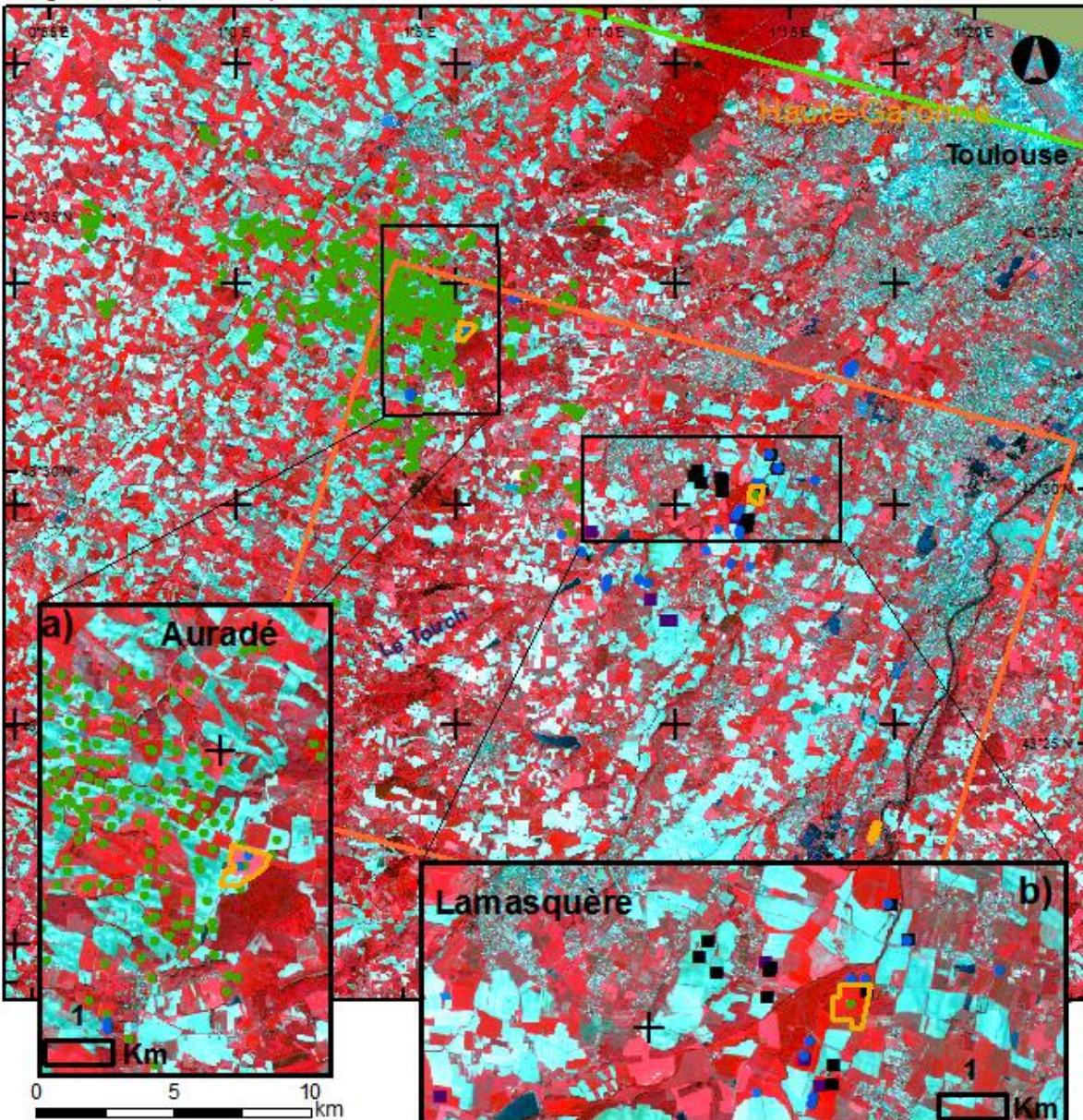
-  Experimental Sites (2004...)
- ESU  Biomass & Yield Data (2011)
-  Yield Data (farmers surveys)
- ESU  LAI & Biomass Data (2008)
- ESU  LAI & Biomass Data (2010)
-  SAFRAN grid
-  SPOT window (depuis 2002)
-  Formosat-2 window (depuis 2006)

Image SPOT5 (30/04/2011)

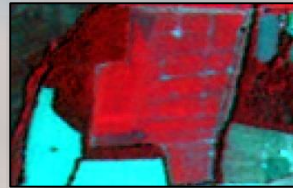


Stratégie de collecte d'informations

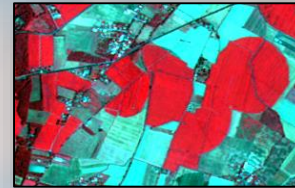
...pour la calibration / validation des modèles et produits de télédétection.

Echelles emboîtées

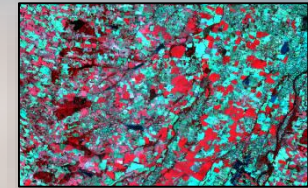
Parcelle: sites expérimentaux +ESU



>350 parcelles, dont BV Auradé



Région



GAI (indice de végétation)



GAI in situ



ESU

Biomasse / Rendement / Opération. Tech



ESU + Opérations Tech.



Agriculteurs (350 parcelles)



Statistiques régionales de rendement (Agreste)

Eau



Irrigation agriculteur (dates et doses), géophysique (RU)



Statistiques régionales d'irrigation (Agence de l'eau)

CO₂



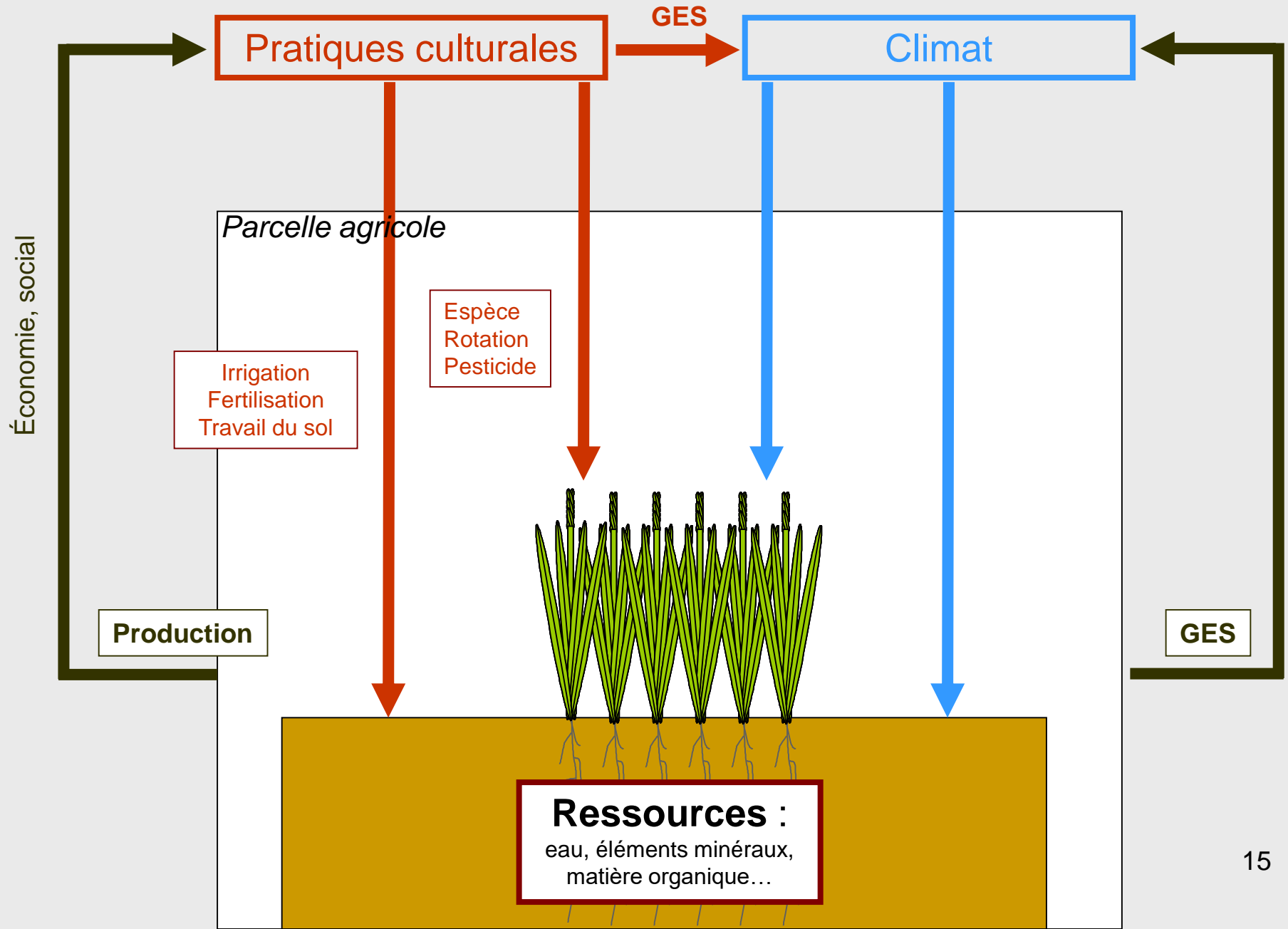
Flux net, photosynthèse, respiration

Echelle manquante



CarboEurope Regional Experiment / Inversion

Systeme étudié : la parcelle agricole

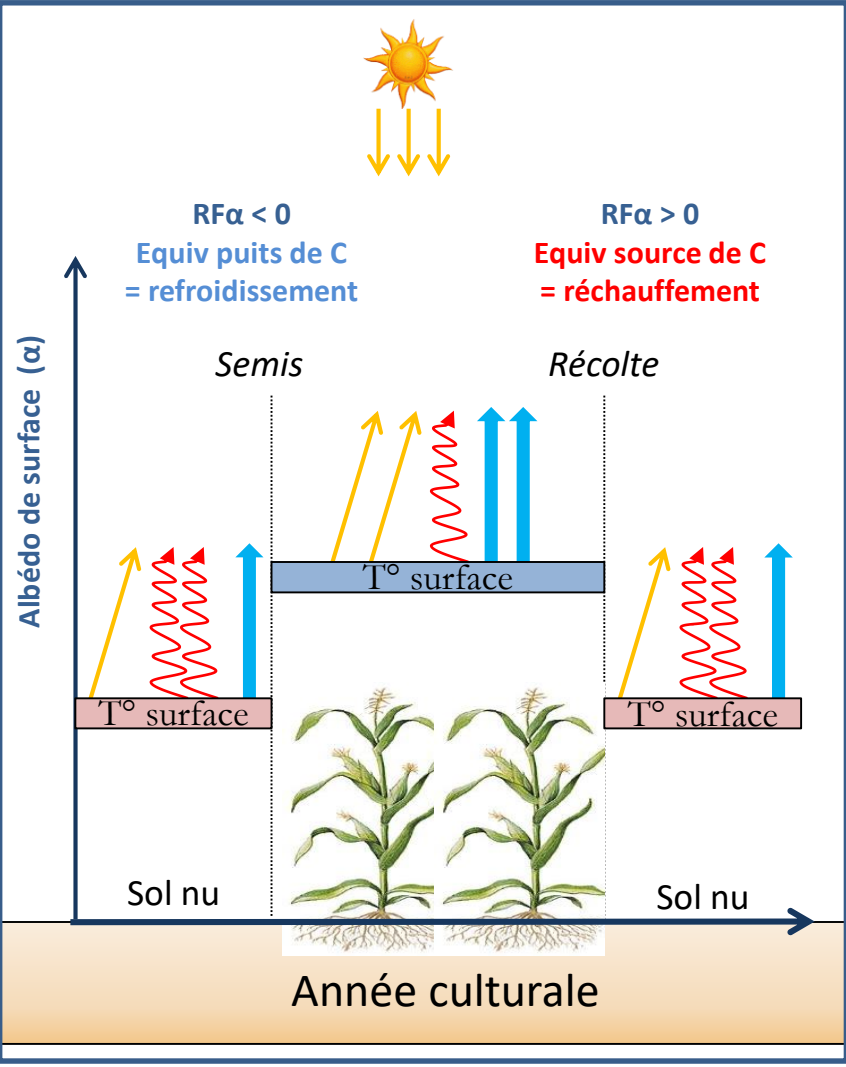
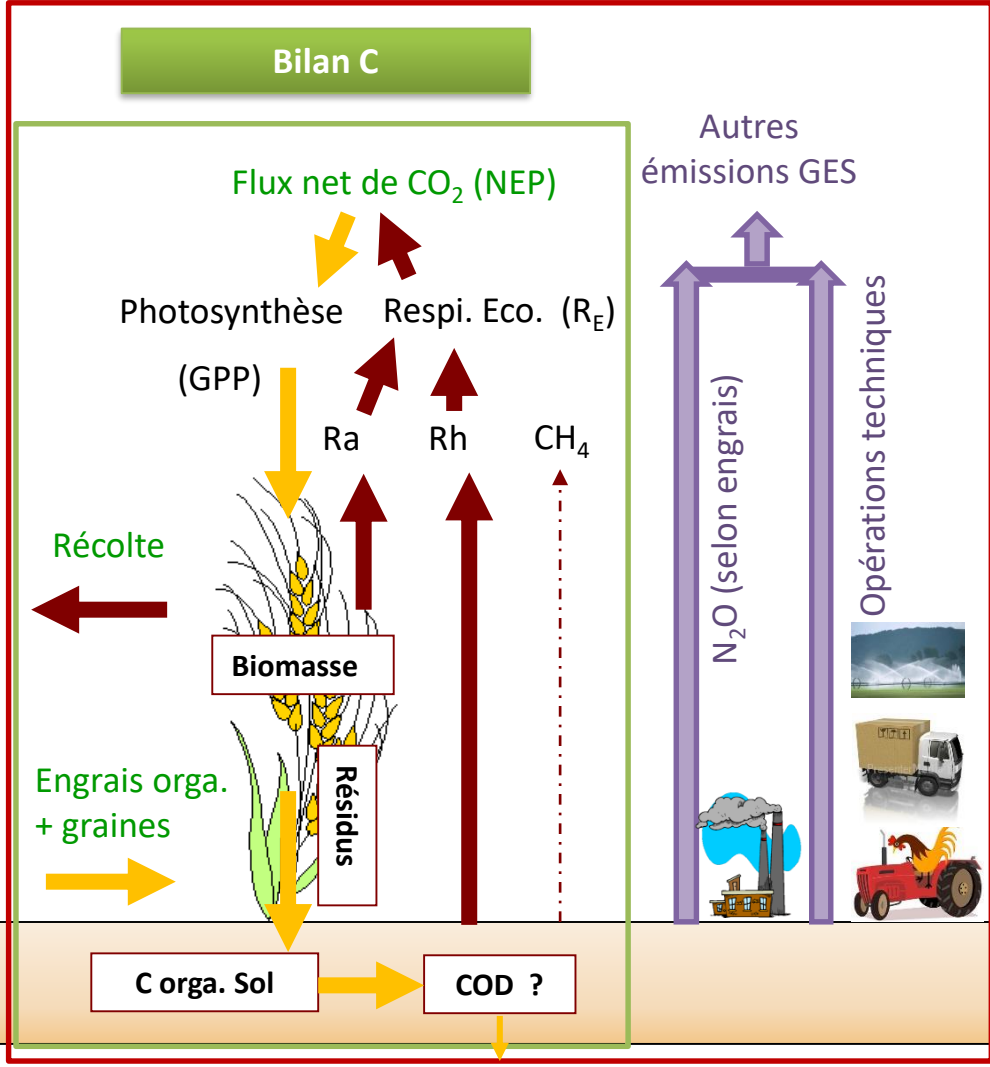


CESBIO Effet des cultures sur le climat

Effet climat (forçage radiatif en equiv C) = (Bilan C + N₂O + OT) + (effet albédo + Δ H/ET)

Effets biogéochimiques = Bilan GES

Effet biogéophysiques : albédo, flux de chaleur

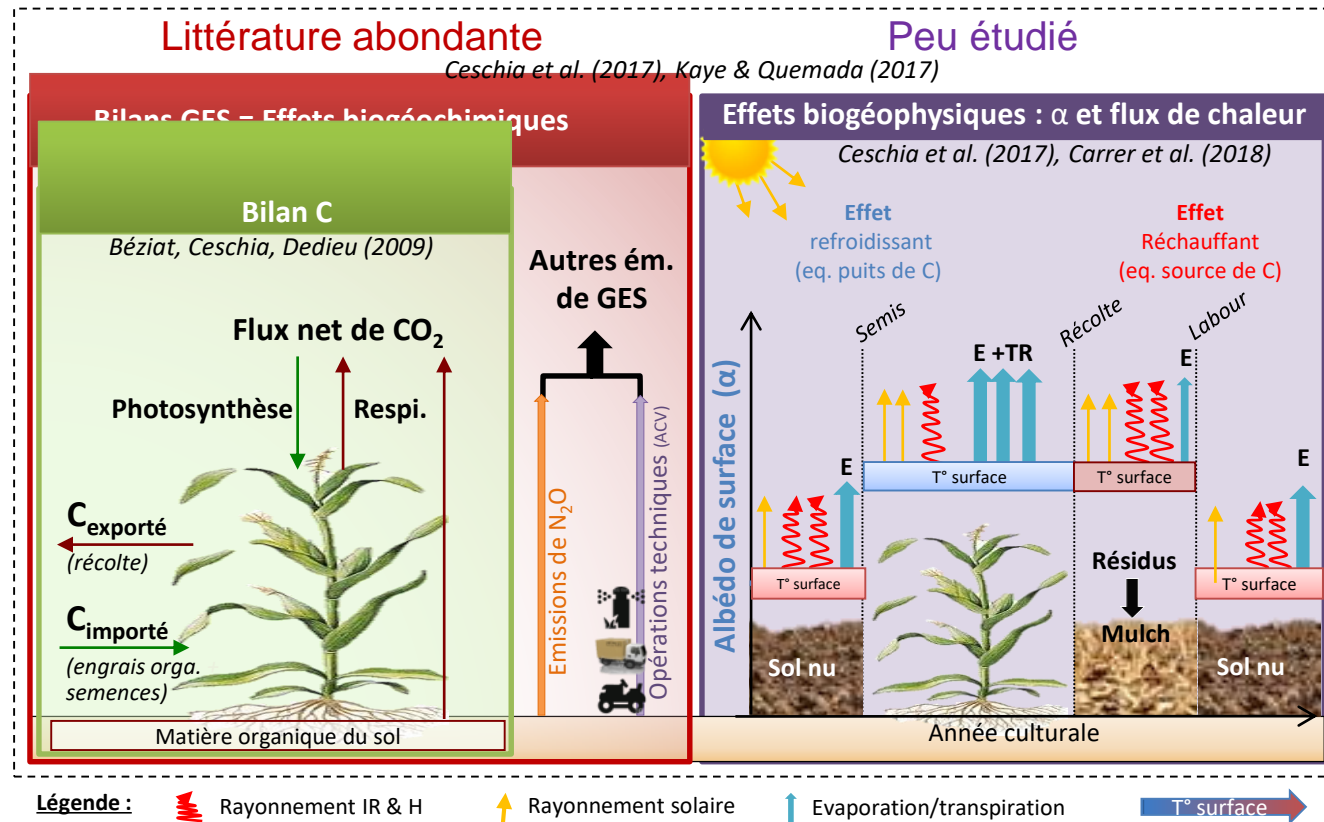


Légende : Température de surface (T° surface) → Rayon. infrarouge (chaleur) ↑ Rayon. de courte longueur d'onde ↑ Evapotranspiration ↑

Quelques clarifications pour commencer...

- Bilans C, bilans GES, forçage climatique net (RFnet) : de quoi on parle ??

Effet net sur le climat (RFnet) de la/des parcelles agricoles

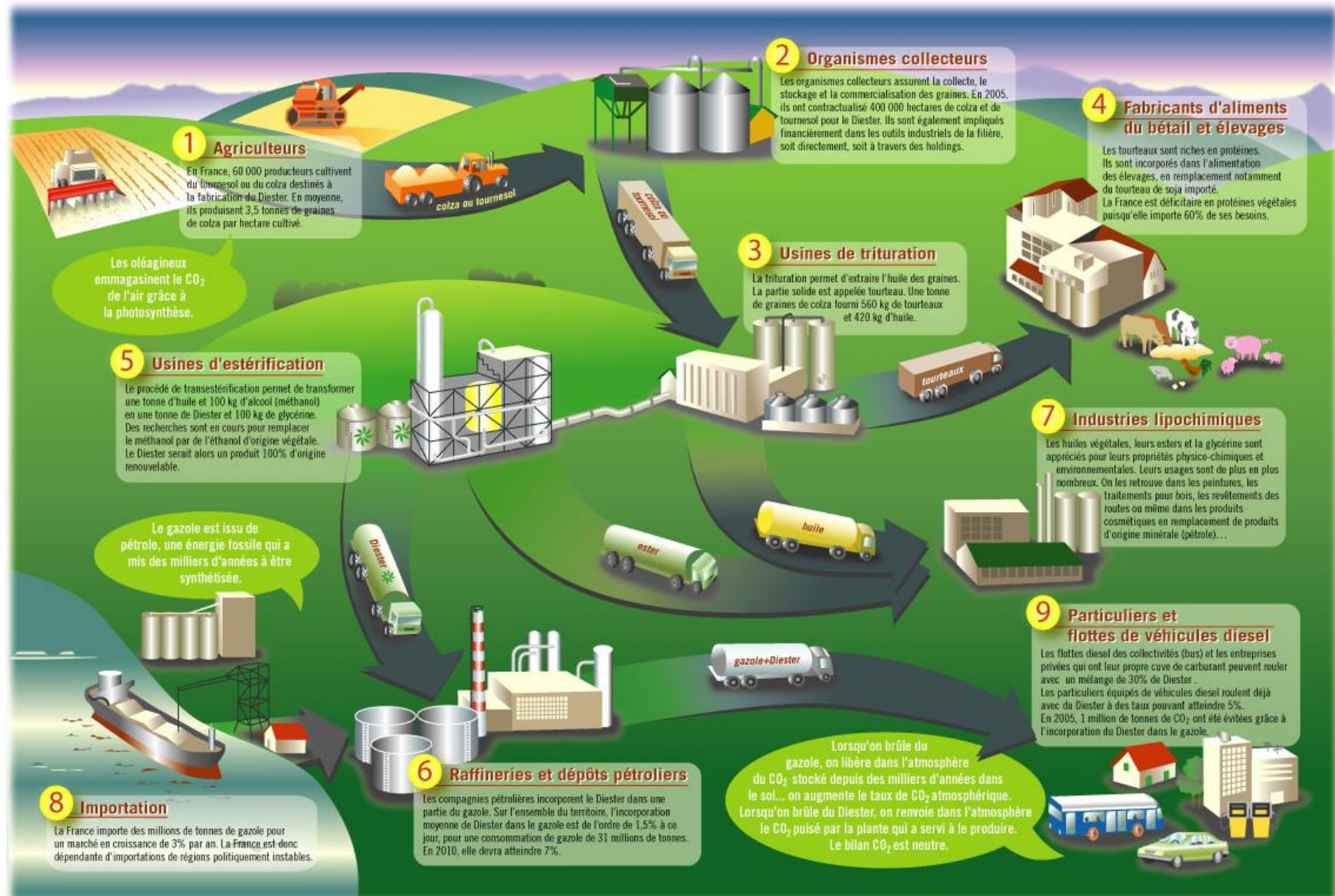


Très peu d'études intégrées sur les agro-écosystèmes

Pourtant capital pour choisir les stratégies d'atténuation les plus efficaces !!

Devenir des exports

Première approximation : tout repart dans l'atmosphère

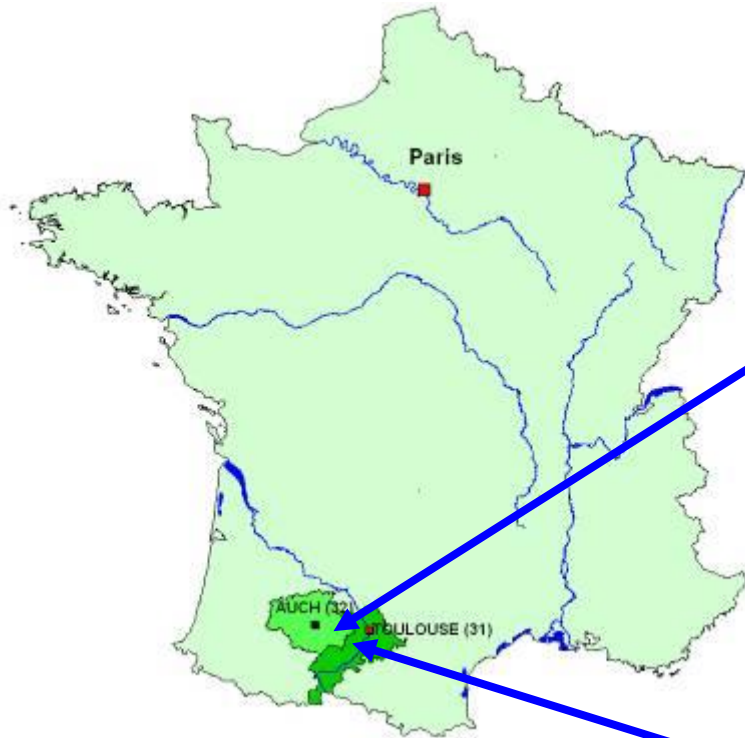


Sites du CESBIO

Auradé (Gers, 32)

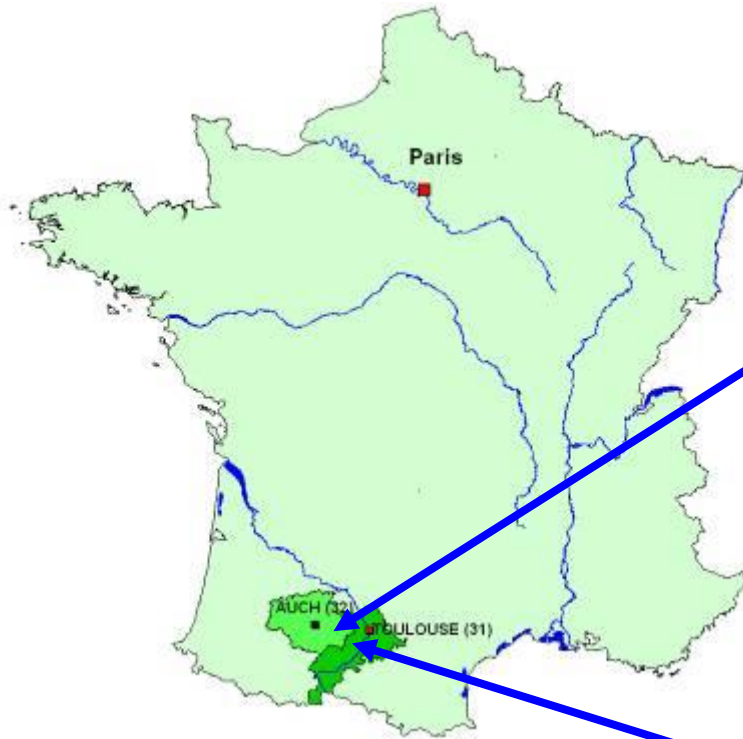


Lamasquère (Haute Garonne, 31)



- Même configuration instrumentale
- Inclus dans CarboEurope-IP
- Séparés par 12 km
- Gestion et sol différents

Sites du CESBIO



Auradé (Gers, 32)

Altitude : **245 m**

Surface : **23.5 ha**

Pente : **2 %**

Sol : **Luvisol (coteaux)**

Températures : **13.5 °C**

Précipitations : **680 mm**

Conduite : **fertilisation minérale**

Lamasquère (Haute Garonne, 31)

Altitude : **180 m**

Surface : **32.3 ha**

Pente : **0 %**

Sol : **Luvisol sur alluvions (plaine)**

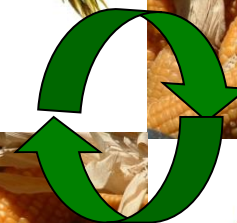
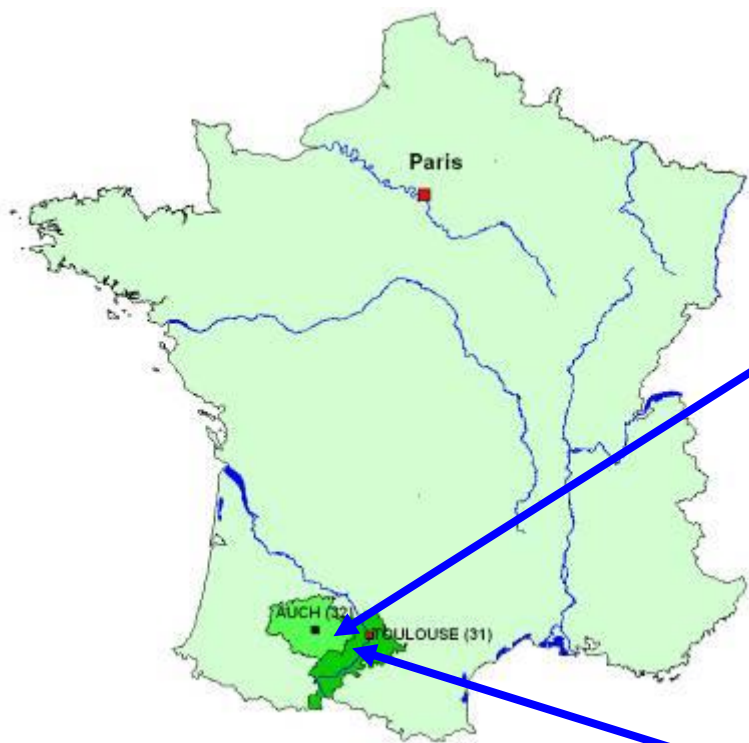
Températures : **13.3 °C**

Précipitations : **651 mm**

Conduite : **fertilisation minérale et organique, irrigation**

- Même configuration instrumentale
- Inclus dans CarboEurope-IP
- Séparés par 12 km
- Gestion et sol différents

Sites du CESBIO



- Même configuration instrumentale
- Inclus dans CarboEurope-IP
- Séparés par 12 km
- Gestion et sol différents

Mesures

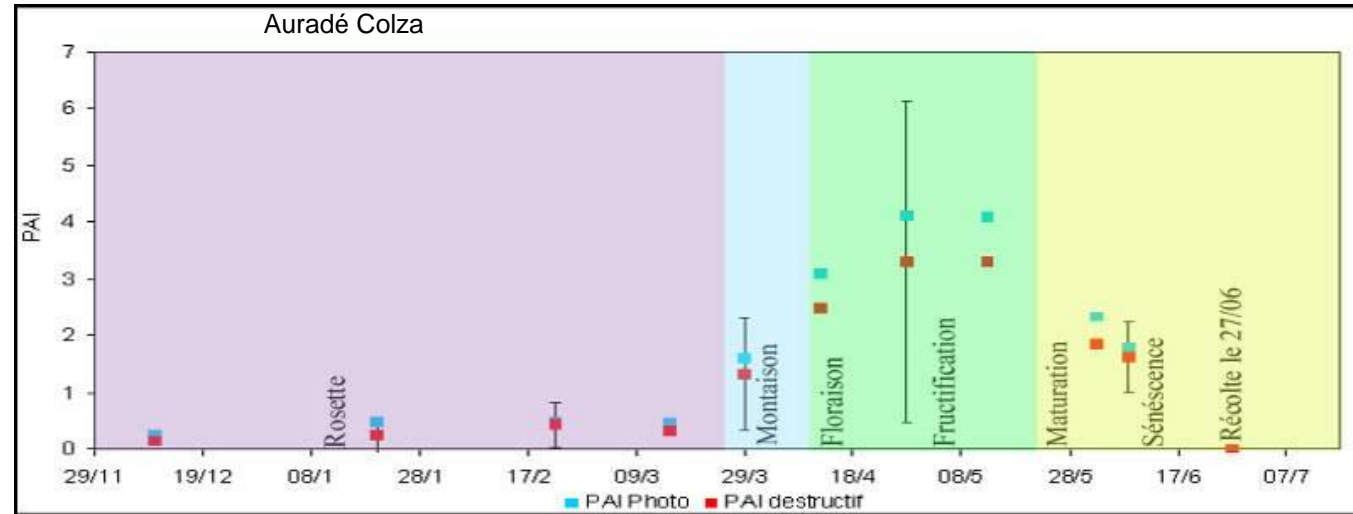
Paramètres biotiques : Suivi de la dynamique de la végétation

LAI : $m^2_{\text{feuilles}} m^{-2}_{\text{sol}}$

PAI : $m^2_{\text{plantes}} m^{-2}_{\text{sol}}$

Biomasse :

- Feuilles
- Tiges
- Fruits
- Résidus



Mesures destructives



Photos hémisphériques



Mesures micro-climatiques (Lamasquère)

+ de 135 variables mesurées en continu (idem à Auradé)
+ suivi végétation (surface, biomasse) et sol (eau, C, N...)

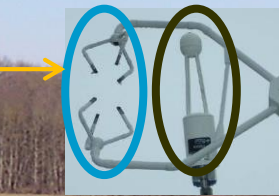
Mât déporté

Chambres automatiques
émissions de CO₂, N₂O du sol

Rayonnements (albédo, NDVI..) et profils verticaux
de vent, T°C, HR%, CO₂

Mât principal

Variables météo et sol +
flux de CO₂, eau, chaleur



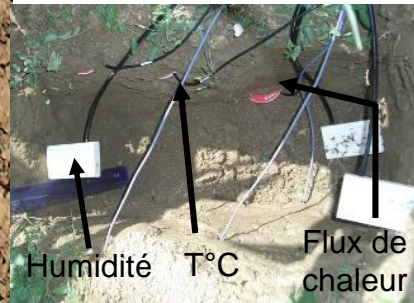
Méthode
des fluctuations
turbulentes
à 20 Hz

4 chambres
Inter-rang



Direction du vent

4 profils sol (0 à 1m)

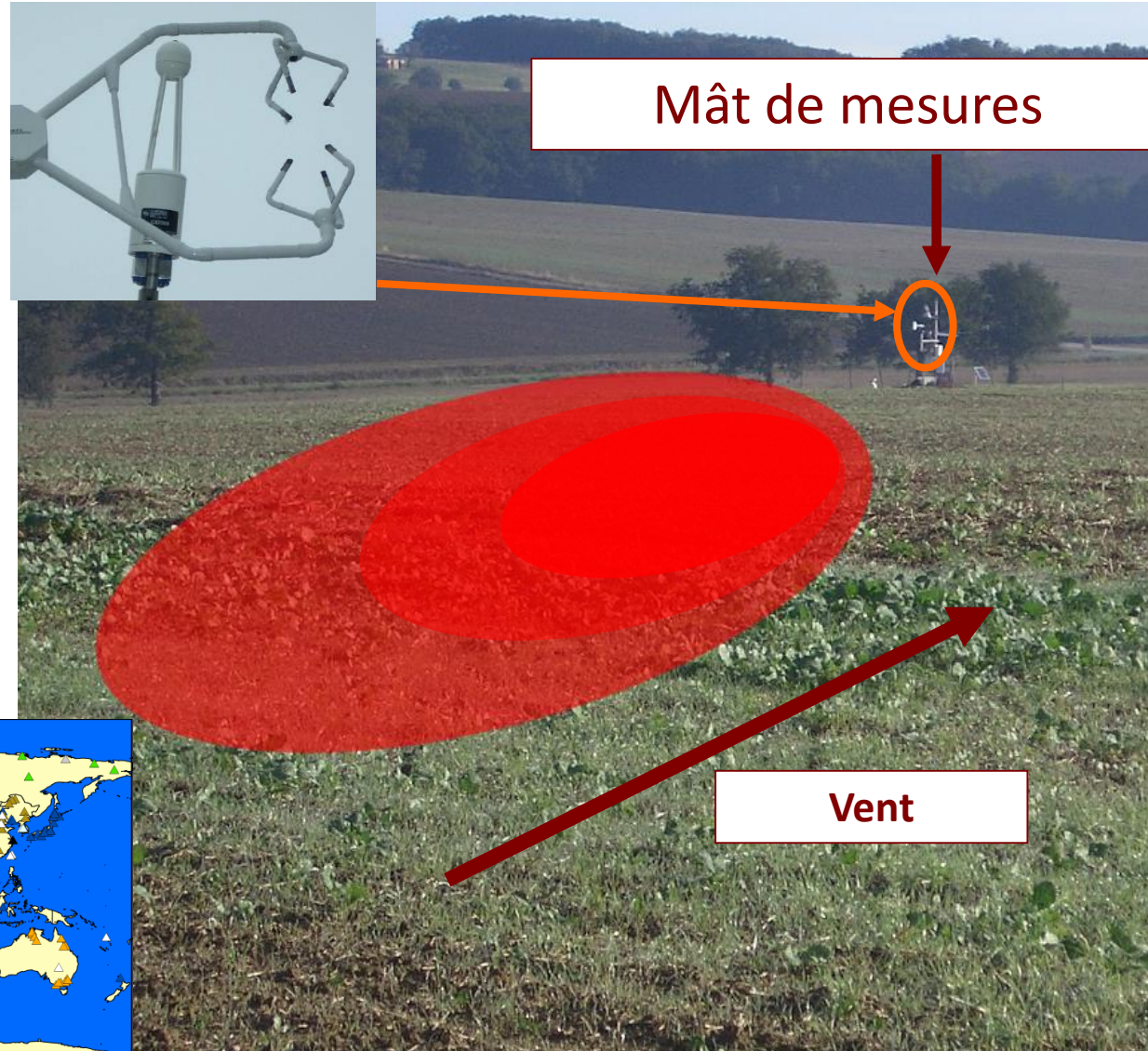


Flux de CO₂ mesurés entre la parcelle et l'atmosphère

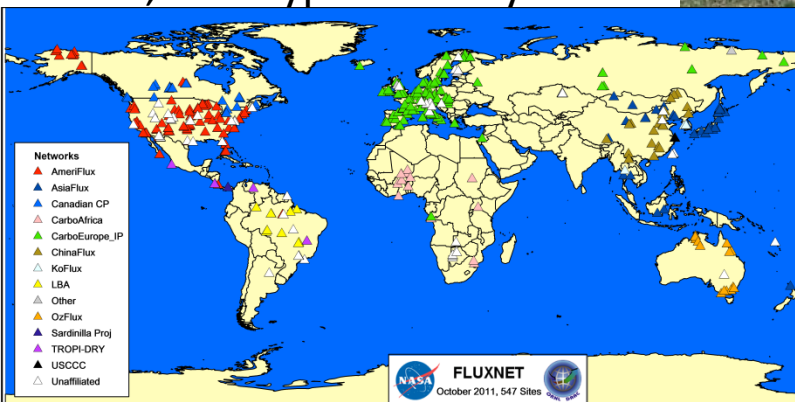
Méthode des fluctuations turbulentes : flux mesuré 20 fois par secondes

Surface perçue dépend:

- vitesse du vent
- direction du vent
- hauteur de végétation
- hauteur de mesure...



Réseau Fluxnet : 560 sites dans le monde, tous types d'écosystèmes



Sites Européens



- 15 sites du réseau CarboEurope-IP

- 41 années de mesures

- 14 espèces cultivées

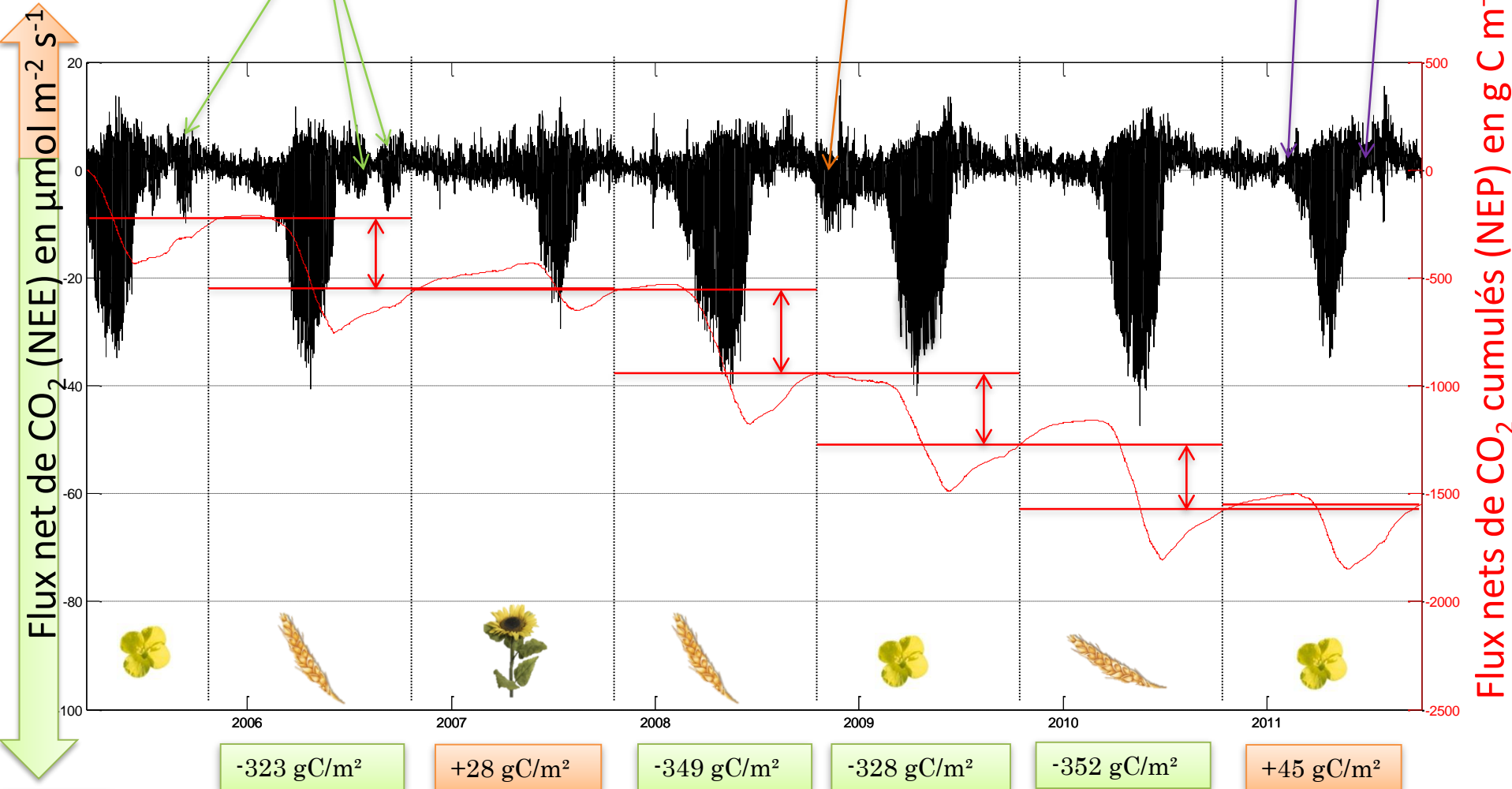
- 73 % des cultures Européennes
(EU 27, FAOSTAT, 2009)

- Large gamme de climats et de
pratiques culturales

Echanges de CO₂ parcelle/atmosphère à Auradé

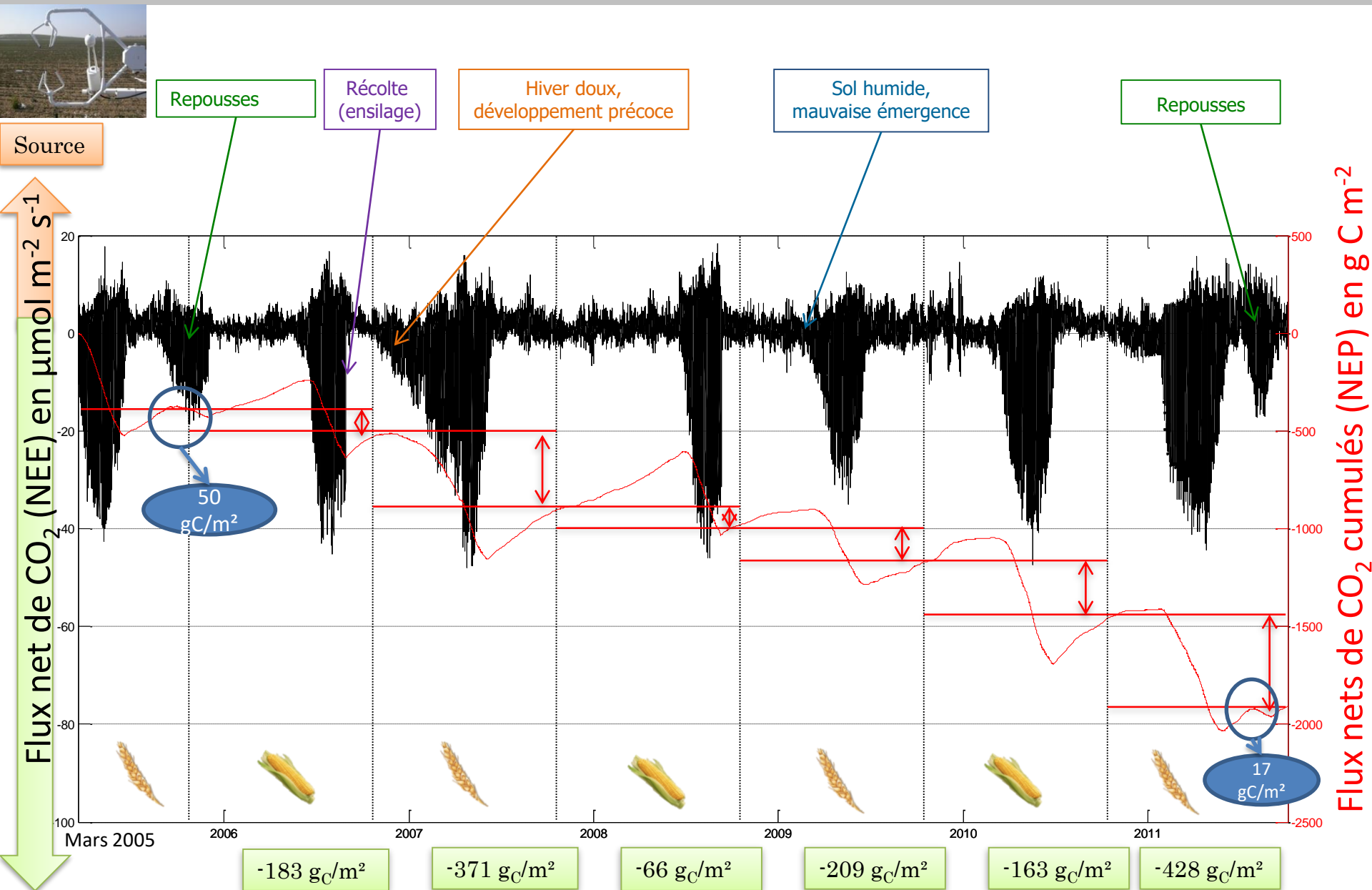


Source

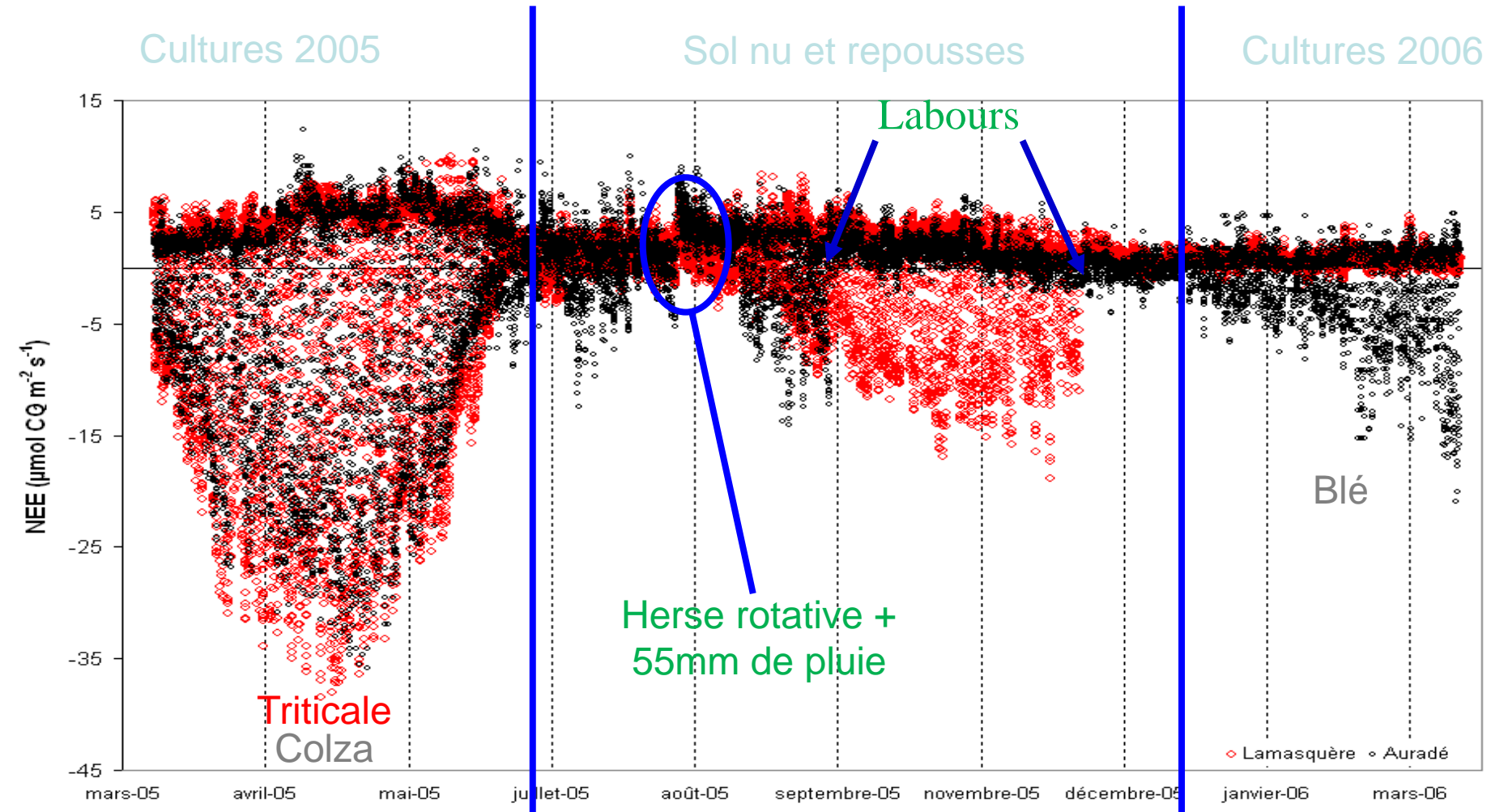


Puits

Echanges de CO₂ parcelle/atmosphère à Lamasquère

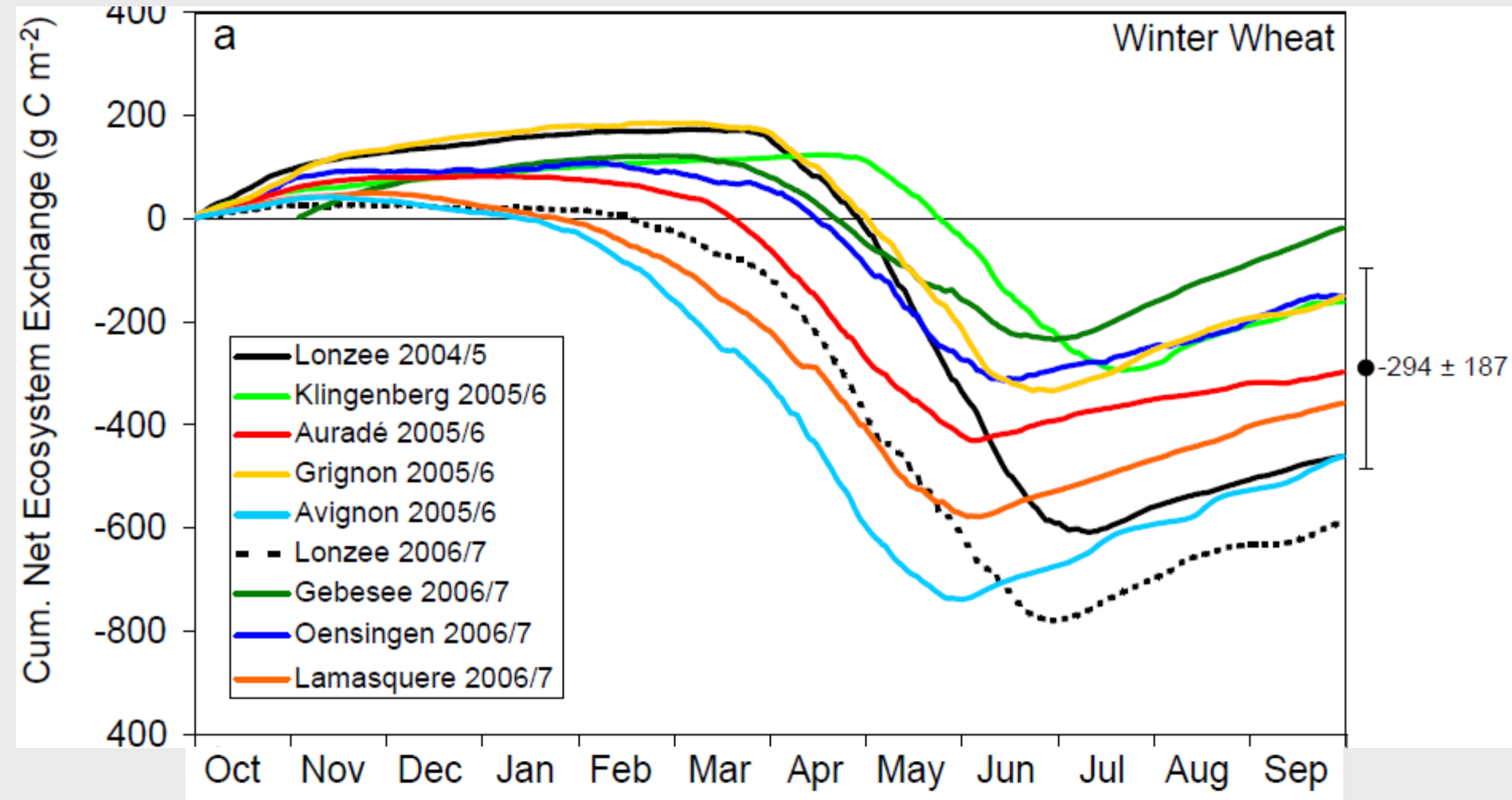


CO₂ échangé entre les parcelles agricoles et l'atmosphère entre mars 2005 mars 2006: effets climat&gestion



Dynamique annuelle de la NEE pour le blé

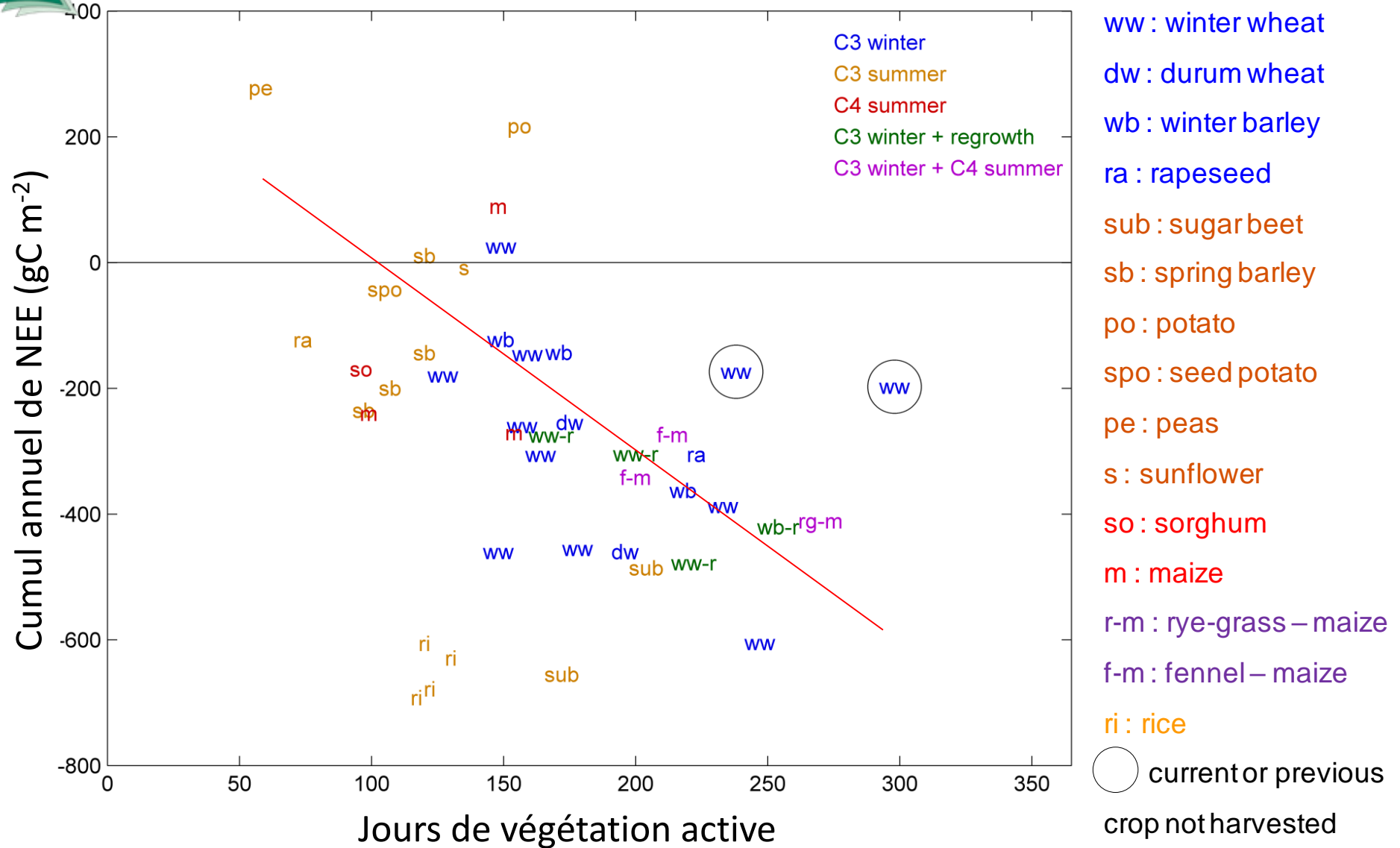
Sites du réseau CarboEurope-IP (Kutsch et al. 2010)



Flux net de CO₂ et longueur de saison de croissance



Ceschia et al. 2010 dans AEE



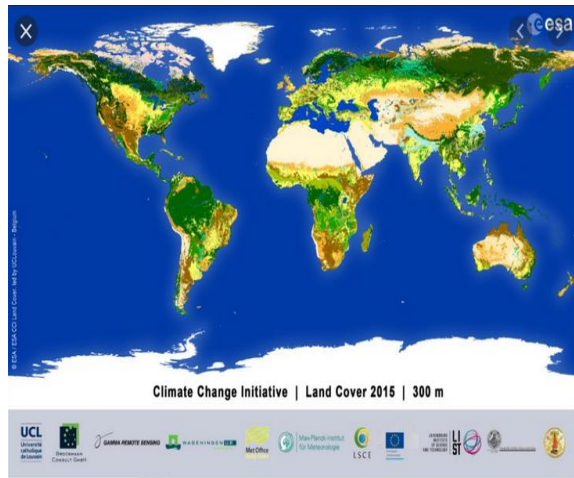
Plus la saison de croissance est longue, plus la fixation nette annuelle de CO₂ est grande

Cartographie de la durée de couverture du sol sur les parcelles de grandes cultures (principe)

Travail initié en collab avec IGN et l'ASP dans le cadre du projet Européen



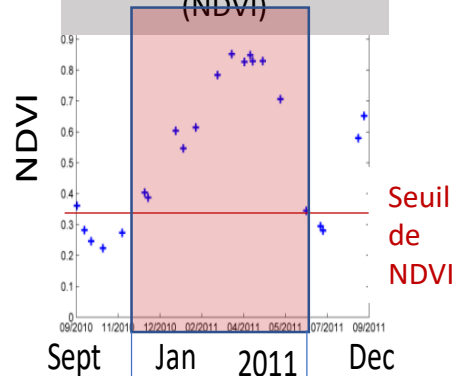
- 1) Identifier les zones cultivées
- 2) Estimer la durée de couverture du sol des parcelles cultivées
- 3) Carte de la durée de couverture



Crédits : ESA

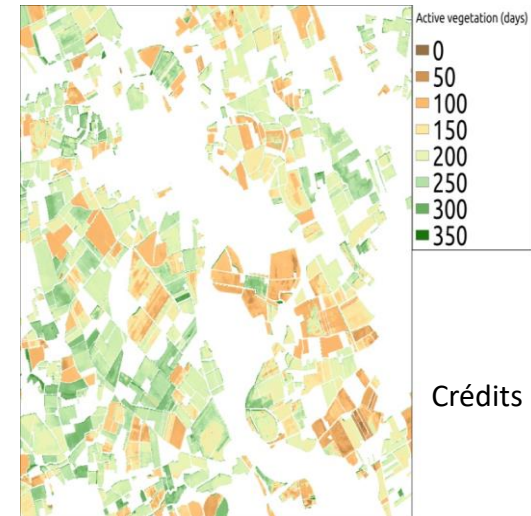
Prochainement à 100m partout
(et à 20m sur Europe & Afrique)

Série temporelle d'indice de végétation (NDVI)



Nbre de jours de couverture du sol

- 3) Carte de la durée de couverture



10 m de résolution
(Région Toulousaine)

Crédits : L. Arnaud

Cartographie de la durée de couverture du sol sur les parcelles de grandes cultures (principe)

Travail initié en collab avec IGN et l'ASP dans le cadre du projet Européen



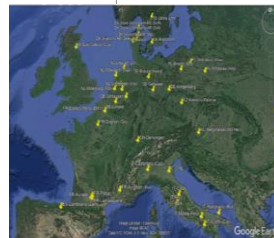
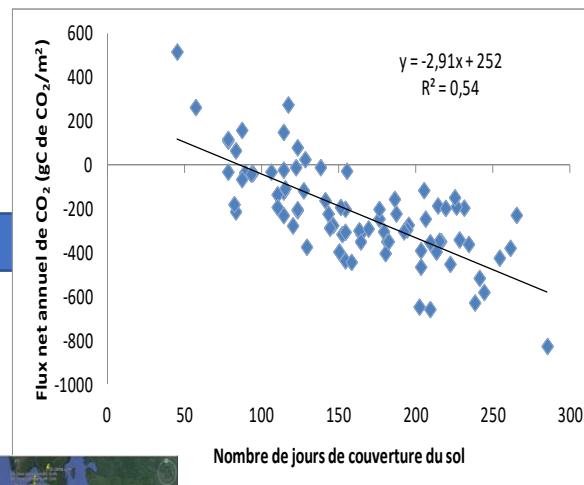
3) Carte de la durée de couverture du sol 4) Carte des flux annuels d

Basé sur Ceschia et al. (2010)

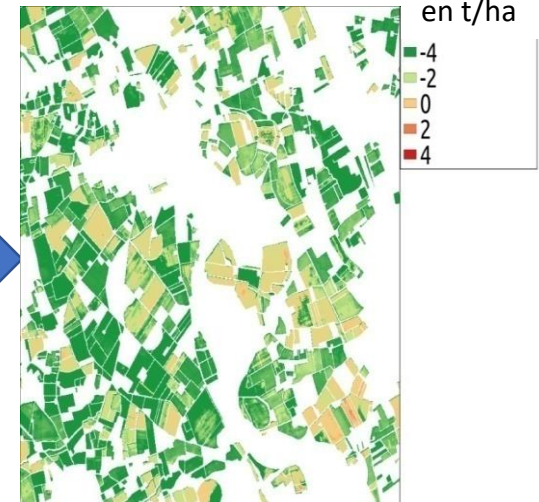


10 m de résolution
(Région Toulousaine)

Crédits : L. Arnaud



- 17 cultures (sauf riz)
- large gradient de sol, climats
- pratiques très variées
- à enrichir avec nouvelles données
- à comparer avec ré-analyses STICS



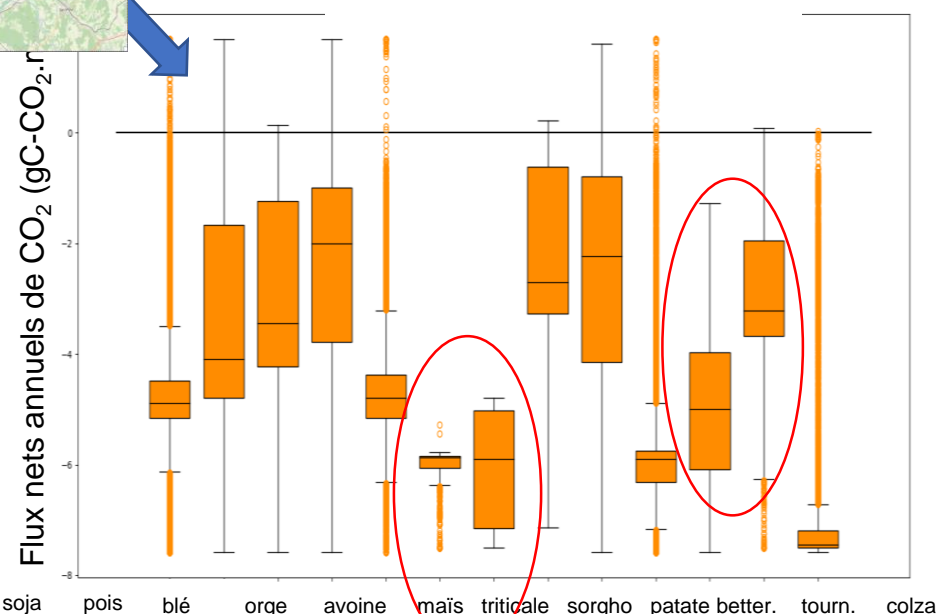
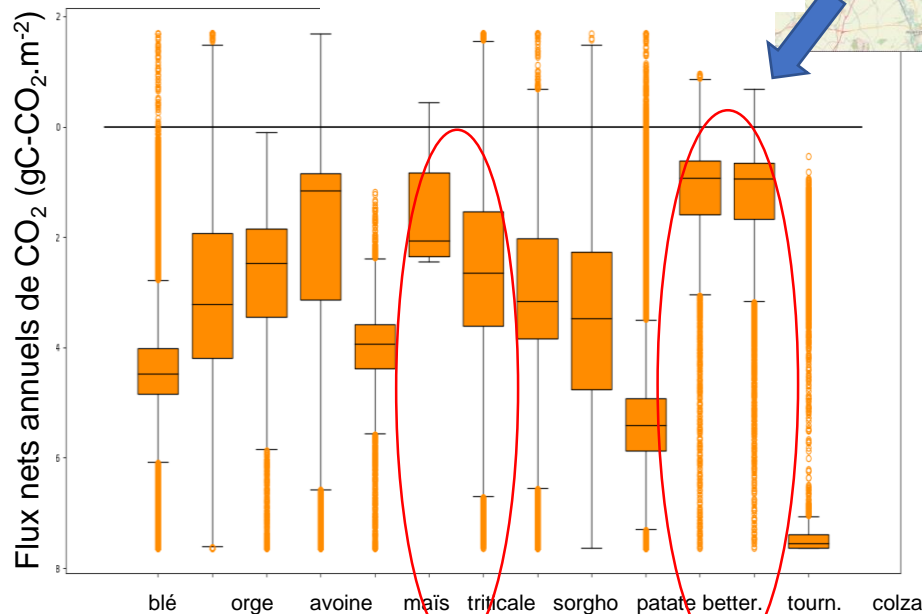
https://gitlab.com/nivaeu/uc1b_indicators_tool

Analyses statistiques par cultures des flux nets annuels de CO₂ autour et à l'Est de Châlons en Champagne en 2019



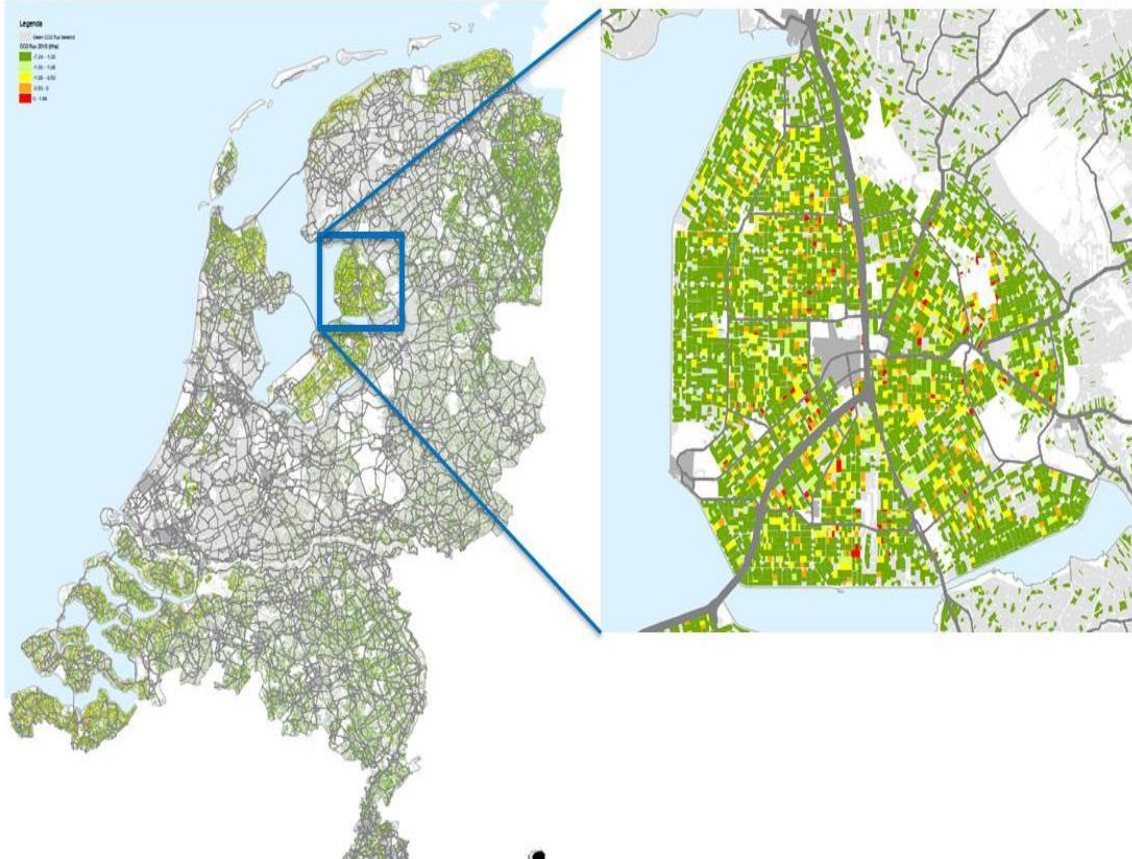
Autour de Châlons

A l'Est de Châlons




Temps de couverture plus long →
couverts végétaux ?


Cartographie des flux nets annuels de CO₂ sur les parcelles de grandes cultures aux Pays Bas en 2018



Fixation
annuelle de
CO₂ 😊

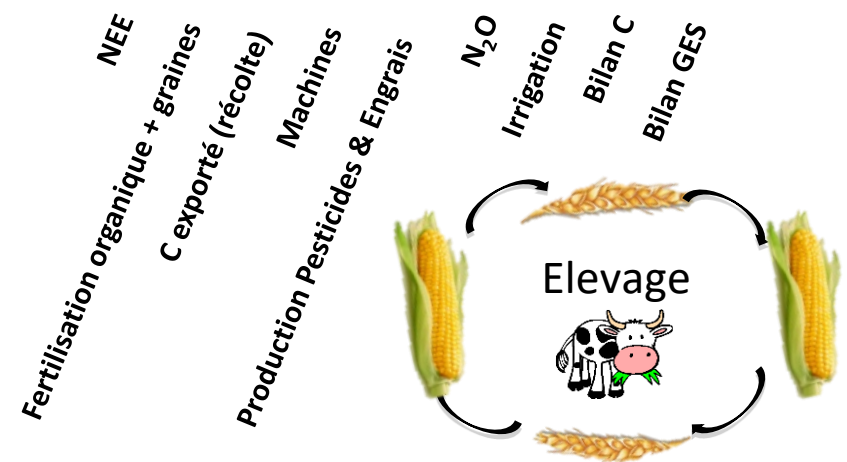
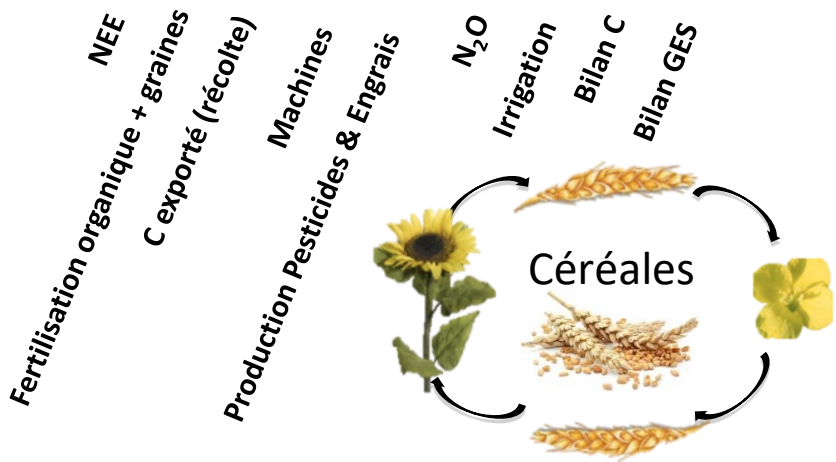
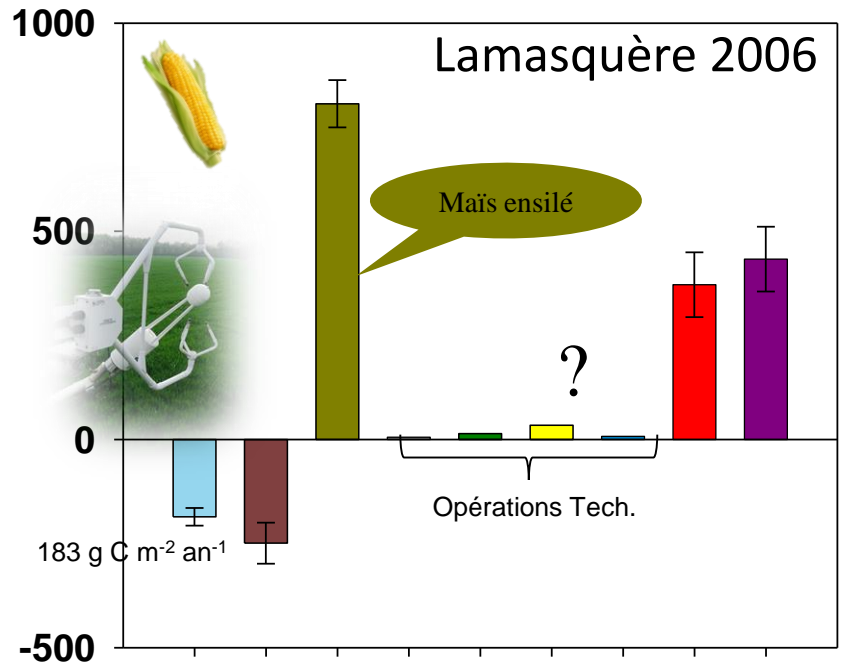
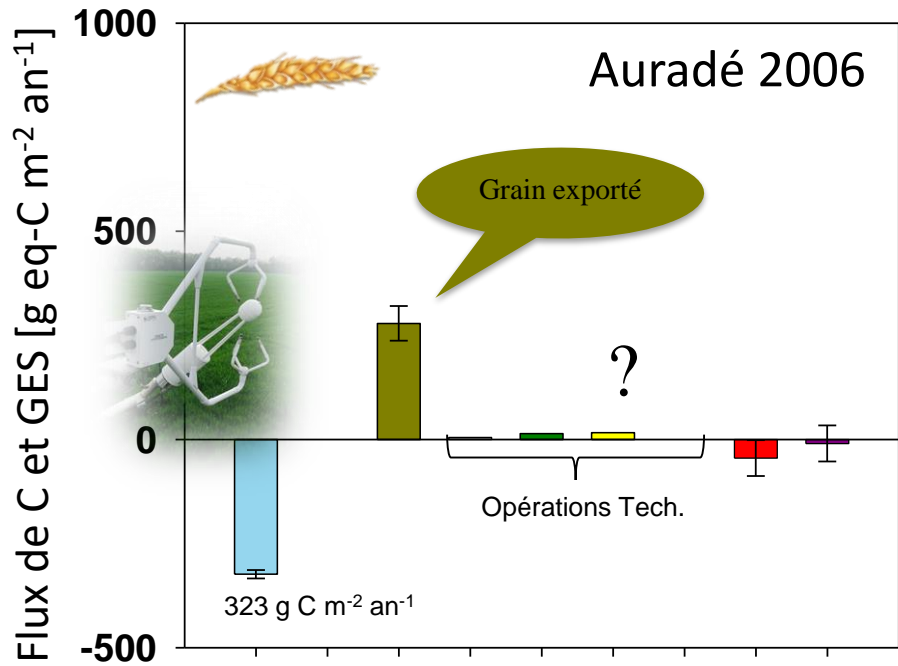
Perte annuelle
de CO₂ ☹️

En collab  Ministère van Economische Zaken
en Klimaat

IGN et l'ASP dans
le cadre du projet
Européen 

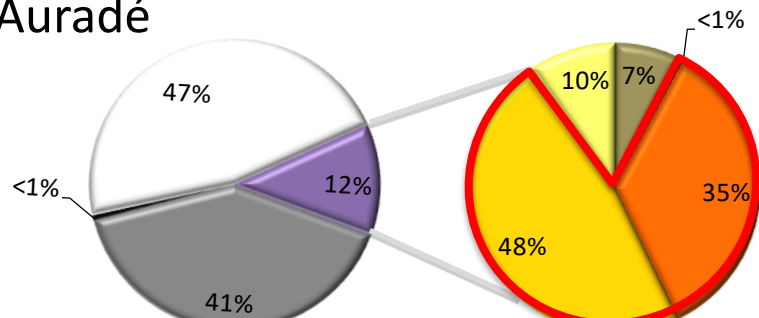
Exemple de bilans C et GES (et incertitudes)

Méthode développée au CESBIO combinant mesures in situ et approche inventaire, appliquée à tous les sites de flux sur cultures en Europe (Ceschia et al. 2010 dans AGEE)



Composantes du Bilans GES des rotations à Auradé et à Lamasquère

Auradé



Mais en prenant en compte les valeurs absolues des différents termes du bilan GES :

Les opérations techniques représentent seulement en **moyenne 10%** du bilan GES

Conclusion :

Les opérations techniques représentent une faible part des émissions de GES des parcelles (principalement émissions de N_2O liées à la dégradation des engrais N & fabrication d'engrais **fertilisation raisonnée**)

Les exports de C à la récolte représentent la principale contribution aux émissions de GES mais impossible de les réduire sans toucher à la production (= revenu des agriculteurs)

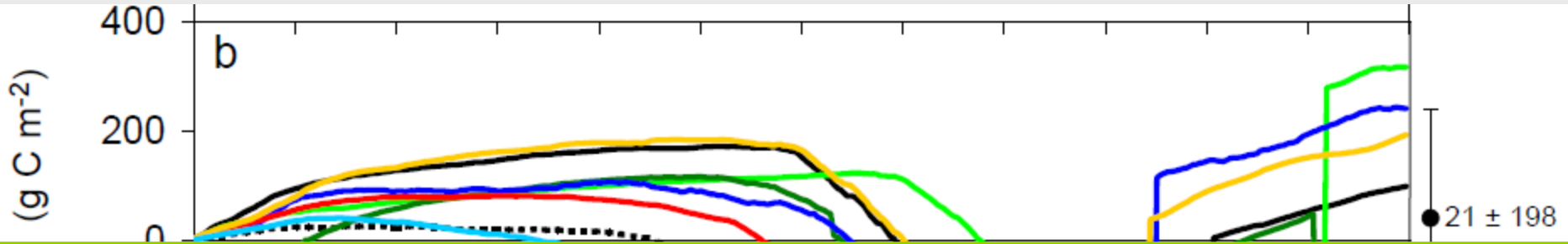
A éviter

C'est donc sur le flux net de CO_2 qu'il faut jouer = accroître la fixation de CO_2 en limitant les périodes de sol nu

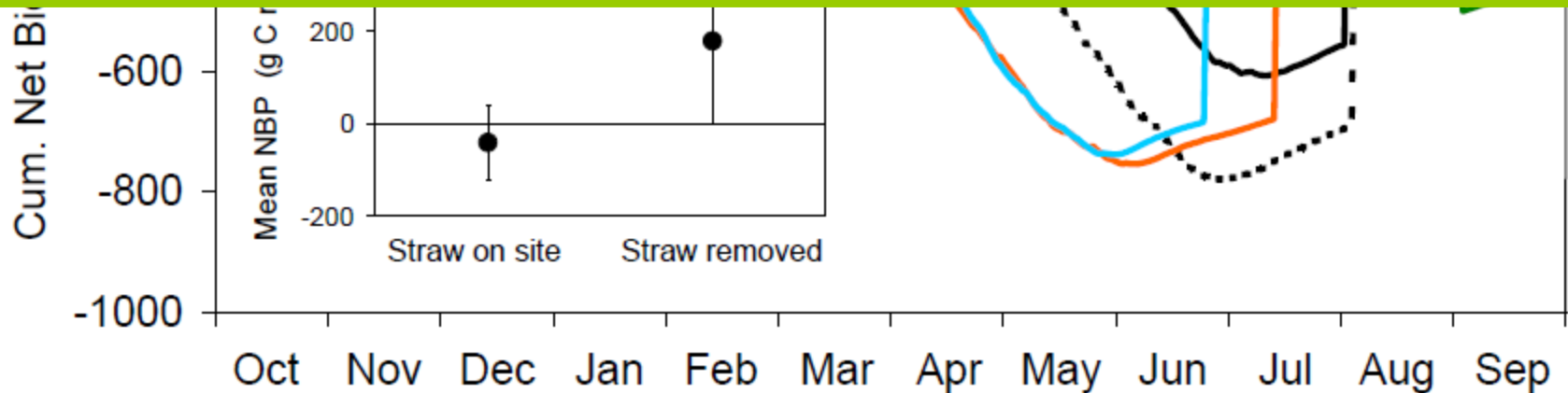
Une solution envisageable = les couverts intermédiaires

Bilan carbone

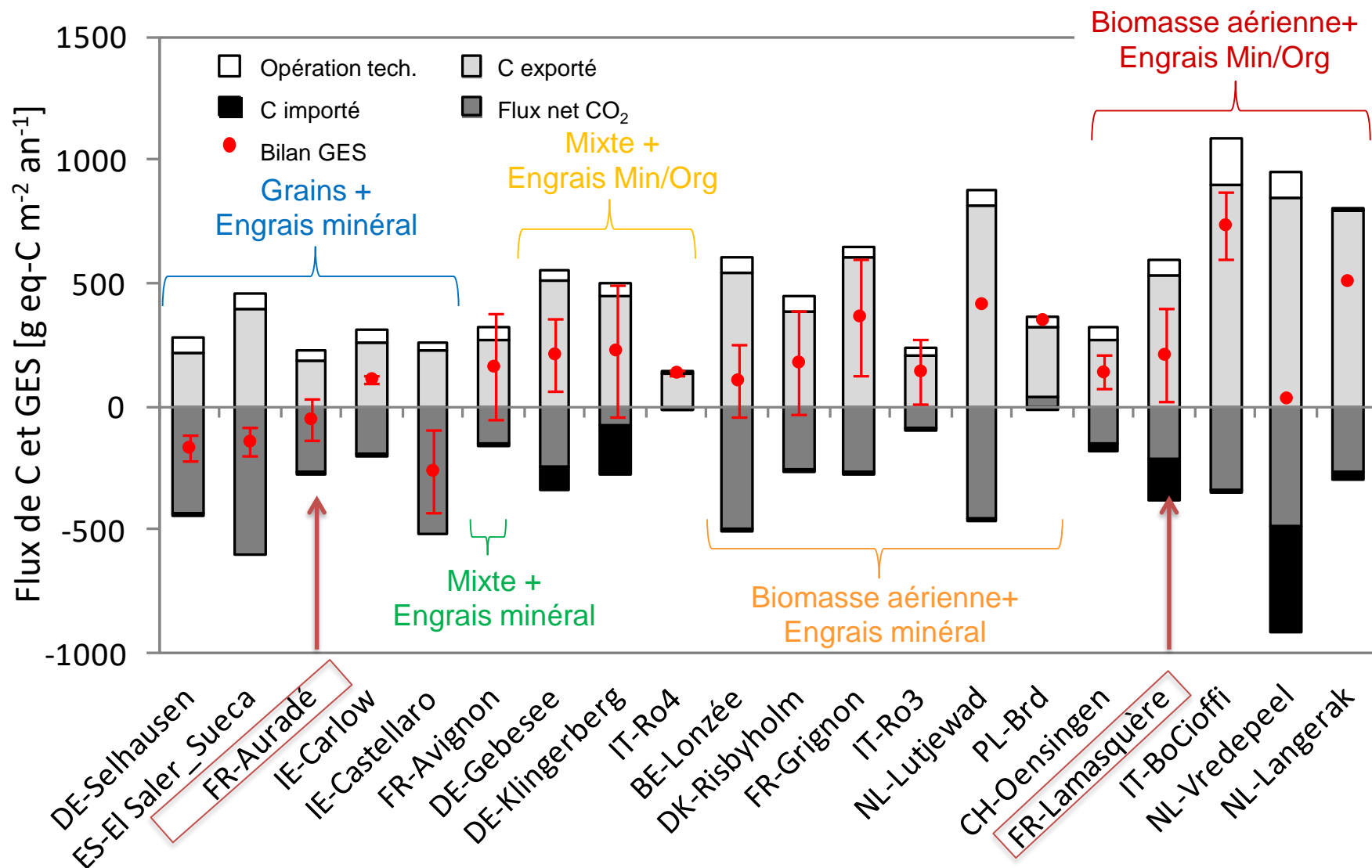
Sites du réseau CarboEurope-IP (Kutsch et al. 2010)



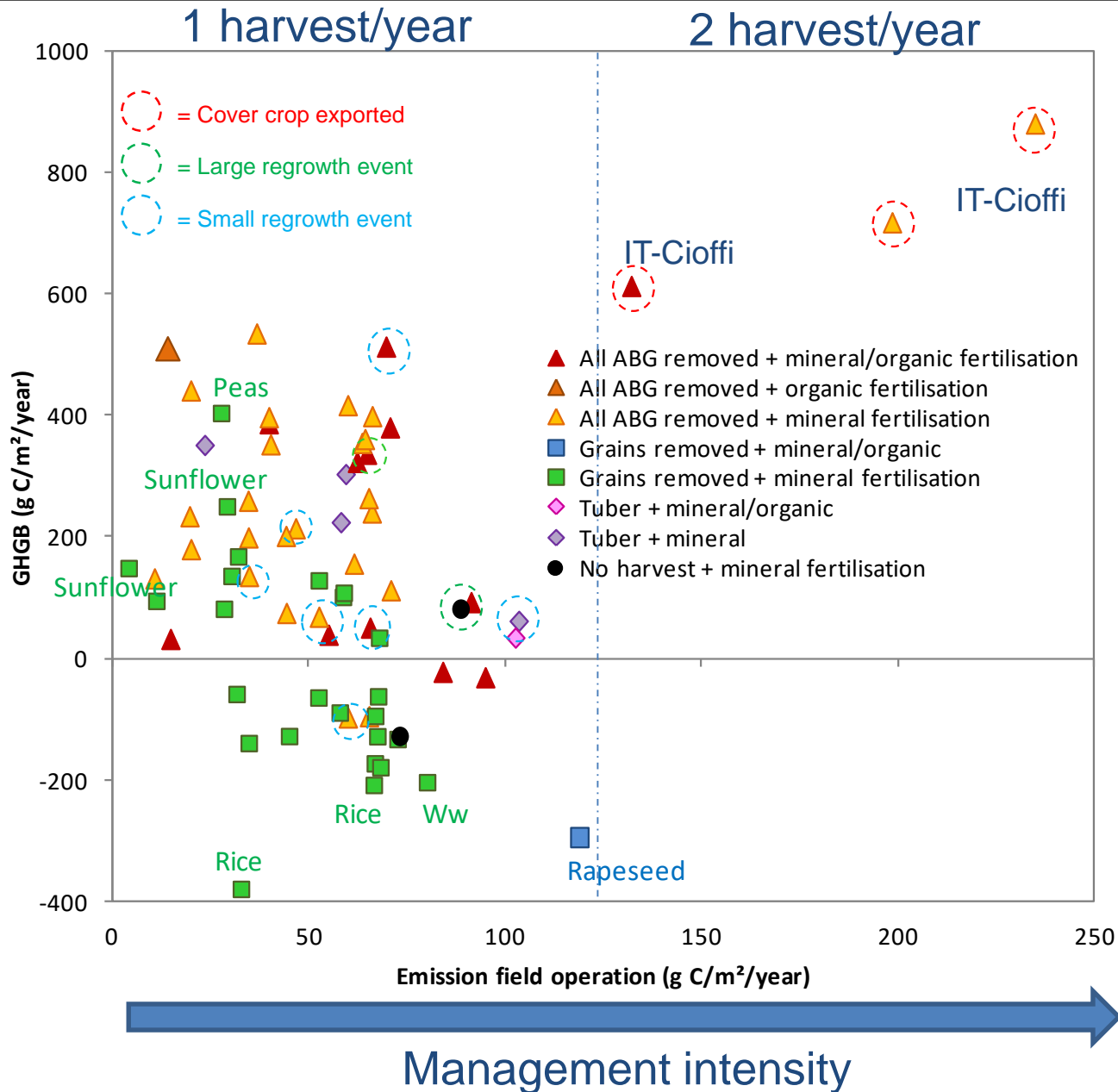
- 1) Type d'exploitation conditionne les exports et donc NBP
- 2) Incertitude sur imports et exports > Incertitude sur NEP
- 3) En moyenne perte de 2.6 % (± 4.5 %) du COS



Taltec & Ceschia pour GHGEurope



GHGB as a function of management intensity

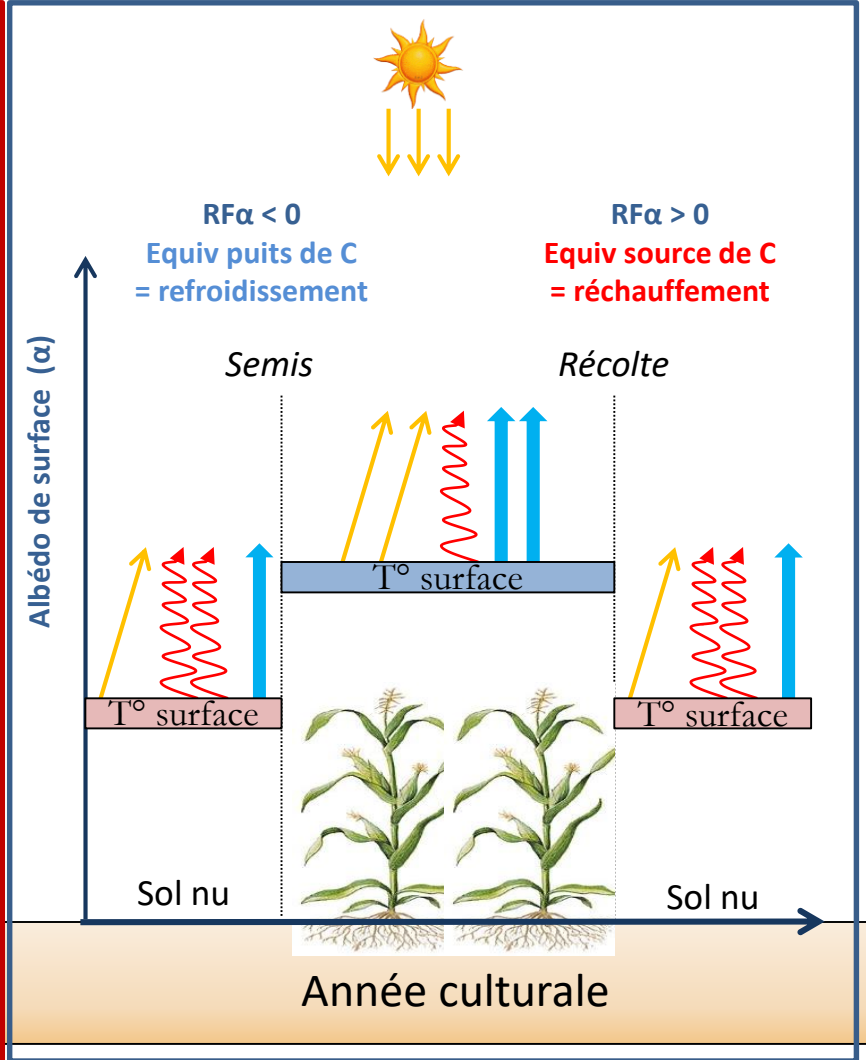
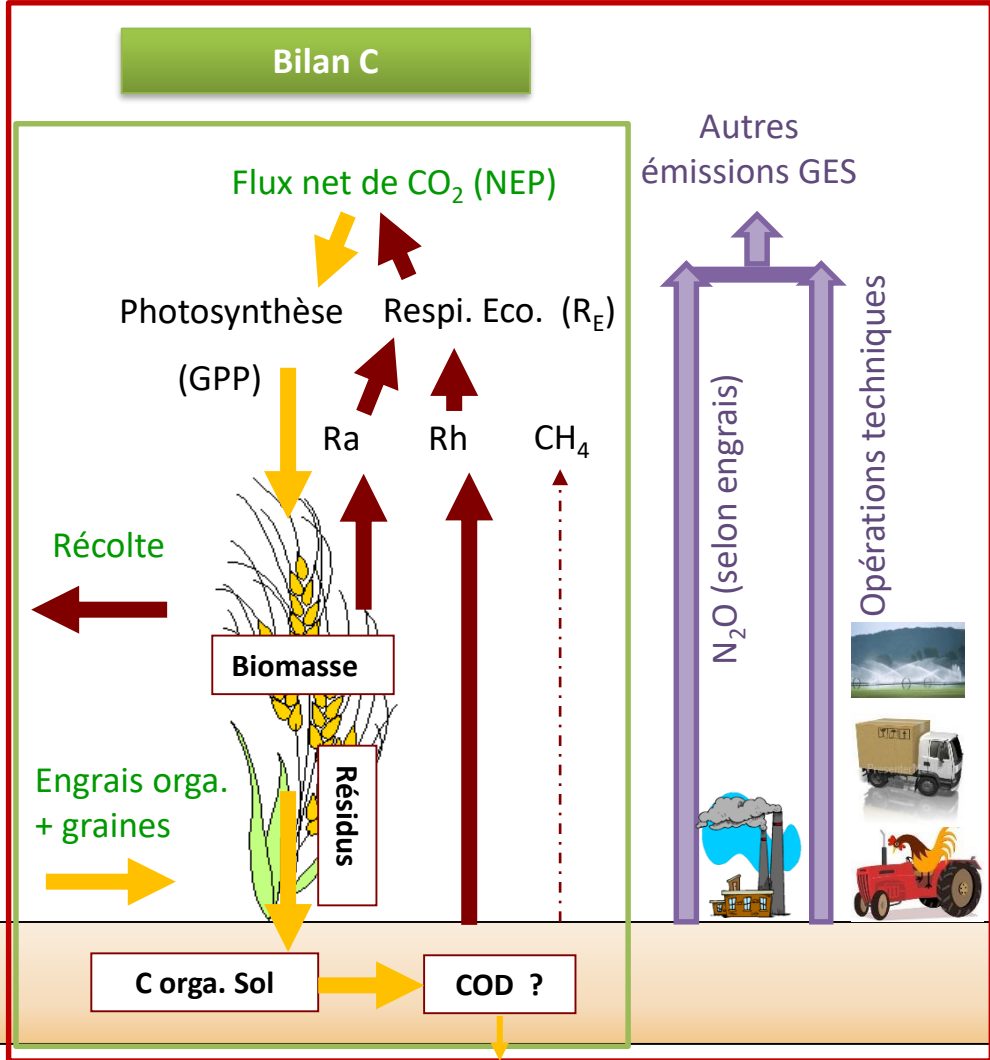


CESBIO Effet des cultures sur le climat

Effet climat (forçage radiatif en equiv C) = (Bilan C + N₂O + OT) + (effet albédo + Δ H/ET)

Effets biogéochimiques = Bilan GES

Effet biophysiques : albédo, flux de chaleur

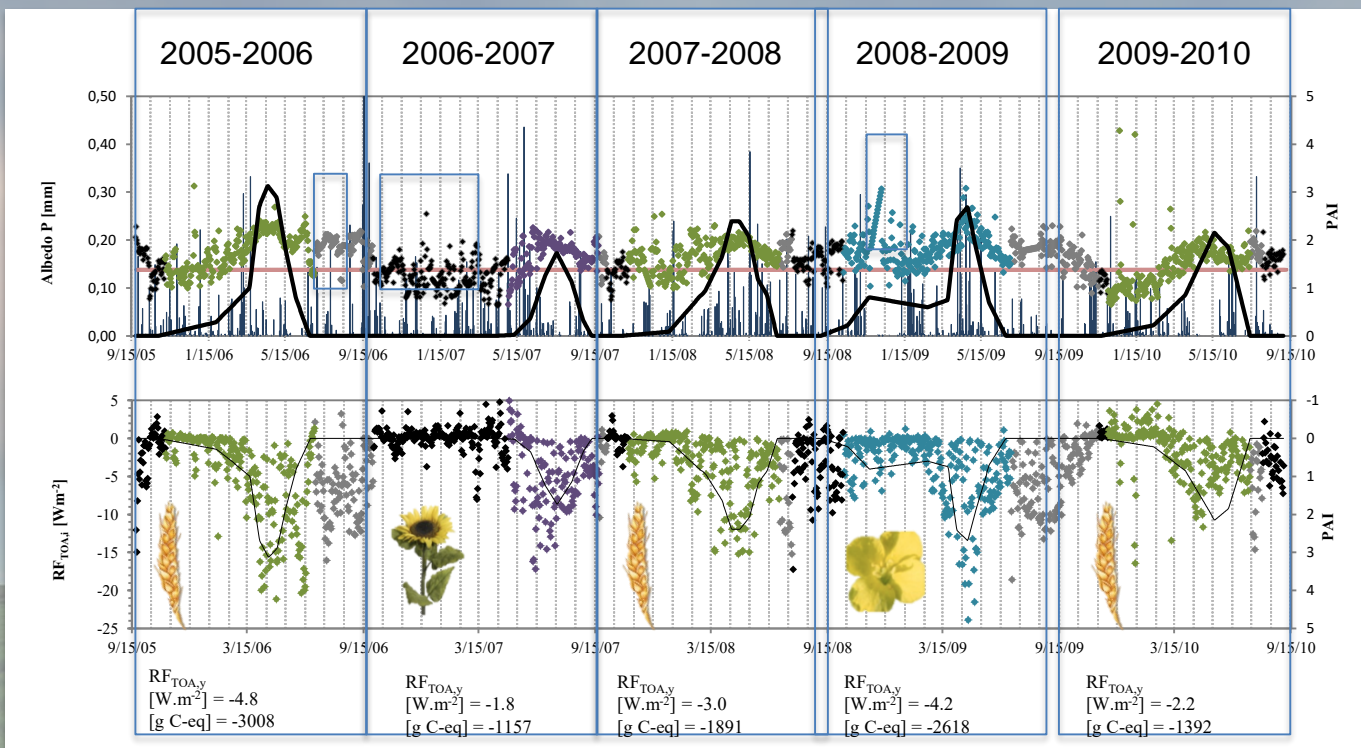


Légende : Température de surface (T° surface), Rayon. infrarouge (chaleur), Rayon. de courte longueur d'onde, Evapotranspiration

Question :

Que se passe t'il si on combine les effets biogéochimiques des couverts intermédiaires (sur les bilans de C et GES) avec les effets biogéophysiques ?

Effet albédo : Forçage radiatif de la parcelle d'Auradé entre 2005 et 2010



Variations de l'albédo :

- Humidité du sol (quand sol nu et faibles PAI)
- PAI
- Type de culture :

$$\alpha_{colza} > \alpha_{blé} > \alpha_{tournesol}$$

□ Année culturale

Occupation du sol :

- Sol nu
- Résidus
- Blé
- Tournesol
- Colza
- Sol nu de référence

Forçage radiatifs (FR) : Calculés à partir d'un **sol nu de référence** (sol nu de la parcelle moyenné sur 5 ans) :

- Valeurs proches de 0 pendant les périodes de sol nu (dépendance à l'humidité du sol : i.e. sept. 2006, juill. 2010)
- Valeurs de plus en plus négatives, suivant la courbe de développement de la végétation (PAI) puis valeurs de moins en moins négatives pendant la période de senescence
- Albédo des résidus > albédo du sol nu de référence donc valeurs de FR négatives

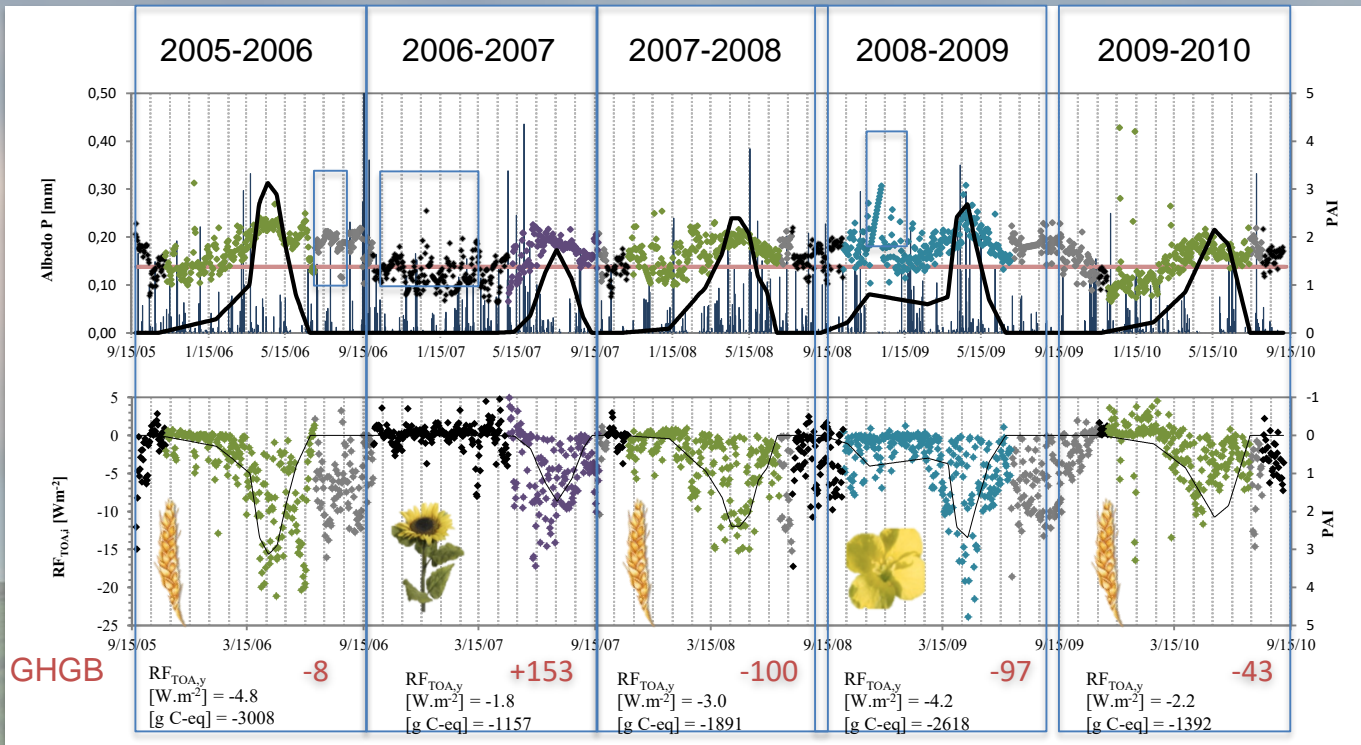
RF moyennés à l'année :

$$RF_{blé\ 2005-2006} > RF_{blé\ 2007-2008} > RF_{blé\ 2009-2010}$$

$$RF_{blé\ 2009-2010} \approx RF_{tournesol\ 2006-2007}$$

RF fortement dépendants de la variabilité climatique : différences en terme de RF pouvant aller au delà de 50%
RF variables pour les cultures d'hiver mais globalement beaucoup plus négatifs que les RF des cultures d'été (car période de sol nu plus longue) : Effet refroidissant culture d'hiver > effet refroidissant culture d'été

Effet albédo : Forçage radiatif de la parcelle d'Auradé entre 2005 et 2010



Variations de l'albédo :

- Humidité du sol (quand sol nu et faibles PAI)
- PAI
- Type de culture :

$$\alpha_{\text{colza}} > \alpha_{\text{blé}} > \alpha_{\text{tournesol}}$$

□ Année culturale

Occupation du sol :

- Sol nu
- Résidus
- Blé
- Tournesol
- Colza
- Sol nu de référence

Les forçages radiatifs sont calculés par rapport à un sol nu de référence (valeur arbitraire), on ne peut donc pas les comparer directement au FR induit par les bilans de GES.

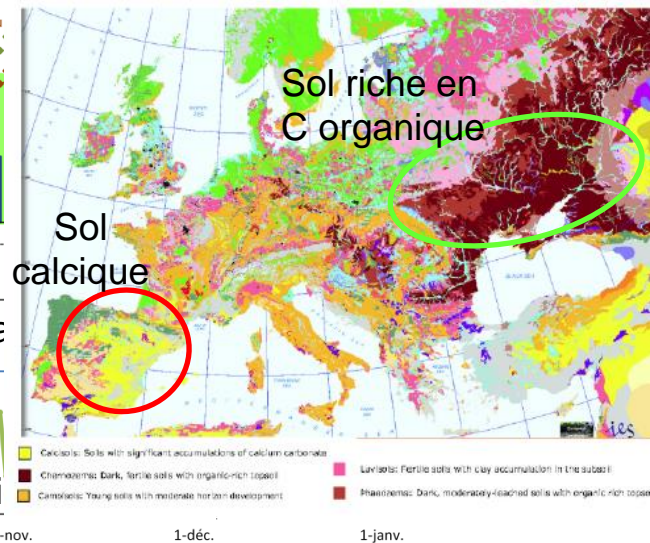
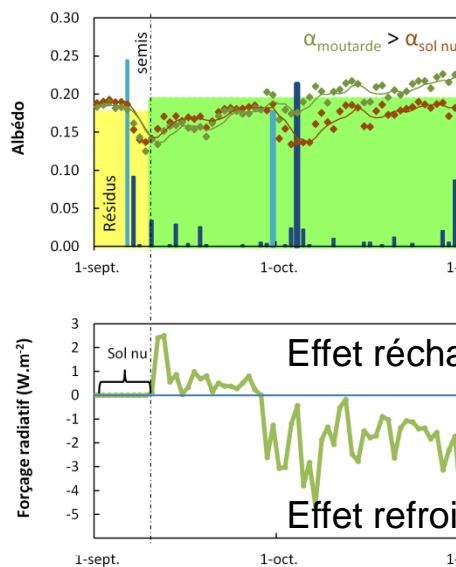
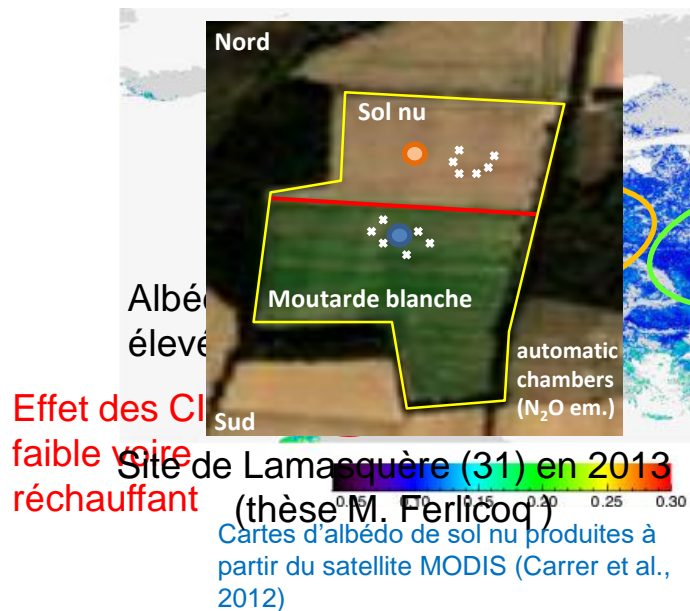
Par contre on peut comparer les cultures entre elles sur un même site (différence de FR entre les cultures) :

Par exemple, l'effet refroidissant du blé ou du colza est plus important que celui du tournesol

Cette étude montre que les variations d'albédo des cultures ont un effet plus important sur le **forçage radiatif total** de la parcelle agricole que les forçages radiatifs induits par les différences en terme de bilans C ou GES entre culture

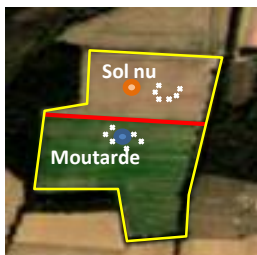
Quels effets biophysiques radiatifs induits par les CIMS ?

Effets Albédo : les CIMS permettent généralement d'accroître la quantité de rayonnement solaire (courtes longueurs d'ondes) renvoyés vers l'espace par rapport à un sol nu. Variation d'albédo de -3% à +20% (Kaye & Quemada, 2017).

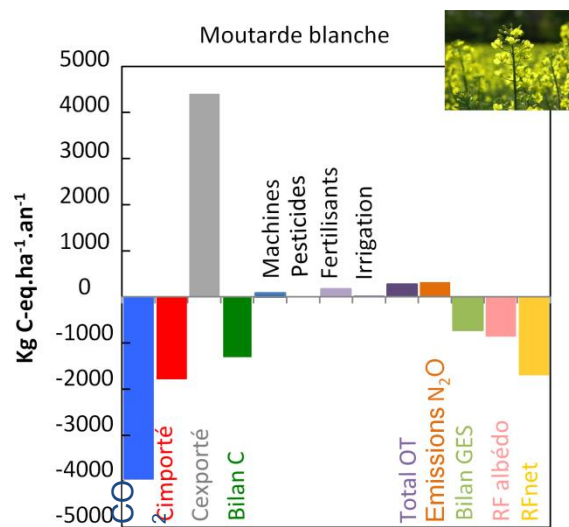
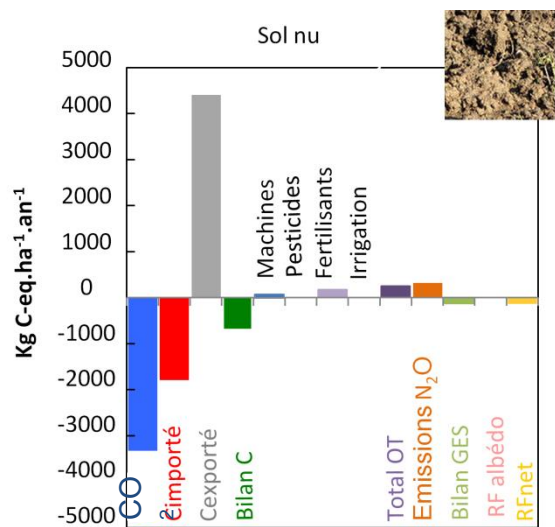


La télédétection peut être très utile pour identifier là où les CIMS devraient être introduits pour atténuer les changements climatiques via l'effet albédo (Projets CICC & Bagages en collab. avec Météo France, Thèse de Gaetan Pique).

Effets albédo vs effets biogéochimiques?



Comparaison blé – Moutarde (2.5 mois) vs blé- sol nu



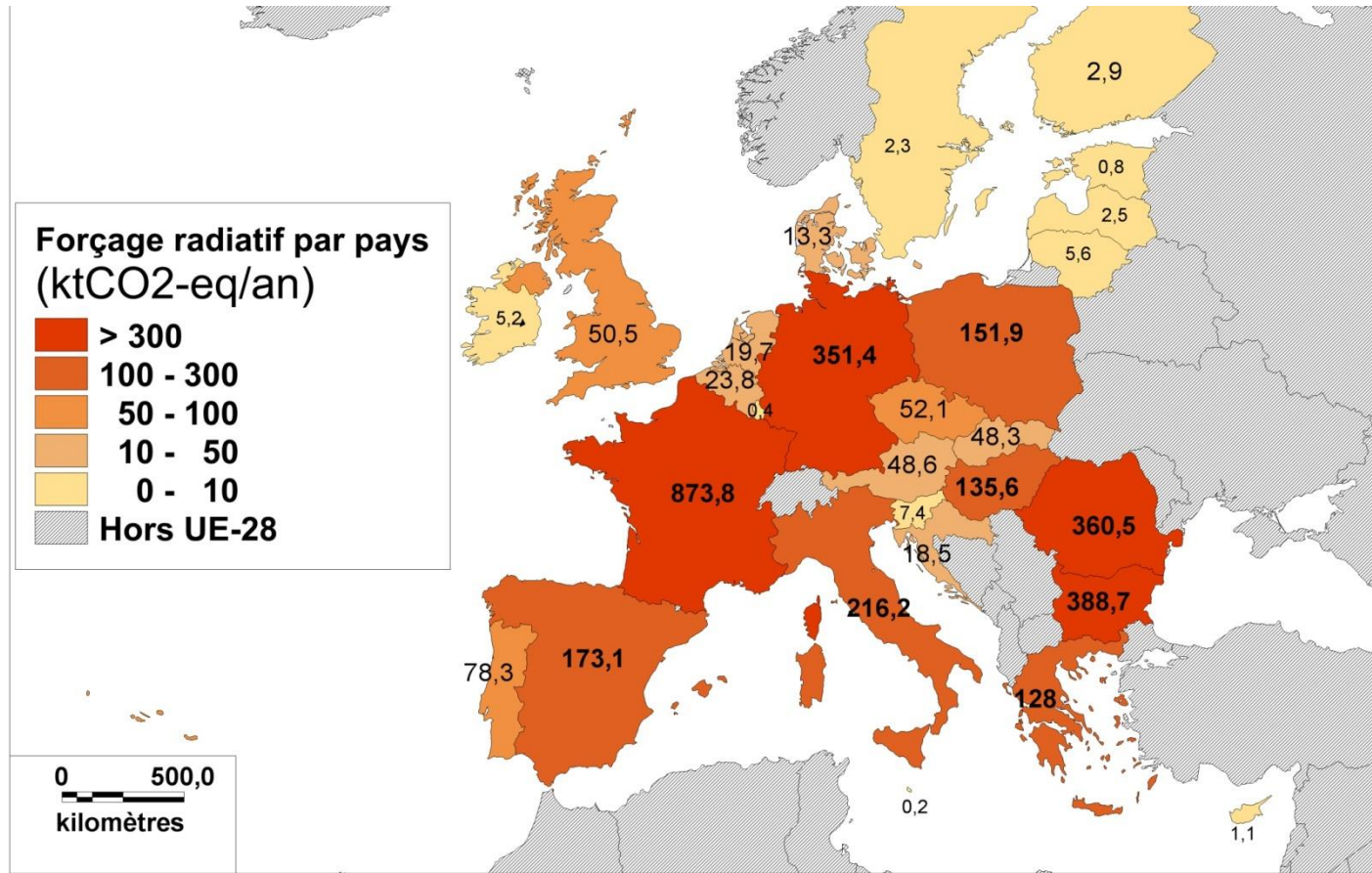
Ferlicoq (2016), Ceschia et al. (2017)

- 510 Kg de C/ha stockés par le CIMS,
- émissions GES des opérations techniques négligeables,
- effet albédo équivalent à un stockage de 720 Kg de C/ha (mais méthodologie de conversion en équivalent C mal adaptée à ce genre d'étude à court terme).

Sur ce site, le stockage de C et l'effet albédo pourraient être multipliés par 4 et 10, si le CIMS était maintenu 6.5 mois (Ferlicoq & Ceschia, 2015).

Effet albédo des CIMS par pays en équivalent CO₂

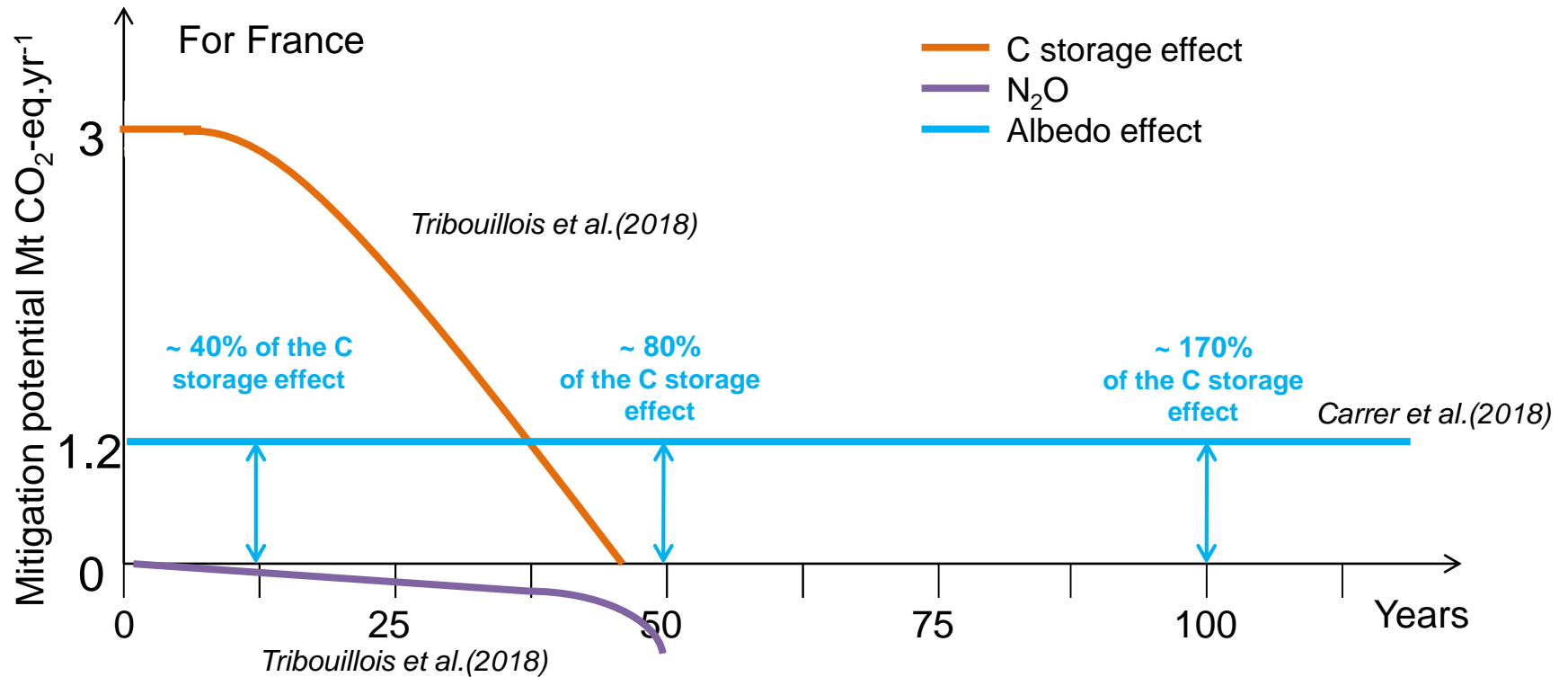
(Carrer et al. 2018)



- Les pays qui ont le plus fort potentiel d'effet albédo lié à l'introduction des CIMS sont la France, la Roumanie, la Bulgarie et l'Allemagne,
- En moy. pour les 28 pays de l'UE, l'effet albédo des CIMS représente 10% de l'effet stockage de C mais sans présenter d'effet saturation à long terme (au contraire !!)

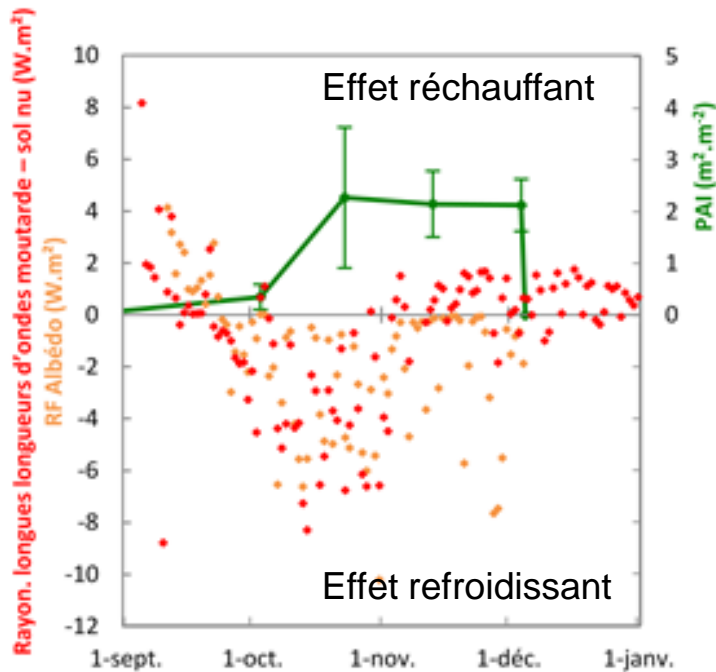
Effet atténuation des CC par les CIMS

Effets albédo vs effets biogéochimiques?



Quels autres effets biophysiques radiatifs induits par les CIMS ?

Effets sur le rayonnement InfraRouge thermique (interagit avec les GES) :



Ceschia et al. (2017)

- Effet refroidissant des CIMS via la ↓ du rayonnement IR thermique équivalent à l'effet albédo.

- Les CIMS diminuent la quantité d'énergie disponible à la surface par rapport au sol nu → -2.5 °C dans le sol entre 0-5 cm de sol.

Probable ↓ de la vitesse de minéralisation de la MO dans le sol (moins d'émissions de CO₂ et de N₂O)

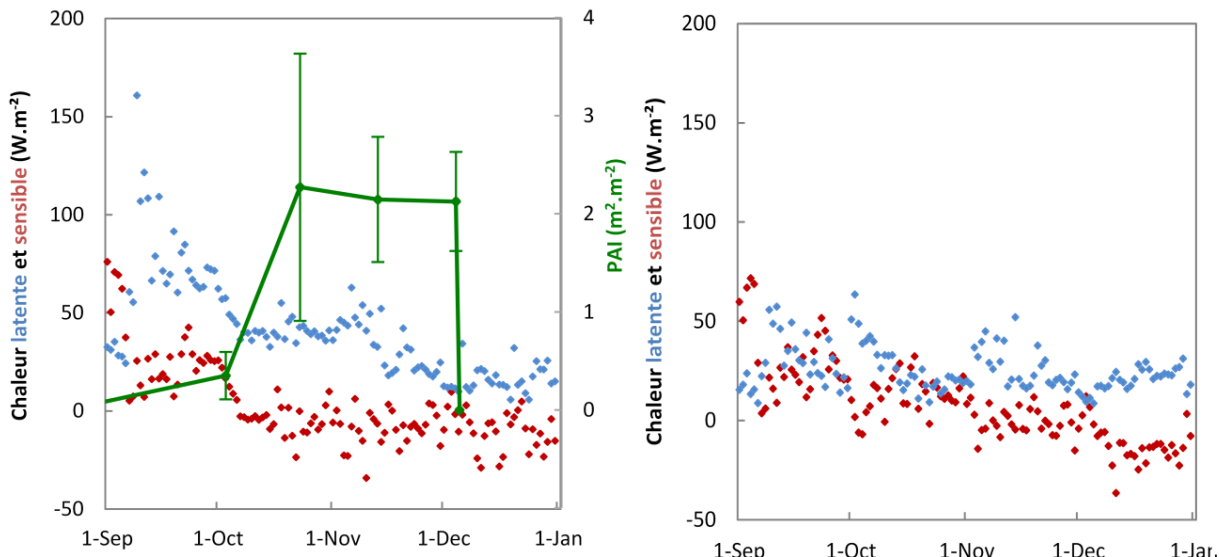
Bientôt la mission spatiale THRISHNA permettra de cartographier les températures de surface à hautes résolutions (temporelle/spatiale) sur tout le globe et de quantifier ces effets spatialement.

Quels effets biophysiques non-radiatifs induits par les CIMS ?

Non seulement les CIMS réduisent la quantité d'énergie totale disponible en surface mais ils modifient aussi la façon dont elle va être répartie /consommée pour produire des flux de **chaleurs sensible** ou pour l'évapotranspiration ?

Moutarde blanche

Sol nu

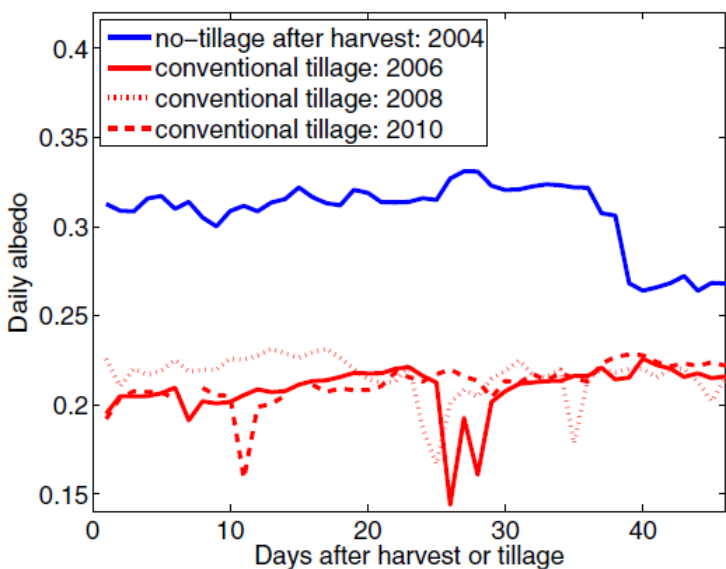


Ceschia et al. (2017)

- Les CIMS ↑ l'évapotranspiration et réduisent les flux de chaleur sensible ce qui tend à refroidir le climat (Boucher et al., 2004),
- Effet global difficile à quantifier mais effet local/régional sur la température de l'air en surface non négligeable et facile à estimer (Georgescu et al., 2011).

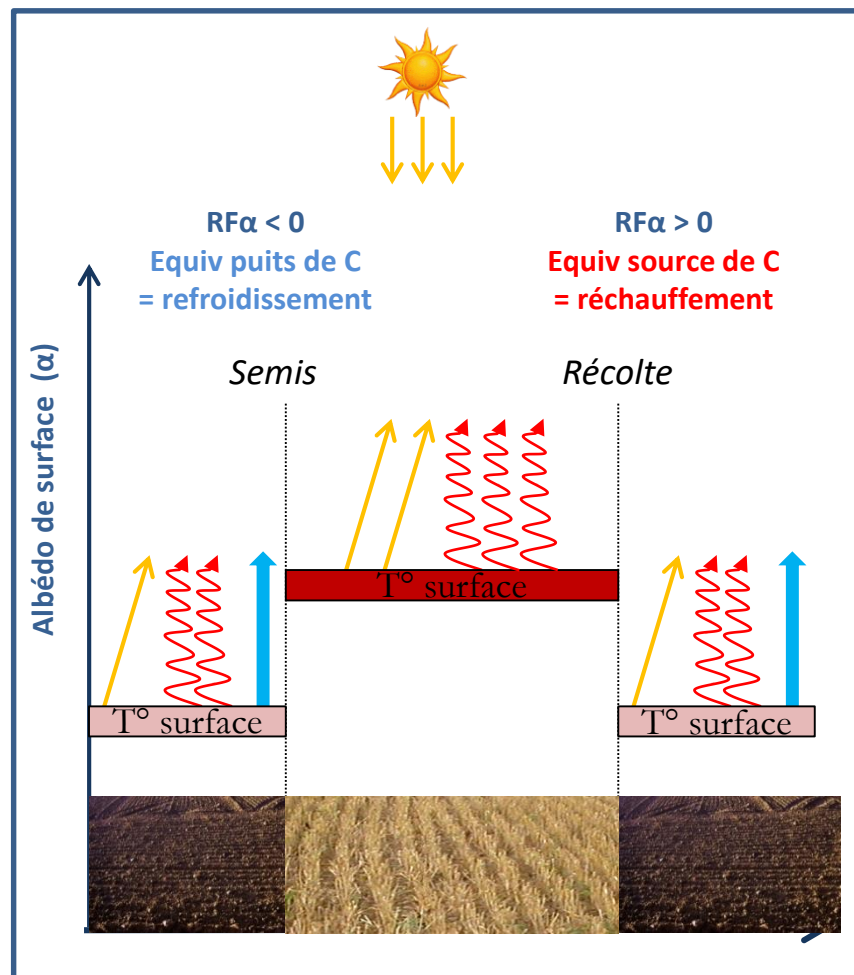
Le modèle SAFYE-CO2 permet, en simulant les flux d'évapotranspiration de quantifier spatialement l'effet des CIMS sur la répartition de l'énergie en surface.

Effet albédo lié au maintien des pailles en surface



Davin et al. 2014

Cette pratique généralisée à l'Europe permettrait de diminuer de 2°C la température de l'air en été lors des pics de chaleur. (Davin et al. 2014).



Pas plus d'effet sur la température car malheureusement le maintien des résidus (assimilables à un paillage) réduit fortement l'évaporation du sol ce qui augmente les émissions de chaleur de la surface (rayonnement IR). Une partie du bénéfice de l'augmentation d'albédo (moins d'énergie dispo. en surface) est donc perdu car les émissions de chaleur augmentent (à la différence des CI).

D'un point de vue pratique

En priorité il faudrait donc d'un point de vue atténuation au réchauffement climatiques :

- Implanter des CI dans les zones qui s'y prêtent (sol + climat) pour gagner sur les aspects bilan C, GES, albédo, flux de chaleur : **c'est le jackpot climatique !!!**

- Favoriser les repousses. Le déchaumage, quand il est effectué dans des zones où il peut avoir un effet faux semis, est à encourager car permet de maintenir un albédo élevé, de fixer du C, de limiter les flux de chaleur (à considérer selon les zones climatiques ? Selon les prévisions climatiques saisonnières ?),

- Si trop sec pour faire un faux semis ou implanter des CI, maintenir les résidus en surface permet d'augmenter l'albédo mais le gain climatique associé est en grande partie perdu par l'augmentation des flux de chaleur à la surface (T°C du sol augmente).

- Éviter au maximum le labour avec retournement en été car pertes de C du sol et albédo faible (+assèchement du sol). Mieux vaudrait le repousser à l'automne.

- Des combinaisons sont bien sur envisageables/à encourager (ex. repousses ou maintien des résidus en été et semis de CI à l'automne).

Résumé : effets des CI & repousses sur le climat

Effets biogéochimiques :

- Les CI et repousses permettent de fixer plus de carbone atmosphérique et pourraient compenser par ce biais 8% des émissions de GES du secteur agricole en Europe (Popleau & Don, 2015).
- Ils permettent de réduire les émissions de N_2O en fixant l'N du sol (effet difficile à quantifier à grande échelle) et le recours en engrais minéraux

 réduction de la concentration atmosphérique en GES

Effets biophysiques :

- Ils permettent de réfléchir plus d'énergie lumineuse vers l'espace (albédo plus grand que celui du sol) ce qui laisse moins d'énergie disponible à la surface pour chauffer l'air et le sol : **effet très refroidissant sur le climat**
- Accélération/augmentation des retours d'eau vers l'atmosphère (via la transpiration des CI) :
 - la vaporisation de l'eau consomme beaucoup d'énergie, il en reste donc moins pour chauffer l'air sous forme de rayonnement infra rouge (à quantifier).
 - favorise la formation des nuages qui réfléchissent plus d'énergie lumineuse vers l'espace (albédo de l'atm. augmente) (à quantifier).
 - L'eau retourne plus régulièrement au sol (pluies) : accélération du cycle de l'eau

Bilan GES

- 203 ± 253 g C-eq m⁻² an⁻¹ pour 41 années-sites du réseau CarboEurope-IP
- Robertson et al. (2000) : rotation maïs/soja/blé

Ecosystem management	CO ₂				N ₂ O	CH ₄	Net GWP
	Soil C	N fertilizer	Lime	Fuel			
Annual crops (corn-soybean-wheat rotation)							
Conventional tillage	0	27	23	16	52	-4	114
No till	-110	27	34	12	56	-5	14
Low input with legume cover	-40	9	19	20	60	-5	63
Organic with legume cover	-29	0	0	19	56	-5	41

- Robertson and Grace (2004) : 893 à 1189 g C-eq m⁻² yr⁻¹ pour une rotation riz/blé/pois en Inde.
- Schulze *et al.* (2009) 40 ± 40 g C-eq m⁻² yr⁻¹ pour cultures en Europe (2000 and 2005) par approches de modélisation bottom-up et top-down

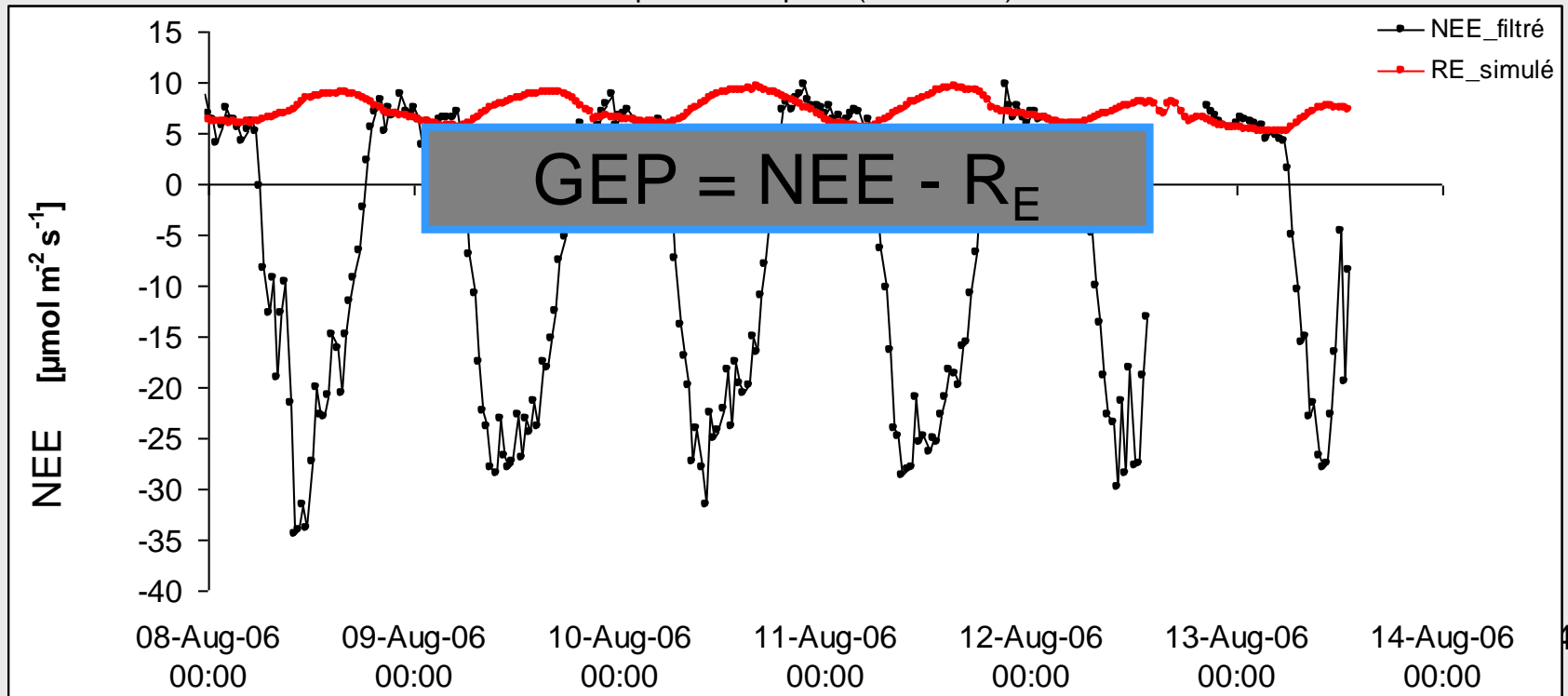
Décomposition du flux net de CO₂ : GEP et R_E

Méthode de Reichstein et al. (2005)

(ajustement du modèle de Lloyd and Taylor, (1994) sur les données nocturnes)

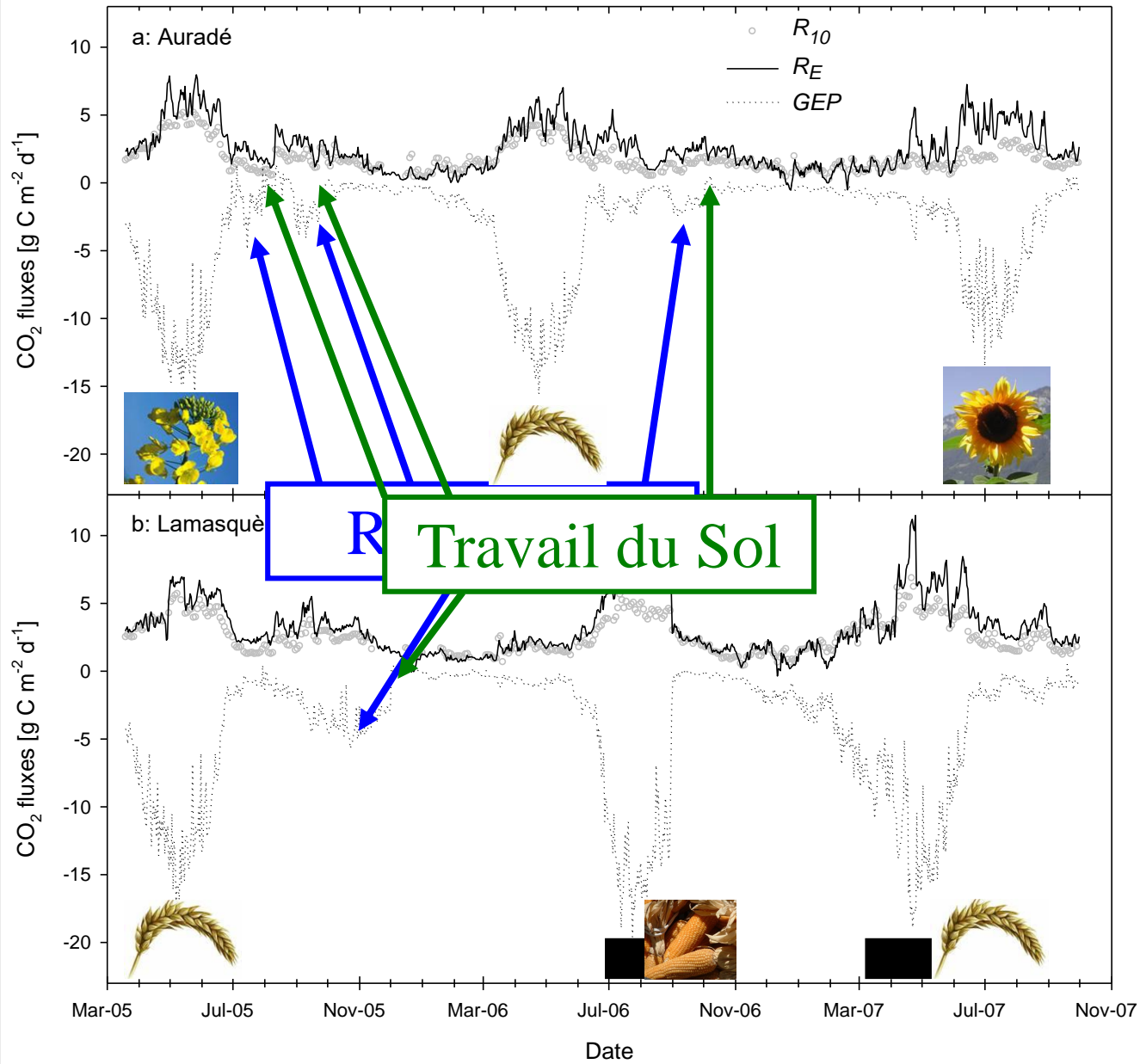
$$R_E = R_{ref} \cdot e^{E_0 \cdot (1/(T_{ref} - T_0) - 1/(T_A - T_0))}$$

Exemple Lamasquère (Maïs 2006)



Effet des pratiques culturales sur la photosynthèse et la

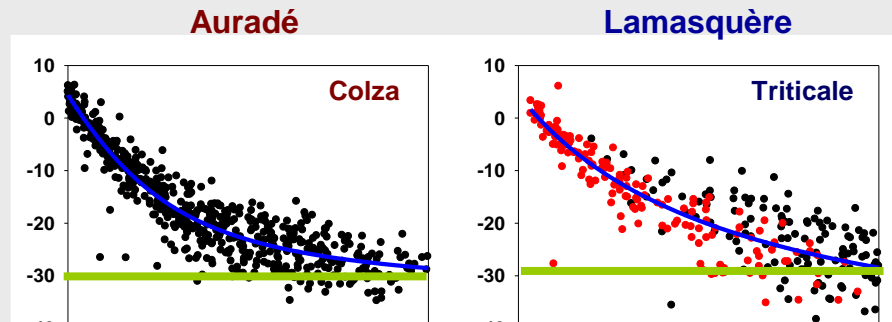
Respiration des agrosystèmes



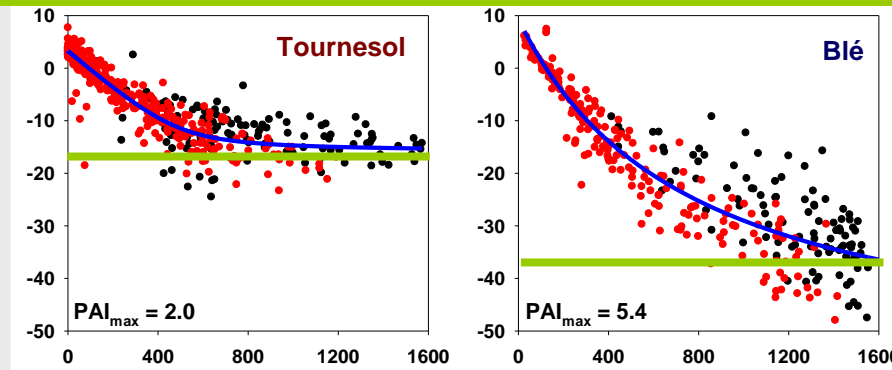
Réponse du flux net de CO₂ à l'éclairement

(Béziat et al. 2009 AFM)

conditions nuageuses
conditions claires
NEE = f(PPFD absorbé)



- 1) Impact de différents facteurs climatiques sur NEE
- 2) Fixation annuelle de C sur la plupart des cultures
- 3) Longueur de la saison de végétation impacte les cumuls
- 4) Importance de l'effet des repousses (*jusqu'à 50 g C m⁻² stocké*)
- 5) Importance de l'effet des pratiques (*récolte précoce, travail du sol*)

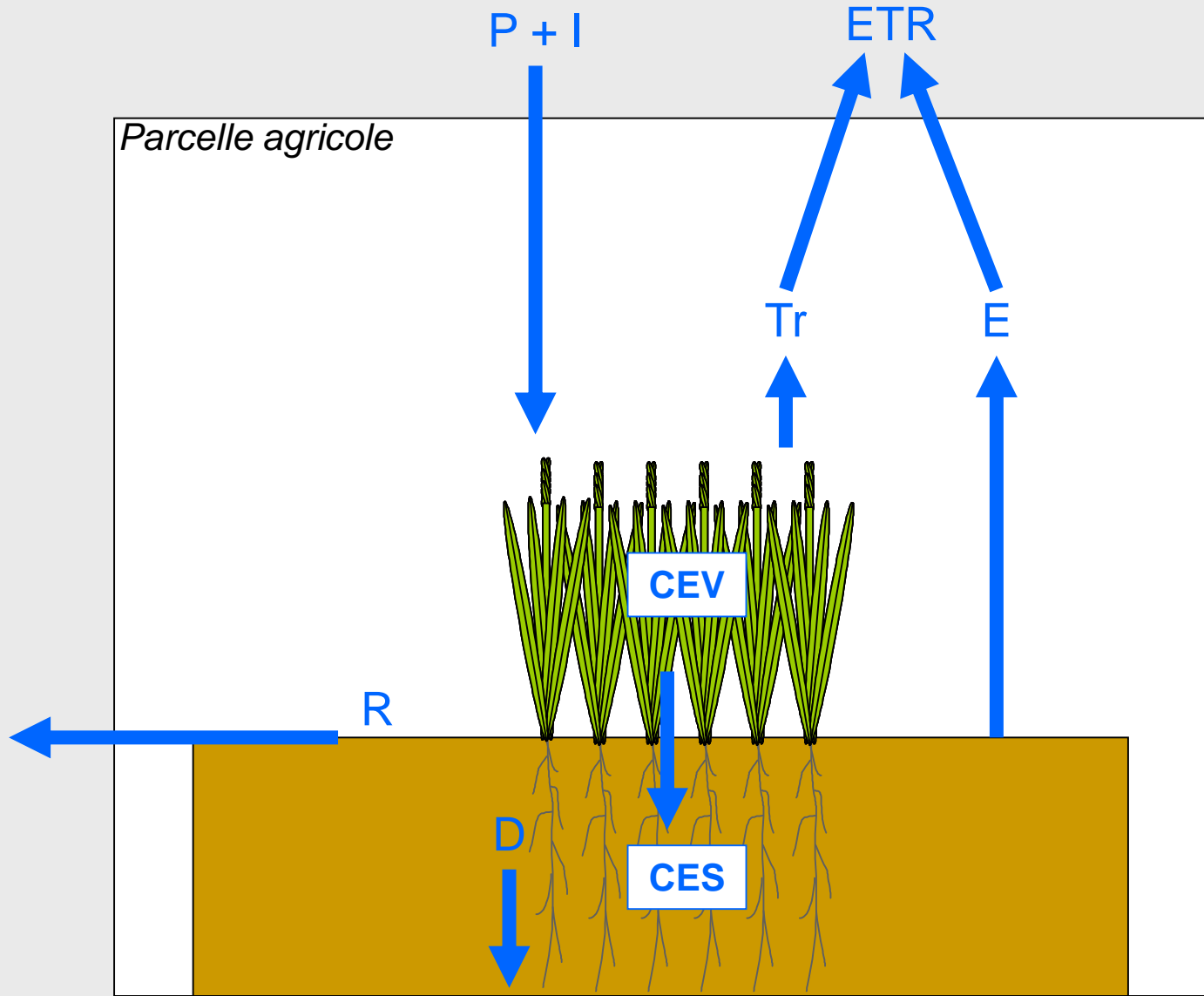


PPFD absorbé [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

Systeme

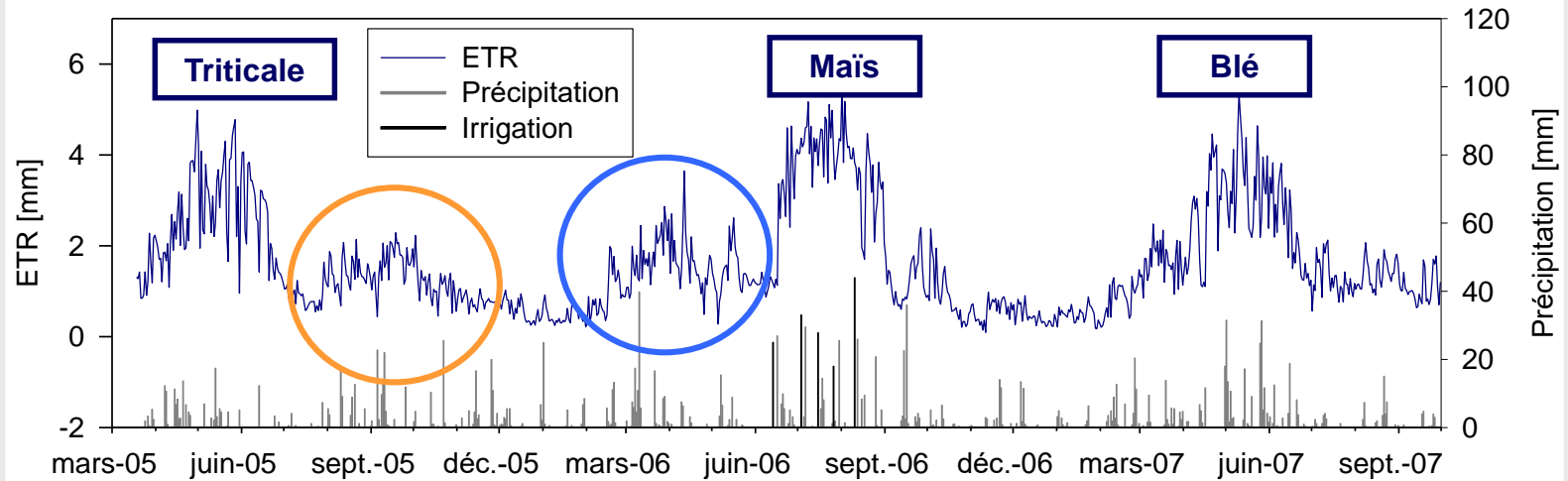
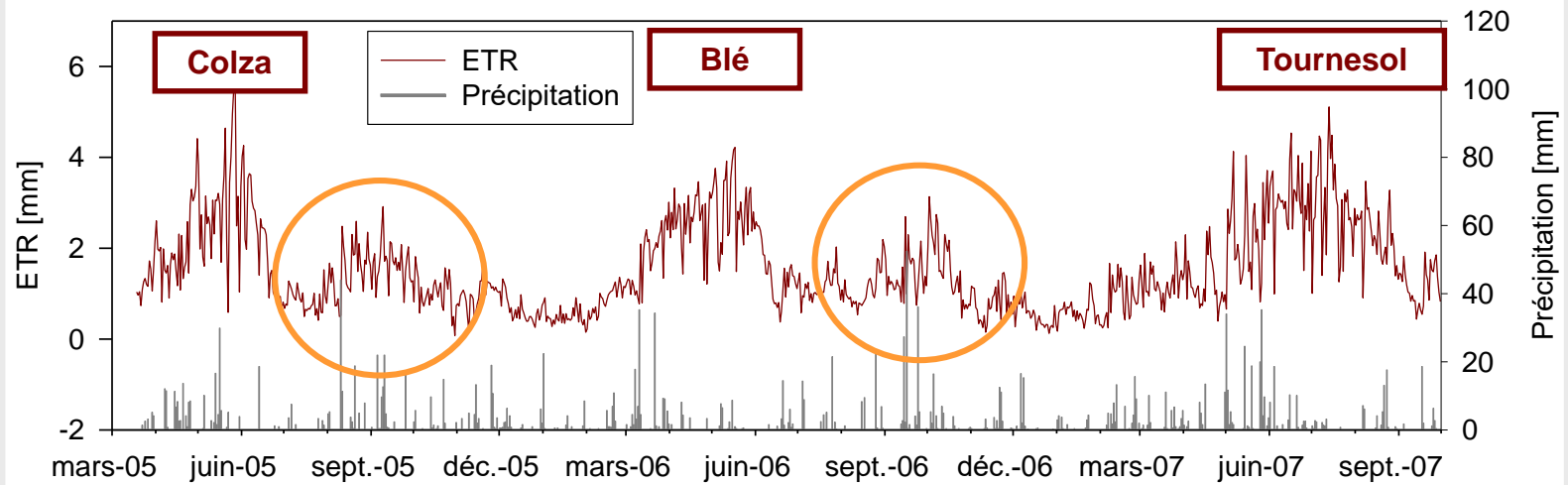
Bilan d'eau

$$P (+I) - dCES = E + TR + (D + R)$$



Dynamique du flux net de H₂O : ETR

Auradé

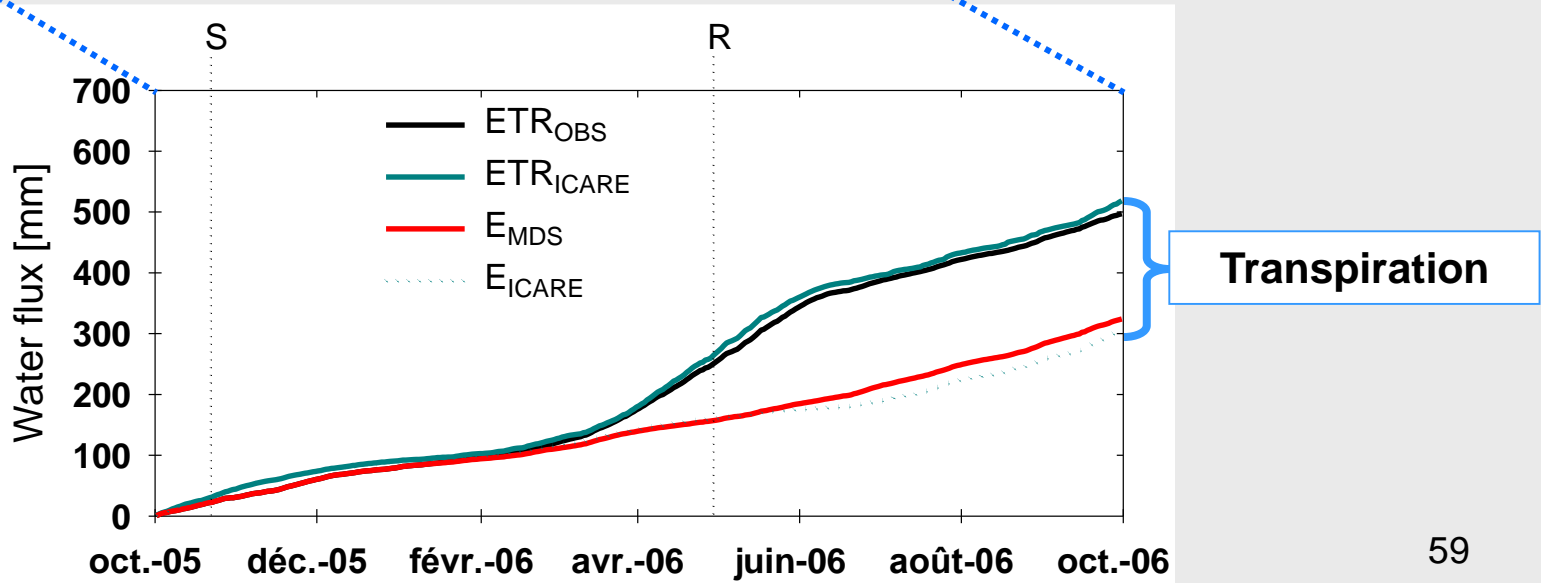
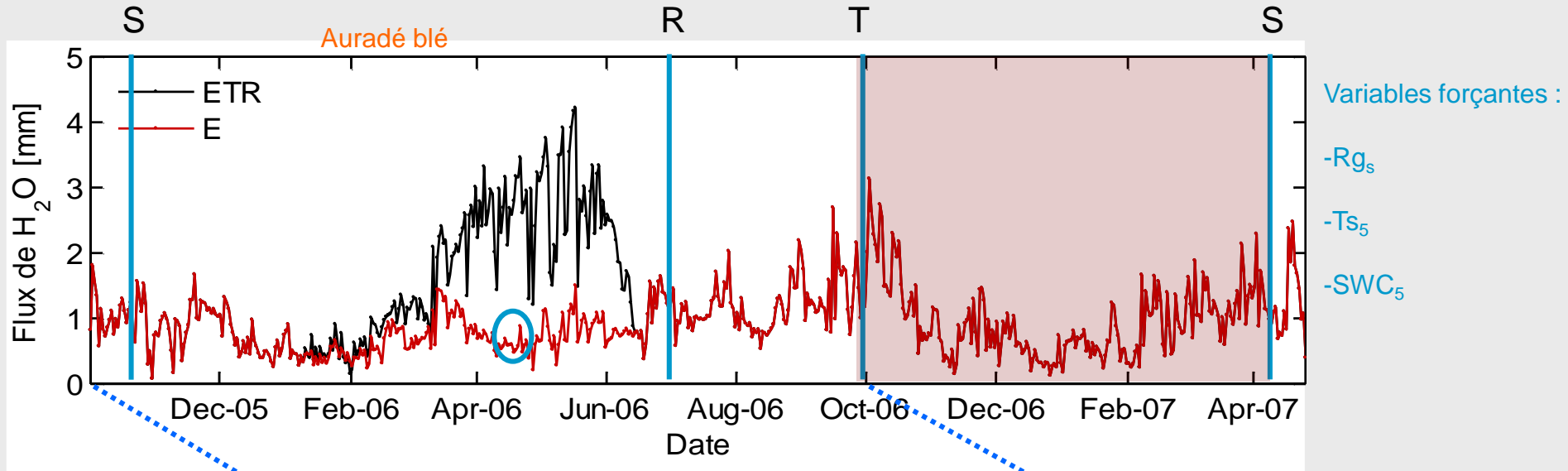


Lamasquère

(Béziat et al. en préparation)

Décomposition du flux net de H₂O : E et TR

Méthode statistique de décomposition (*Marginal Distribution Sampling*)

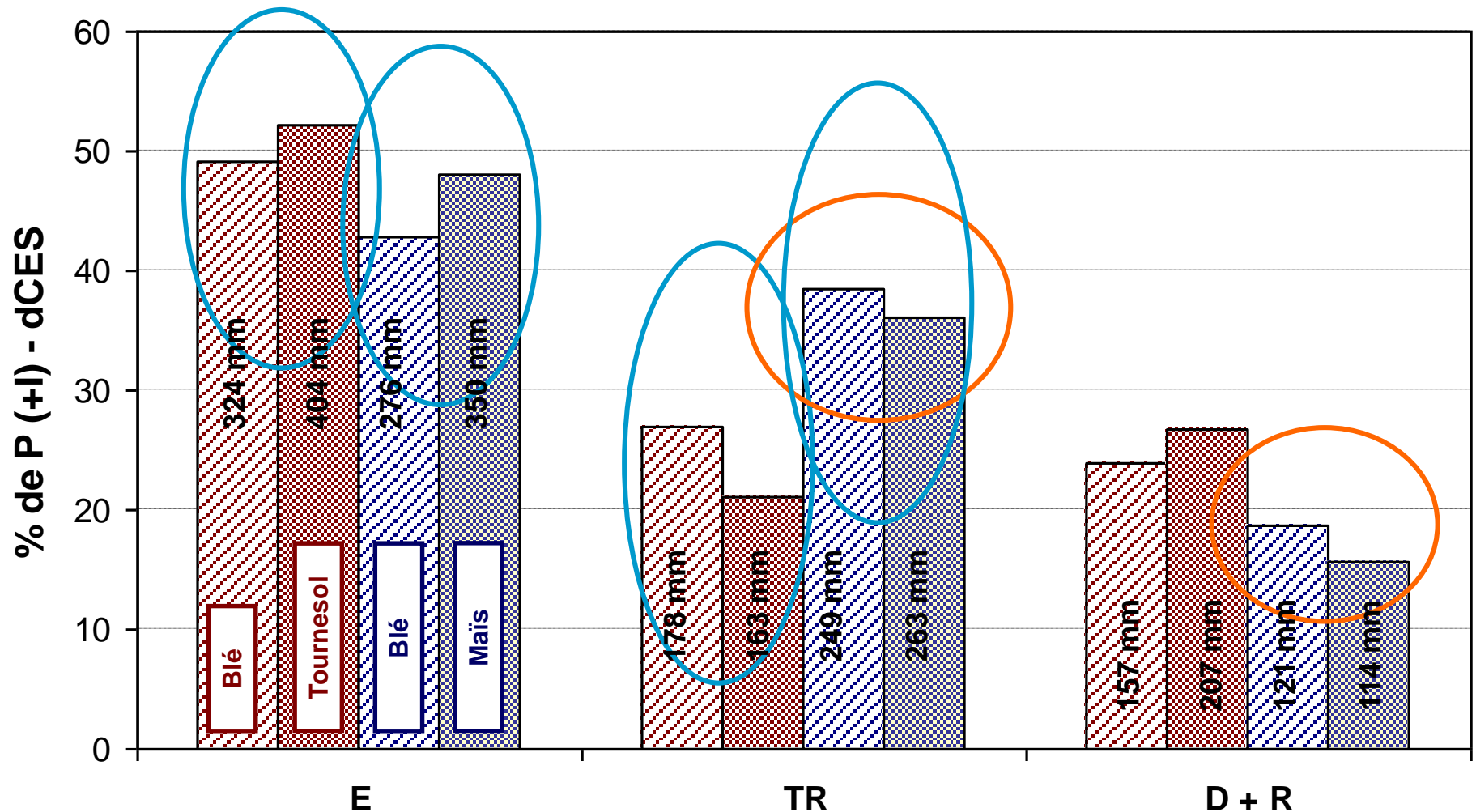


(Béziat et al. en préparation)

Bilan d'eau

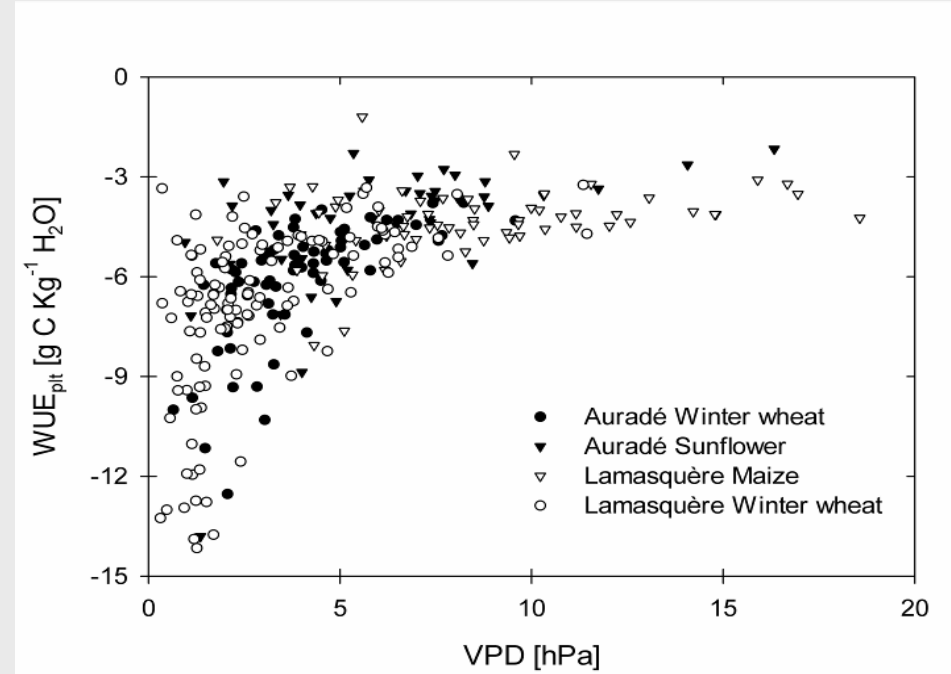
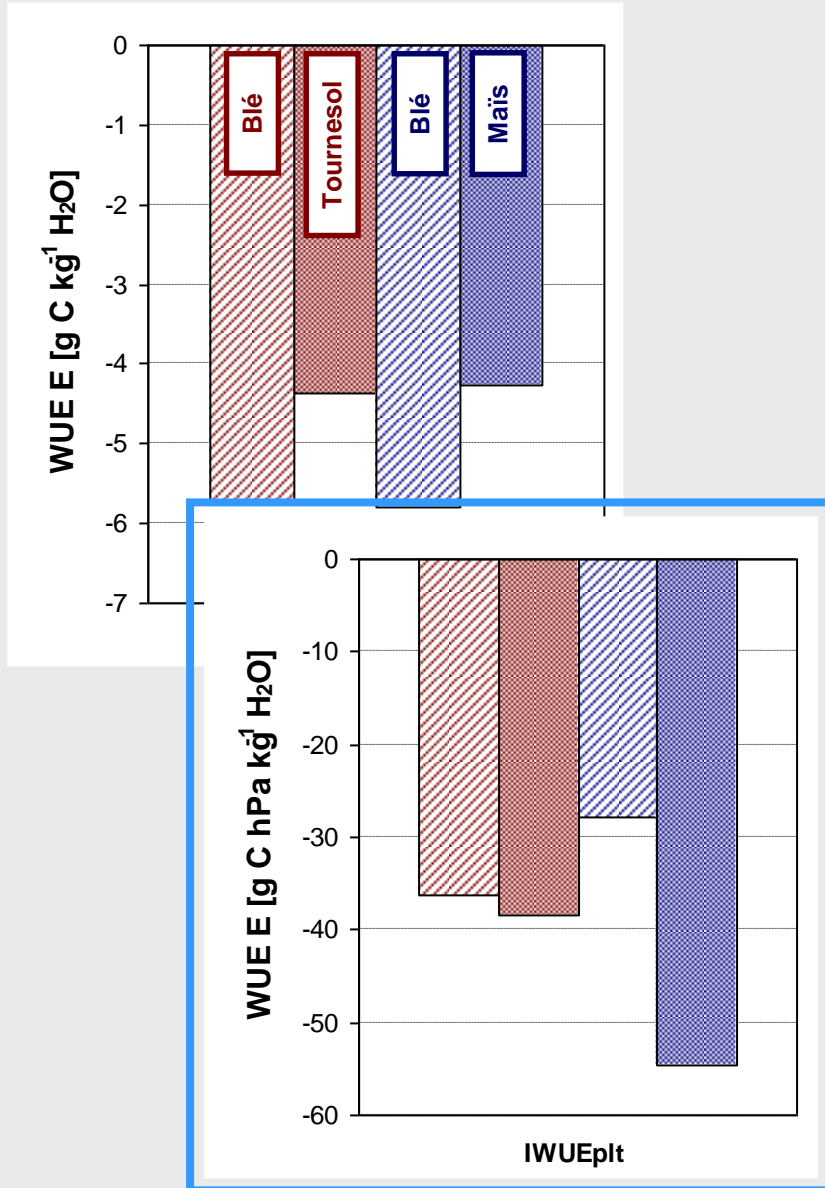
Répartition annuelle des composantes du bilan d'eau

(Béziat et al. en préparation)



Efficiency de l'utilisation de l'eau

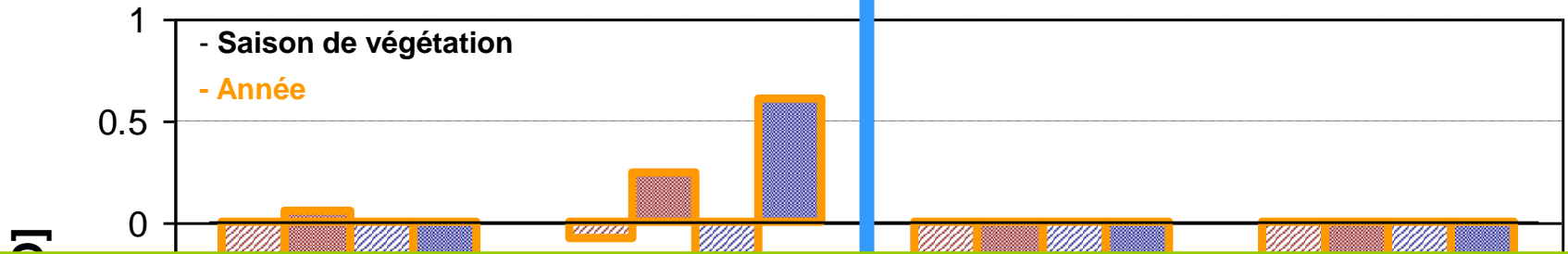
Efficiency de l'utilisation de l'eau pour les plantes : GEP/TR



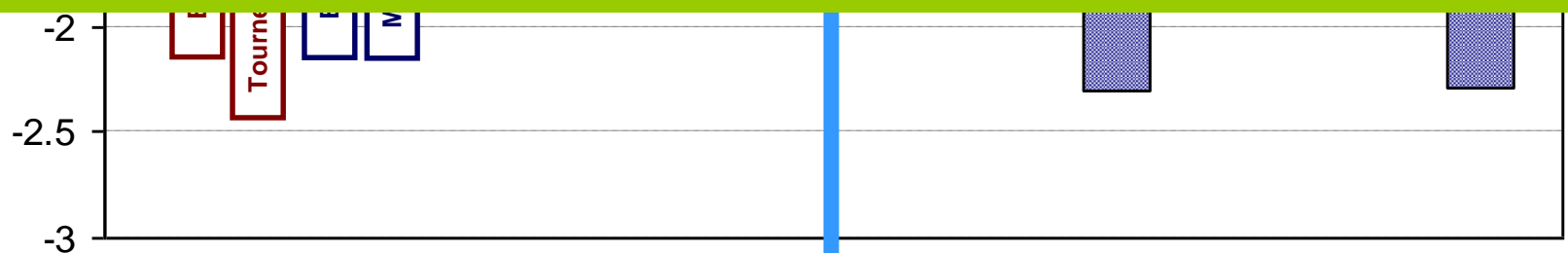
Efficiency of water use

WUE environnementale

WUE agronomique



- 1) : WUE_{plt} principalement conditionné par le climat (VPD)
- 2) : WUE plus faible au pas de temps annuel (E ou E + Rh)
- 3) : Difficulté de concilier les points de vue Environnementaux et Agronomiques



WUEeco
NEP/ETR

WUENBP
NBP/ETR

WUEAGB
AGB/ETR

WUEexp
Exp/ETR

Conclusions

Mesures par la méthodes des fluctuation turbulentes

- Permet d'établir un bilan de C sans mesures de variations de COS
- Permet d'estimer la part des principales composantes des flux nets
- Permet de montrer la part important des flux verticaux dans les bilans

Objectifs méthodologiques :

- Améliorer la méthode pour mesurer directement par fluctuation turbulente les flux de CH₄ et N₂O : sur le point d'être réalisé dans le cadre des programmes ICOS, GHGEurope...
- Tester au champ l'effet de pratiques contrastées sur les flux et bilans de GES : campagne Couverts Intermédiaires 2013 (en cours d'analyse)

Déterminisme des bilans :

- **Influence du climat** : exemple blé 2007
- **Fort impact de la durée de la saison de végétation**
- **Influence des pratiques culturales** : repousses, exports, fertilisation organique

Conclusions

Les leviers pour améliorer les bilans de C et de GES ?

- Toute méthode permettant d'accroître la GEP (sans augmenter d'autant Re) : sélection variétale, adaptation des méthodes de culture (irrigation, densité...)
- Minimiser les périodes de sol nu adapter les rotations, utilisation des inter-cultures mais pas forcément 2 cultures/an
- Adaptation du travail du sol (*Techniques de conservation des sols*)
- Réduction des intrants azotés : privilégier les apports organiques et promouvoir l'utilisation des plantes fixatrices d'N ?
- Limitation des émissions liées au devenir des exports : exporter moins pour nourrir le bétail et moins de processus de transformation = modifier notre mode de consommation alimentaire

Gestion de l'albédo des parcelles:

- Un domaine totalement nouveau avec des perspectives énormes ! Levier à combiner avec une prise en compte des effets biogéochimique !

Véritable enjeux de développement durable :



- Conciliation d'une nécessité de production avec une minimisation de l'impact environnemental des cultures dans un contexte de changement globaux

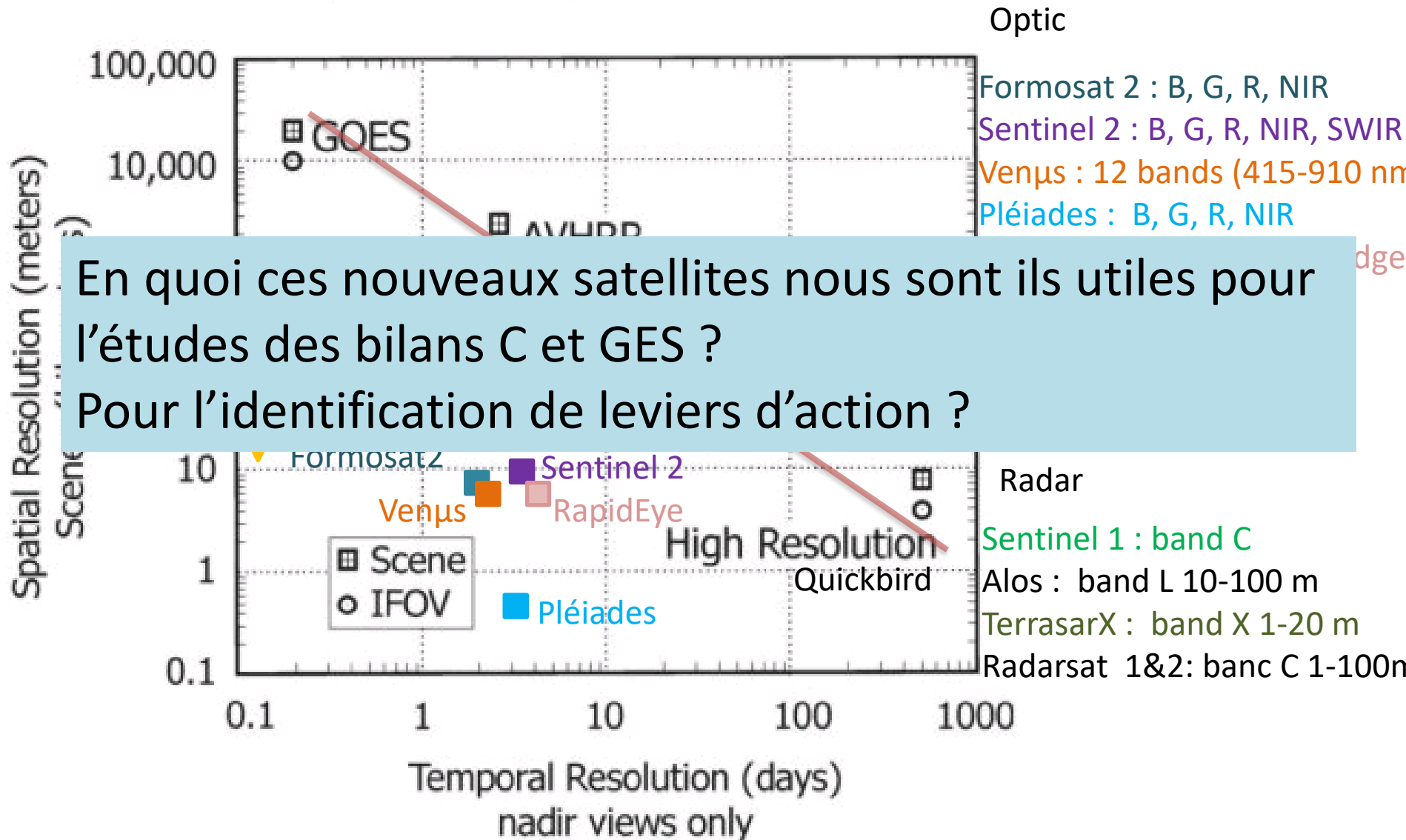
Plus de technicité = formation spécialisée

Comment la télédétection et la modélisation spatialisée vont-elles pouvoir nous aider à quantifier les différents termes des flux et bilans d'eau, C et GES à de plus grandes échelles ?



Stratégie d'étude à l'échelle régionale

Téledétection: résolution temporelle vs spatiale ?

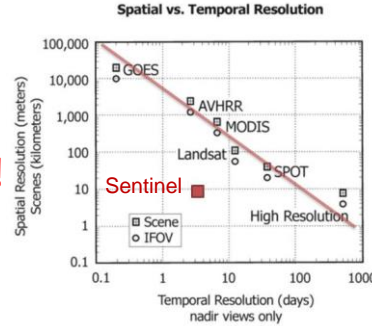


Les nouvelles missions spatiales : un outil privilégié



Sentinel 1
(10 m, 6j, Radar)

Une Révolution !!!



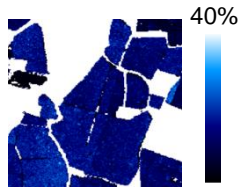
Sentinel 2
(10 m, 5j, Optique)



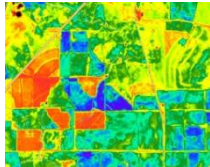
Par temps couvert ou clair
Rugosité & humidité de surface

Paramètres mesurés

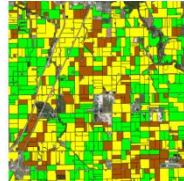
Par temps clair
Réflectances



Humidité du sol



Biomasses



Travail du sol

Cartographie dynamique

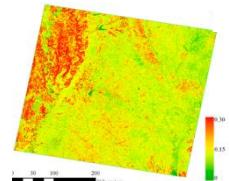
fusion



Occupation du sol



Indice foliaire/
phénologie



Albédo

Se diriger vers des cartes dynamiques des OS et pratiques culturales



Comment exploiter cette richesse d'information pour répondre aux questions scientifiques et sociétales ?

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES des cultures

Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES des cultures

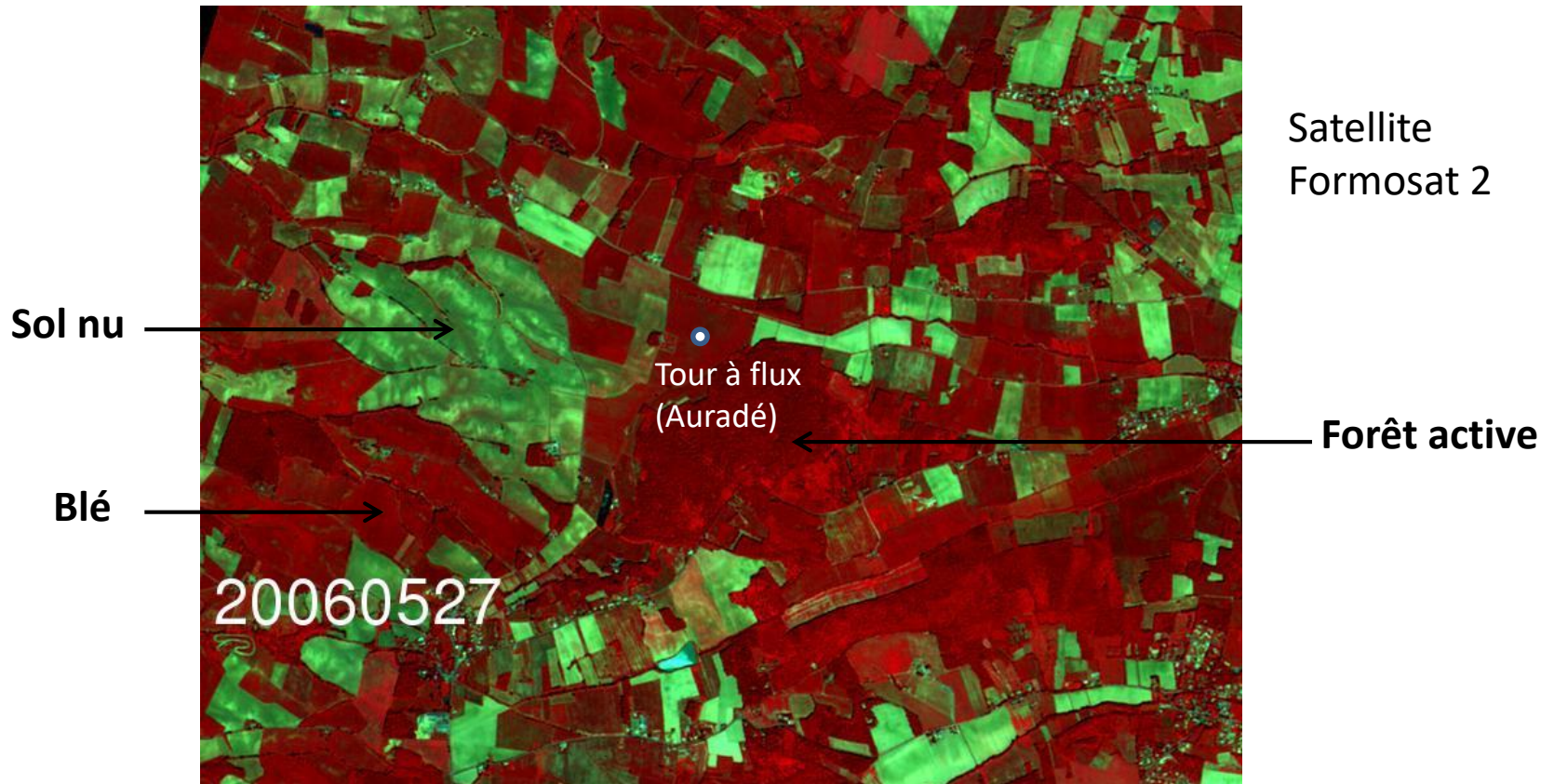
Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES des cultures

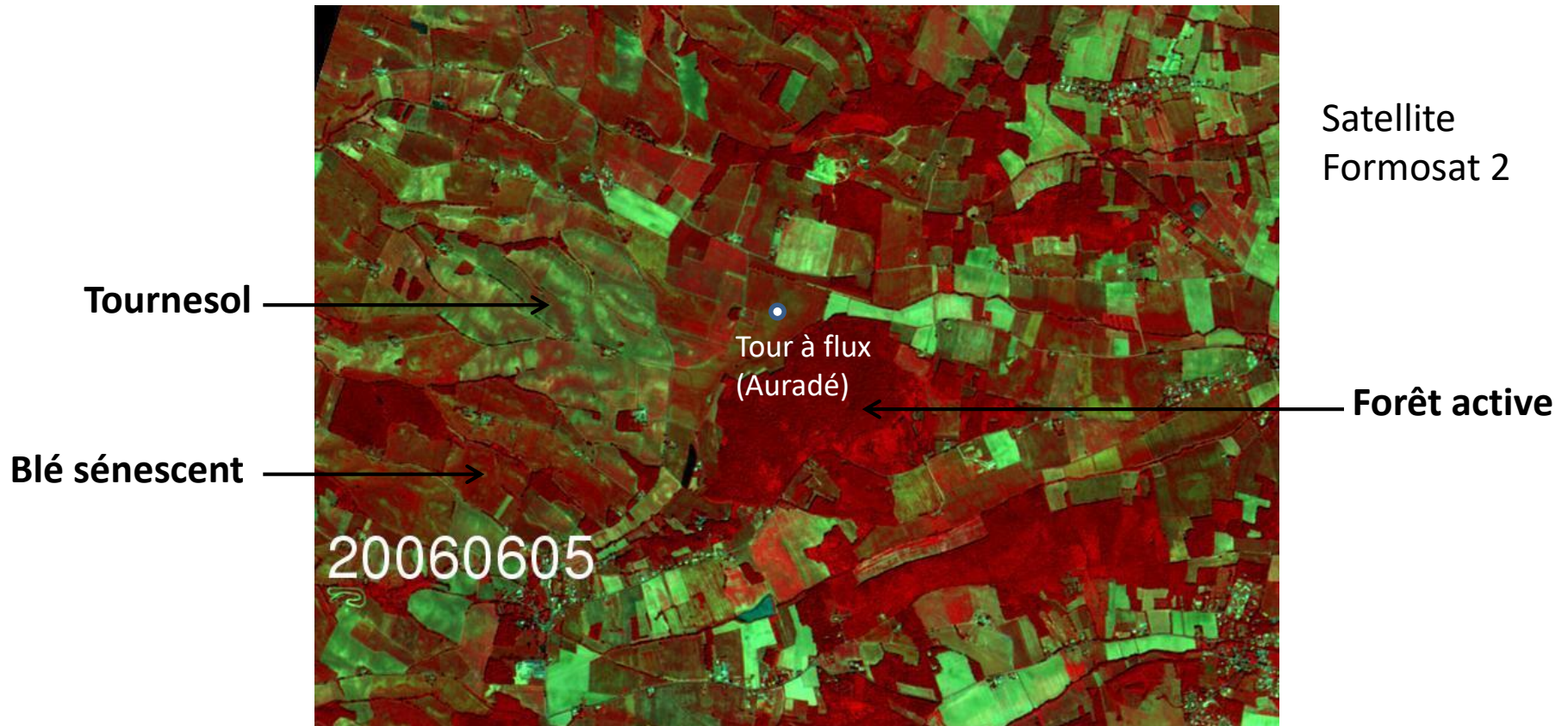
Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES des cultures

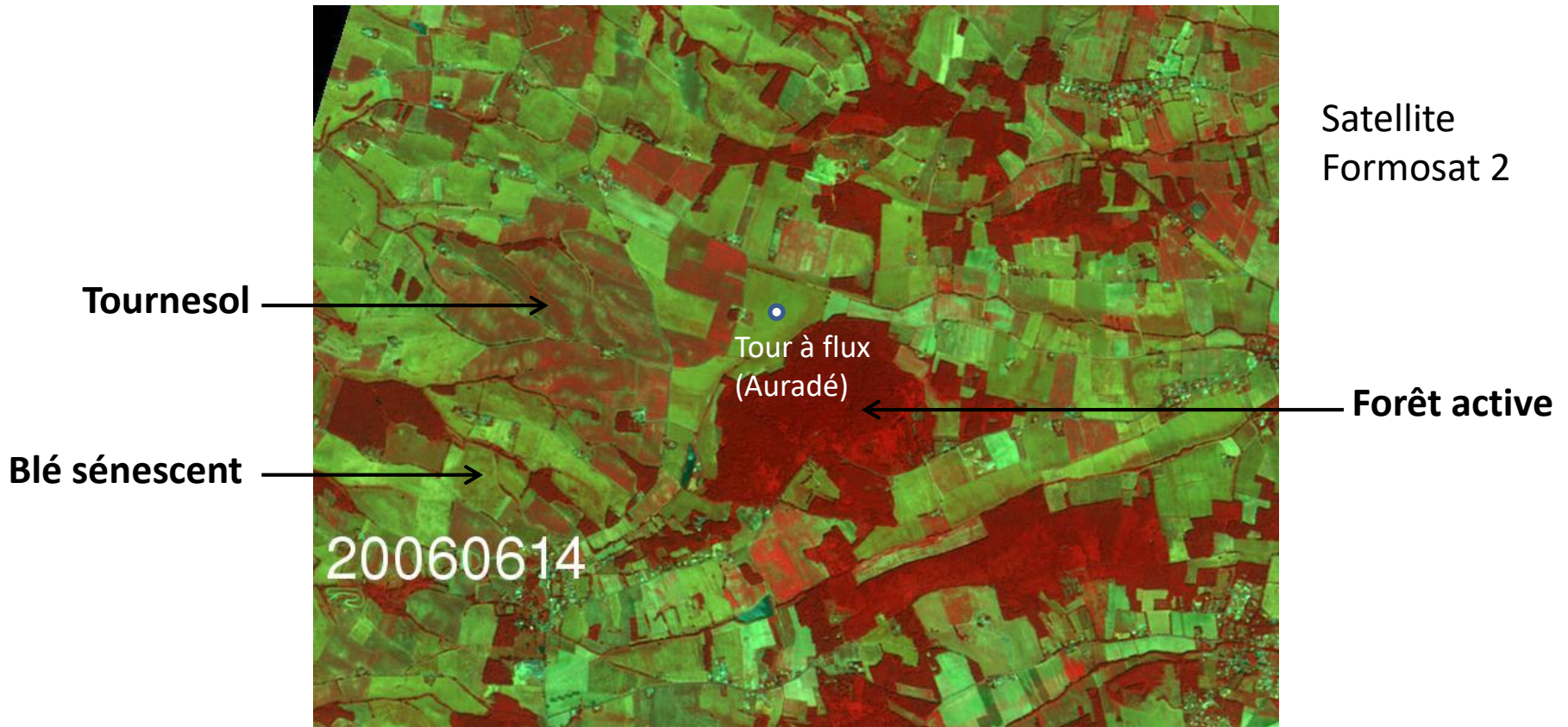
Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES des cultures

Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES des cultures

Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES des cultures

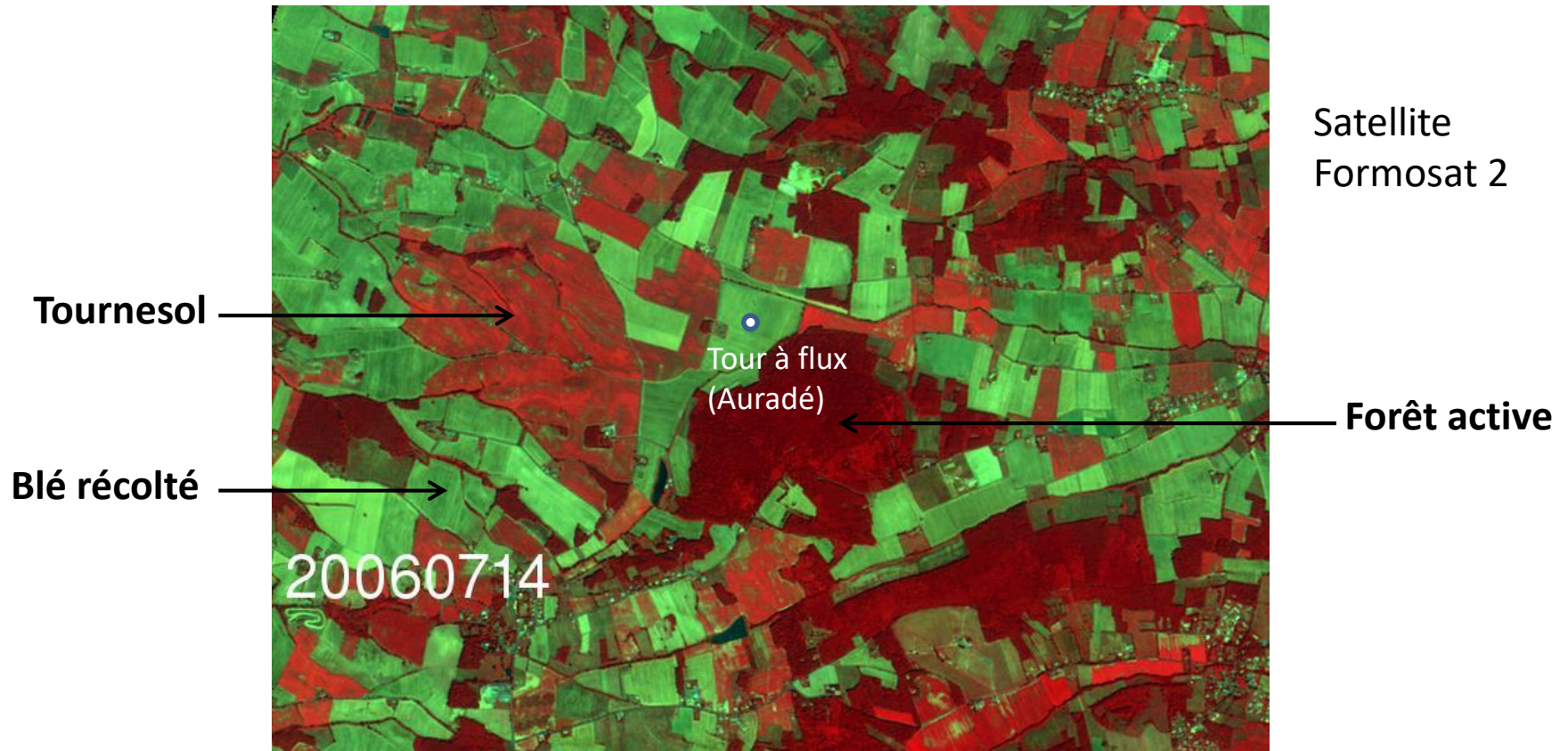
Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES des cultures

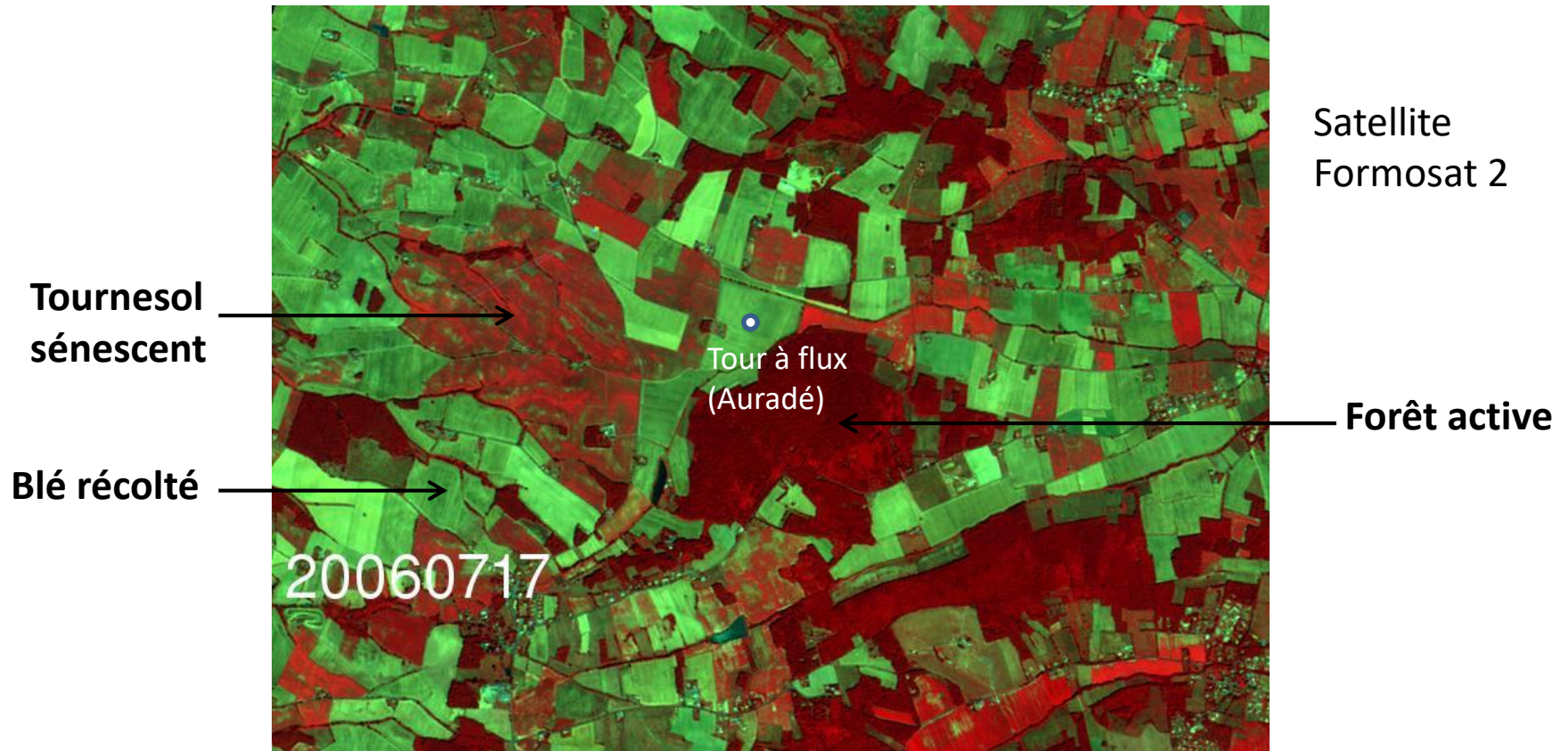
Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES

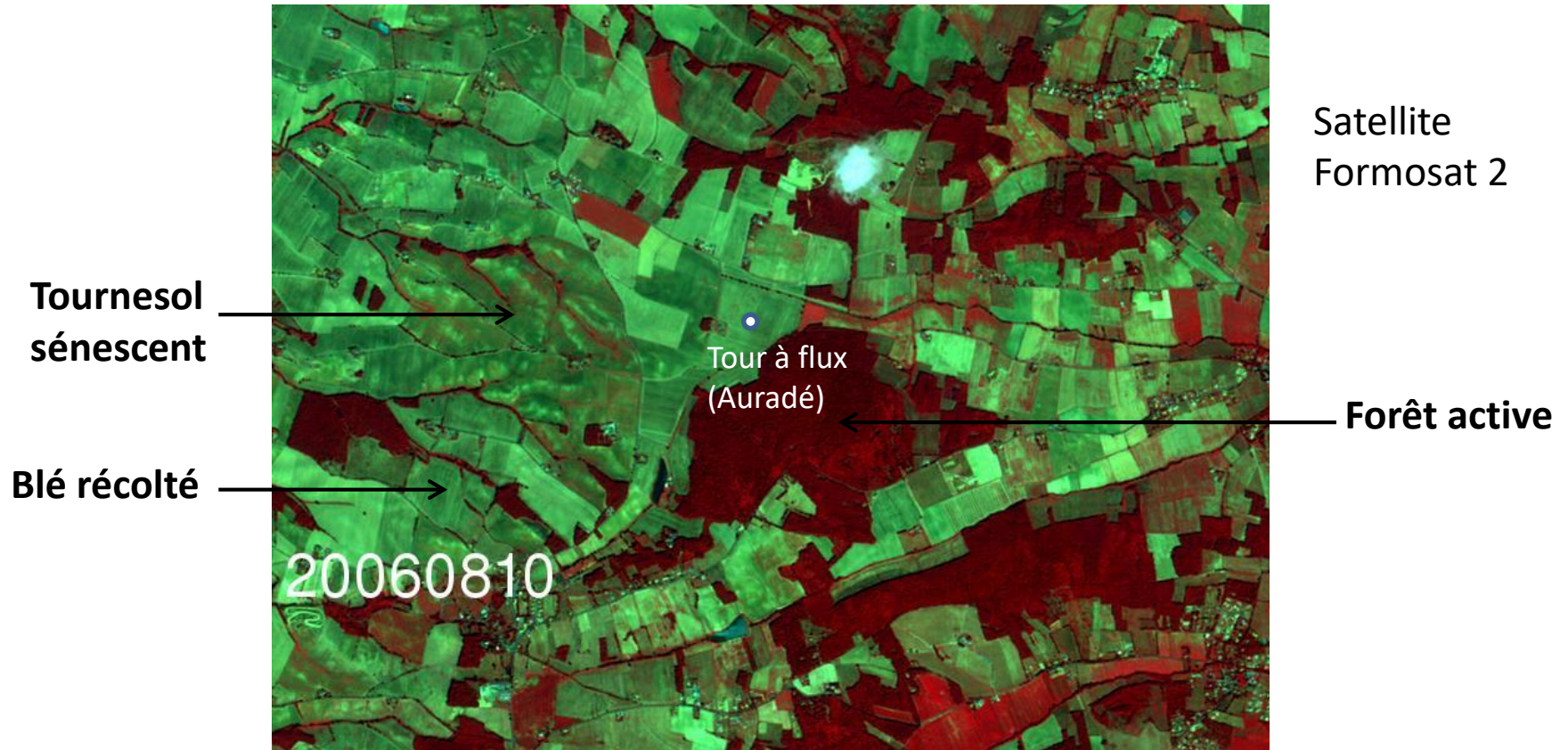
Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES

Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



Satellite
Formosat 2

Tournesol
sénescent

Tour à flux
(Auradé)

Forêt active

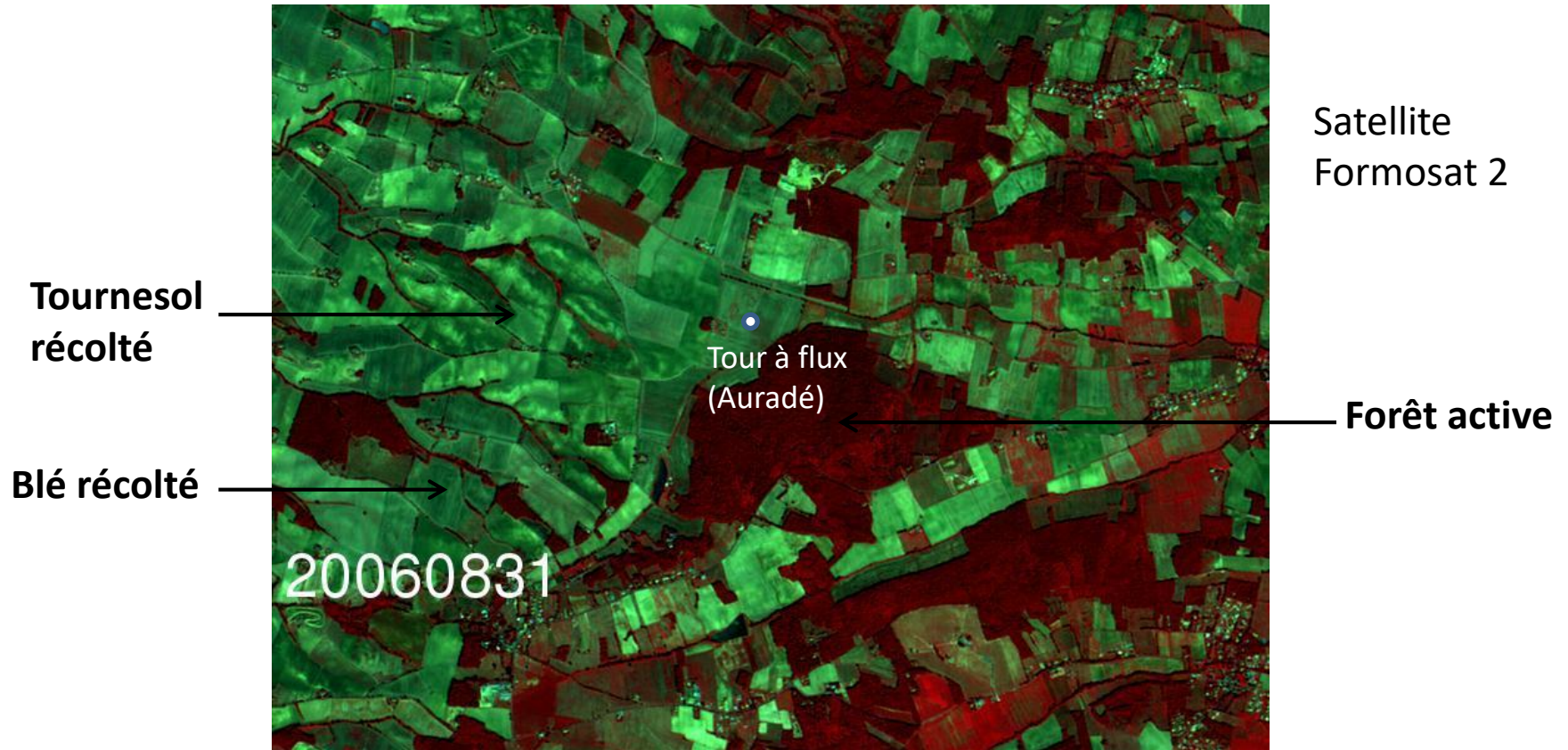
Blé récolté

20060810

- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Apport de la télédétection pour l'estimation spatialisée des bilans C et GES

Pour un suivi précis des cultures (cartographie, production) et des opérations agricoles, importance de la haute résolution spatiale et temporelle



- West et al. (2010) ont montré que les moyennes résolution (MODIS) ne permettait pas une identification assez précise des classes de culture (juste 2 classes) et une estimation précise des flux de CO₂, bilans C et GES

Données de télédétection optique

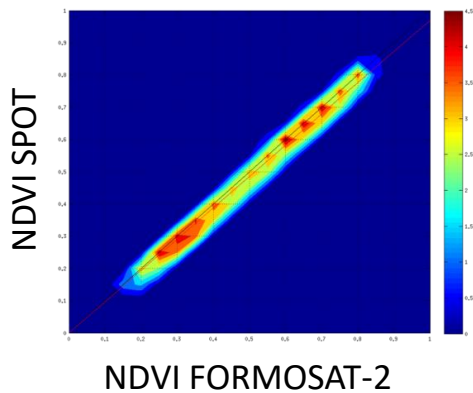


Multi-capteurs: Formosat-2 & Spot (2,4,5) : près de 250 images depuis 2006... un jeu de données unique au monde

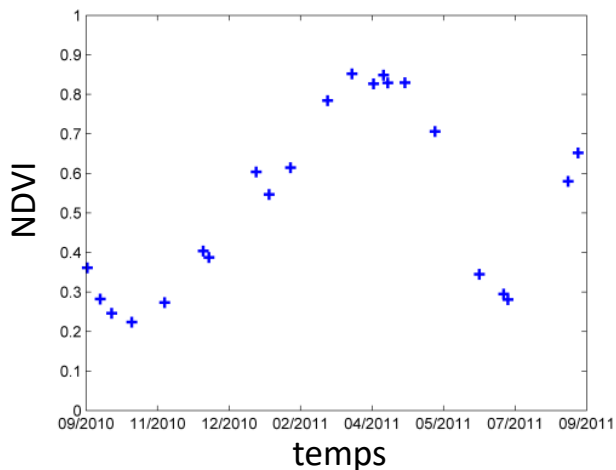


Séries multi-temporelles

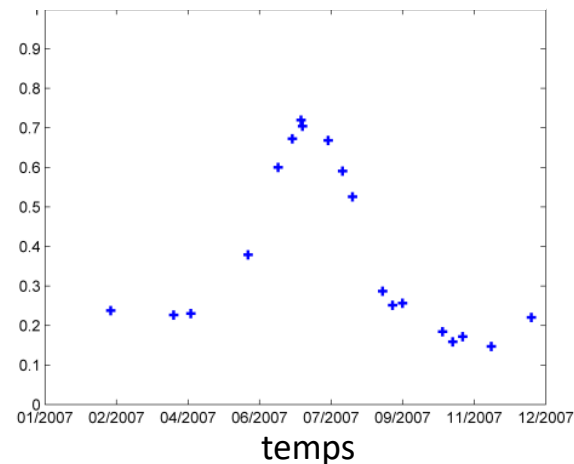
$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$



blé



tournesol



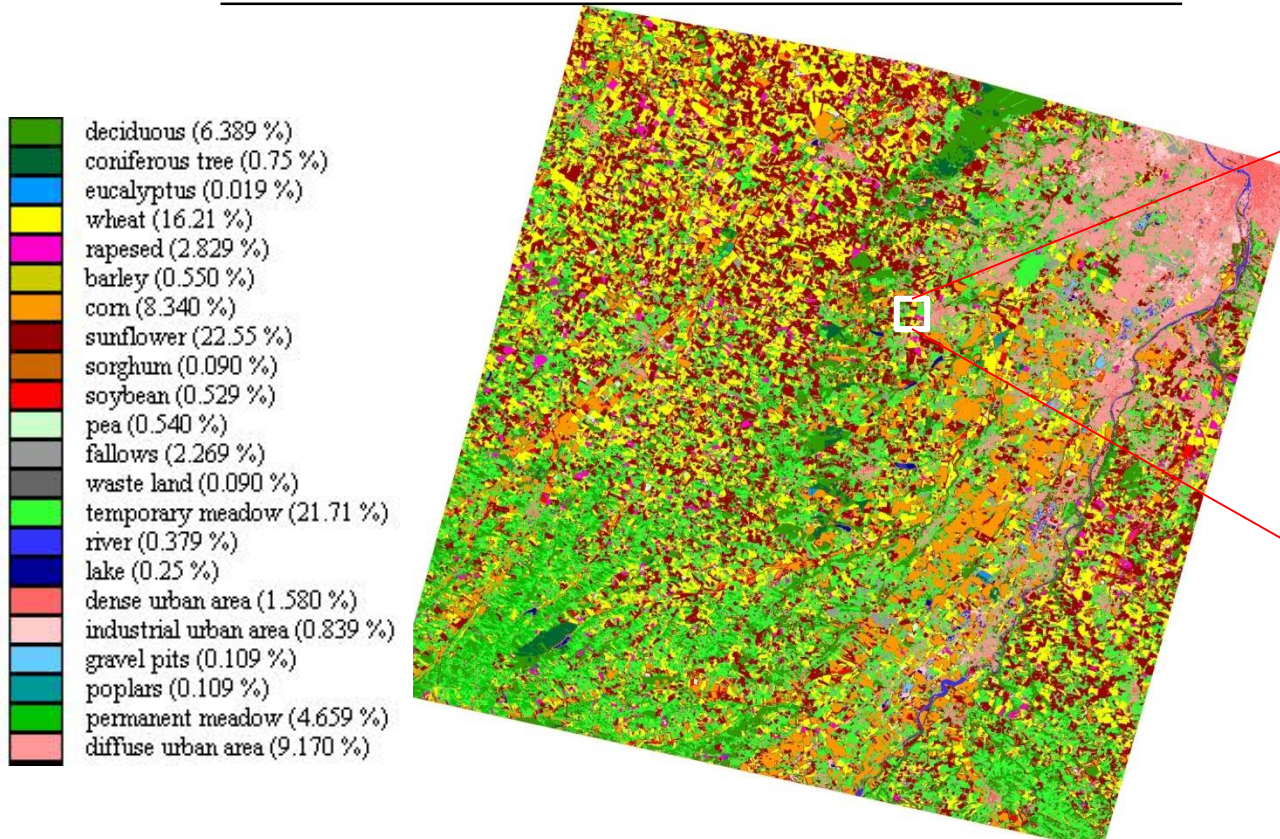
Cartes détaillées de l'occupation du sol utilisées pour la modélisation spatialisée des flux



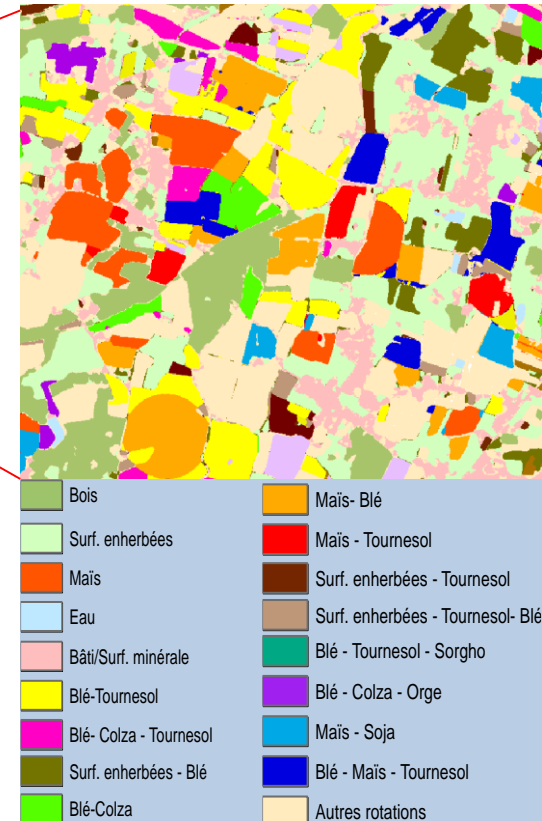
Possible grâce aux images multi-temporelles optiques à haute résolution spatiale :

- 21 classes au total,
- 8 classes de cultures + sous-classes dont maïs grain et ensilage (exports de C très différents)

Carte de 8 à 20m de résolution en 1992 et entre 2001-2014



Carte des rotations de cultures à 8m entre 2006-2012



1 : Etablir un diagnostic initial

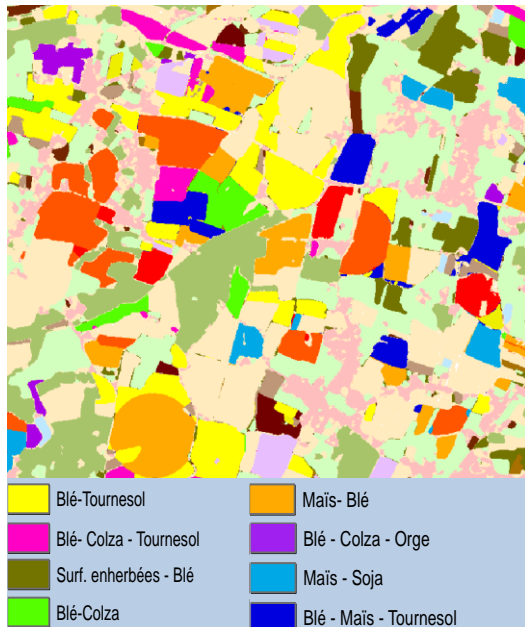
Cartographie de l'occupation du sol et successions culturales

→ Nécessité de cartographier les différentes cultures et sous classes (maïs grain vs ensilage) sur de larges territoires : des problèmes méthodologiques restent à résoudre (dispo. en images dans certaines zones, manque de données de validation...) → *Sentinel 2 Agri*

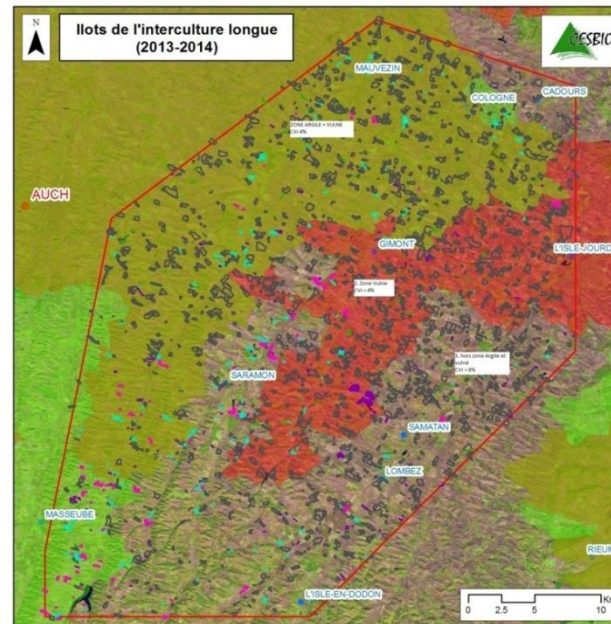
→ Cartographie des haies (réservoirs de biodiv. → trames vertes, bois énergie, stocks de C...)

Cartographie des successions culturales et des couverts intermédiaires (CI)

H2020 Sensagri



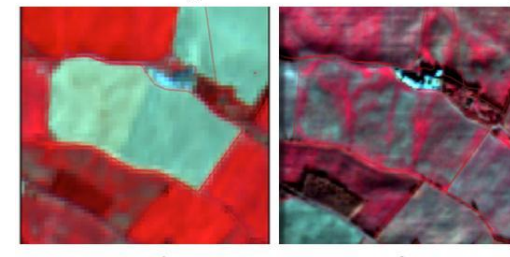
Collab. *INRA Auzeville*, projet CICC



Légende

- Sol nu
- Repousses précoces
- Repousses tardives
- CI tardifs
- CI précoces

Permet d'objectiver la réussite des CI



...et les gains en C associés

D. Ducros, J. Inglada, C. Marais-Sicre, S. Valero, J.F. Dejoux, E. Ceschia

- Possibilité de cartographier les nouvelles zones d'implantations possibles des CI
- Besoin en données radar dans zone à forte couverture nuageuse

1 : Etablir un diagnostic initial

Cartographie des pratiques culturales

→ Pour répondre à des problématiques agro-environnementales très diverses ; gestion de l'eau (carto des zones irriguées), qualité de l'air (aérosols), érosion (carto. des travaux du sol), maladies (présence de résidus de culture en surface)...

Cartographie dynamique des travaux du sol et de l'enfouissement des pailles

H2020 Sensagri

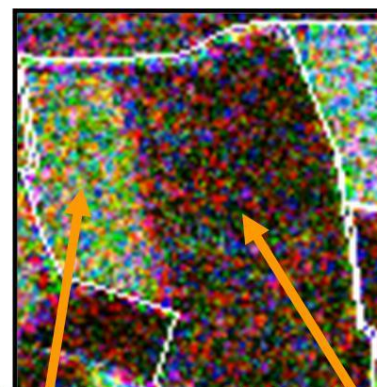
Labour avec retournement (forte rugosité)

Sol lissé pour le semis

Combinaison d'images TERRASARX (autumn 2010)

Reprise de labour avec mottes (rugosité moyenne)

Source F. Baup, R. Fieuzal



Combinaison d'images TerrasarX et Radarsat

Source F. Baup, R. Fieuzal



Sol déchaumé (cover crop)



Sol lisse avec chaumes de blé

Besoin en données radar en Bande X et C à haute résolution et à couverture globale car sensibles à différentes rugosités (types de travaux du sol)

1 : Etablir un diagnostic initial

Des produits à vocation thématique en cours de développement :

- **Cartographie dynamique des usages des sols** (*H2020 Sensagri, Bag'ages...*) : irrigation, travail du sol (labour/non-labour), enfouissement des résidus, repousses/adventices, couverts intermédiaires... → problématiques érosion, maladies...
- **Cartographie des haies** → indicateurs de biodiversité, de continuité écologique, microclimats...
- **Cartographie dynamique des paramètres biophysiques** : humidité du sol, développement de la végétation (indice foliaire), biomasse, albédo...

Limites de l'approche : certaines pratiques ne sont pas identifiables par télédétection

- Traitements phytosanitaires & pratiques de fertilisation (dates, doses, types d'engrais)
- Export ou non des pailles sur les céréales à pailles (blé, orge...)

Comment exploiter cette richesse d'information pour produire des indicateurs agro-écologiques plus élaborés ?

Combinaison de la télédétection optique avec la modélisation spatialisée



Possibilité de combiner différents satellites (thèse A. Veloso)

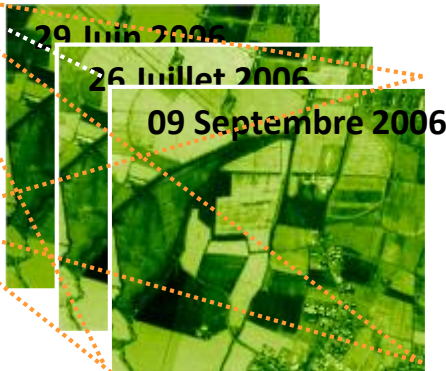


Formosat-2

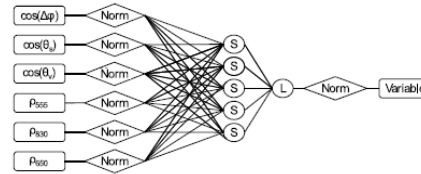


Spot 2, 4, 5

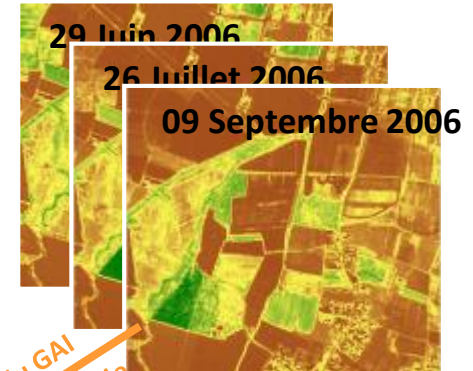
Images (NDVI)



Model de transfert radiatif (ex BV-net)



Cartes de GAI (ou FAPAR)

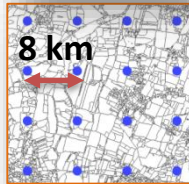


Ou relation empirique

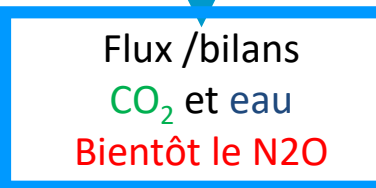
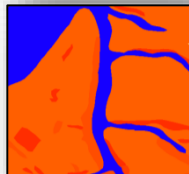
Cartes d'occupation du Sol (+ sousclasses)



Cartes SAFRAN Météo France



Cartes des sols (texture)



Assimilation du GAI
Calibration du modèle

GAI (indice de surface photosynthétiques)

Validation par stat. régionales (rendement /irrigation), données réseaux agriculteurs, campagnes intensives de prélèvements

Thèse E. Burel
Cartographie de la réserve en eau utile des sols/ validation par mesures géophysiques

Rg, T°C, P

Thèses M. Claverie, P. Béziat, A. Veloso, E. Burel

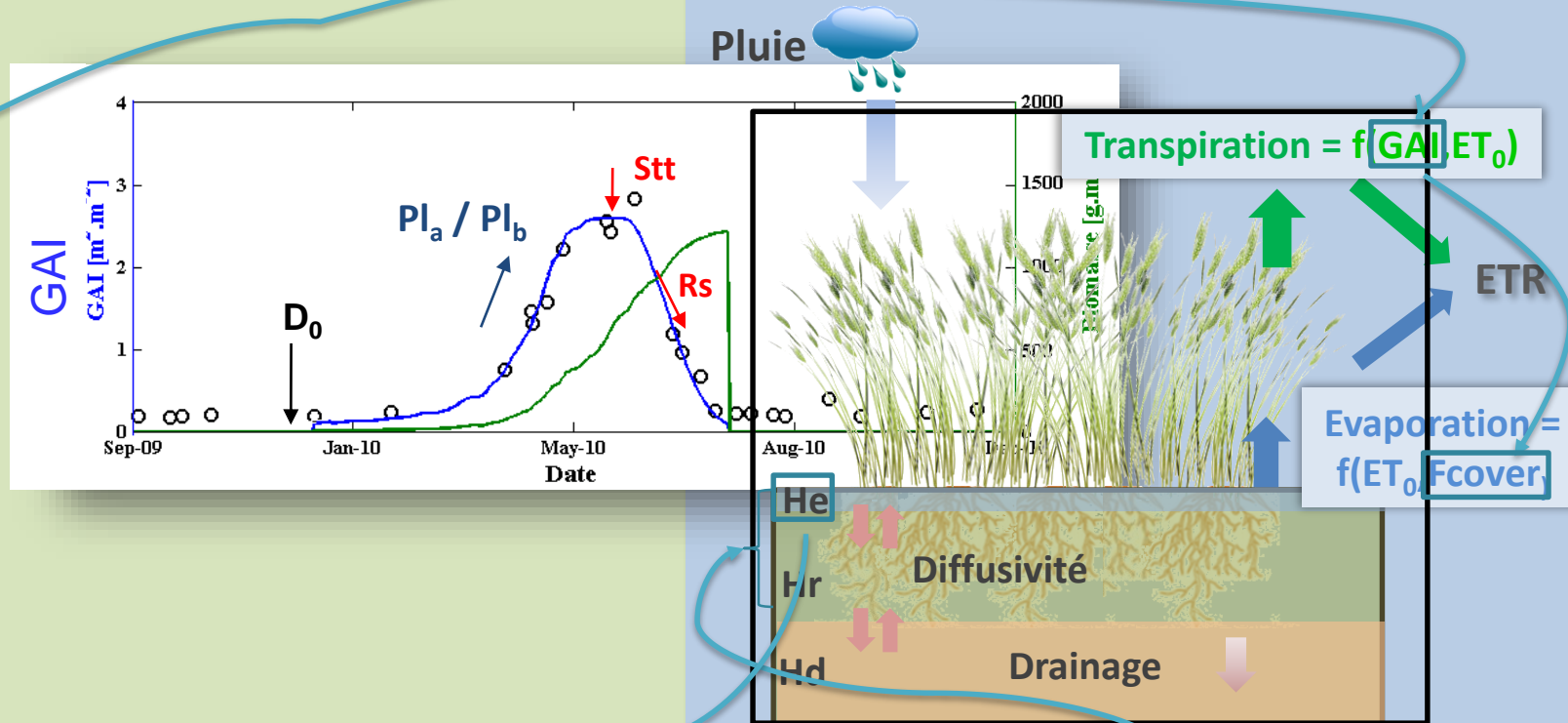
Thèses M. Claverie, A. Veloso, M. Battude, E. Burel

Validation par mesures des stations Flux

Modèle SAFYE-CO₂: SAFY-CO₂ + FAO-56

SAFYE-CO₂Module végétation : SAFY-CO₂

Module hydrique: FAO-56



$$GPP = Rg \times \varepsilon_c \times FAPAR \times F_T(Ta) \times fELUE \times sR10 \times Ks$$

+13 paramètres

7 : littérature & données in-situ
6 : calibration

$$Rh = a \times e^{b \times T_s} \times \frac{1}{1 + 30 \times e^{-8.5 \frac{He - \theta_{wp}}{\theta_c - \theta_{wp}}}}$$

$$NEE = NPP - Rh$$



Surface foliaire [m^2/m^2]

Biomasse sèche [kg/m^2]

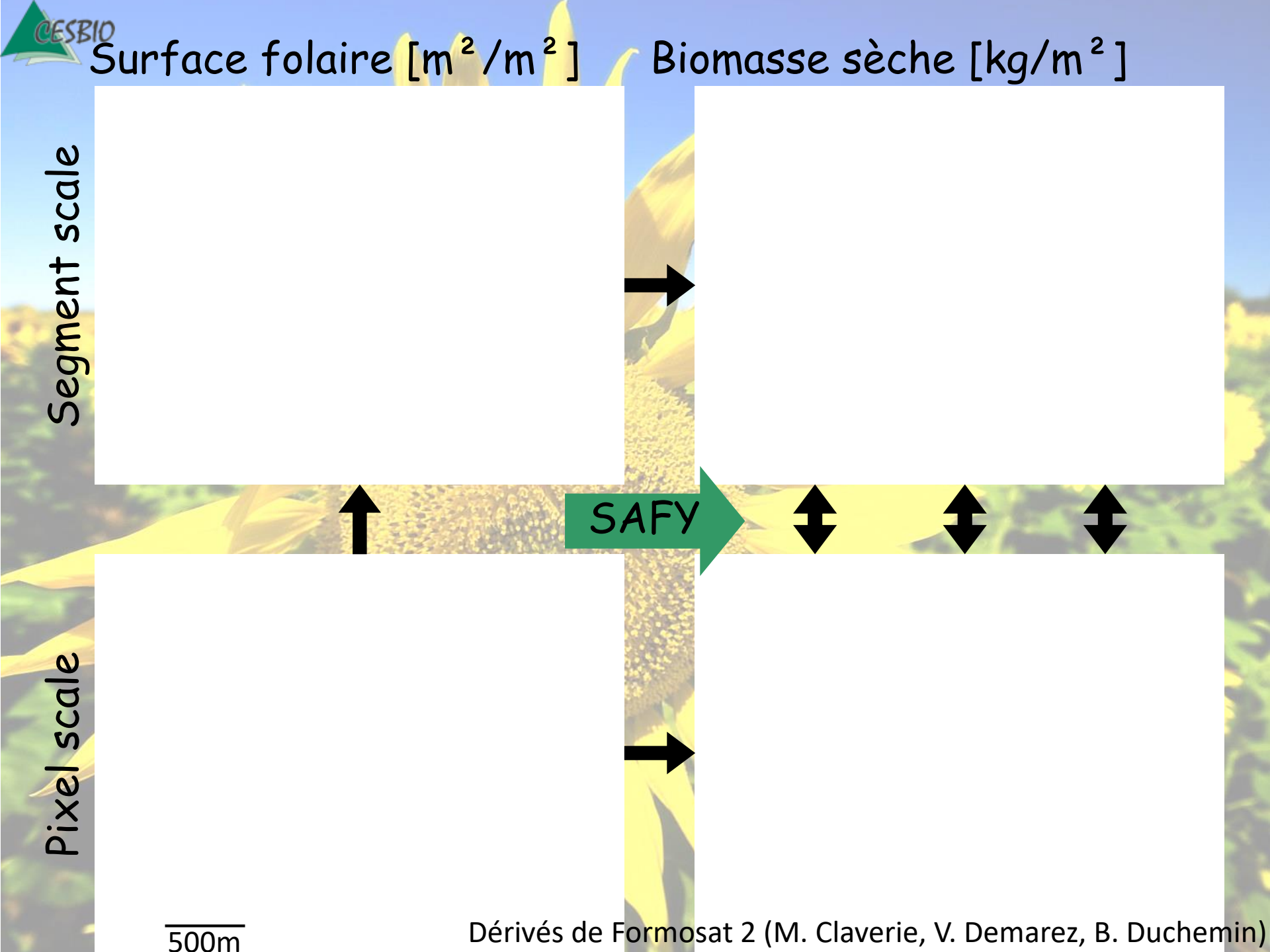
Segment scale

Pixel scale

SAFY

500m

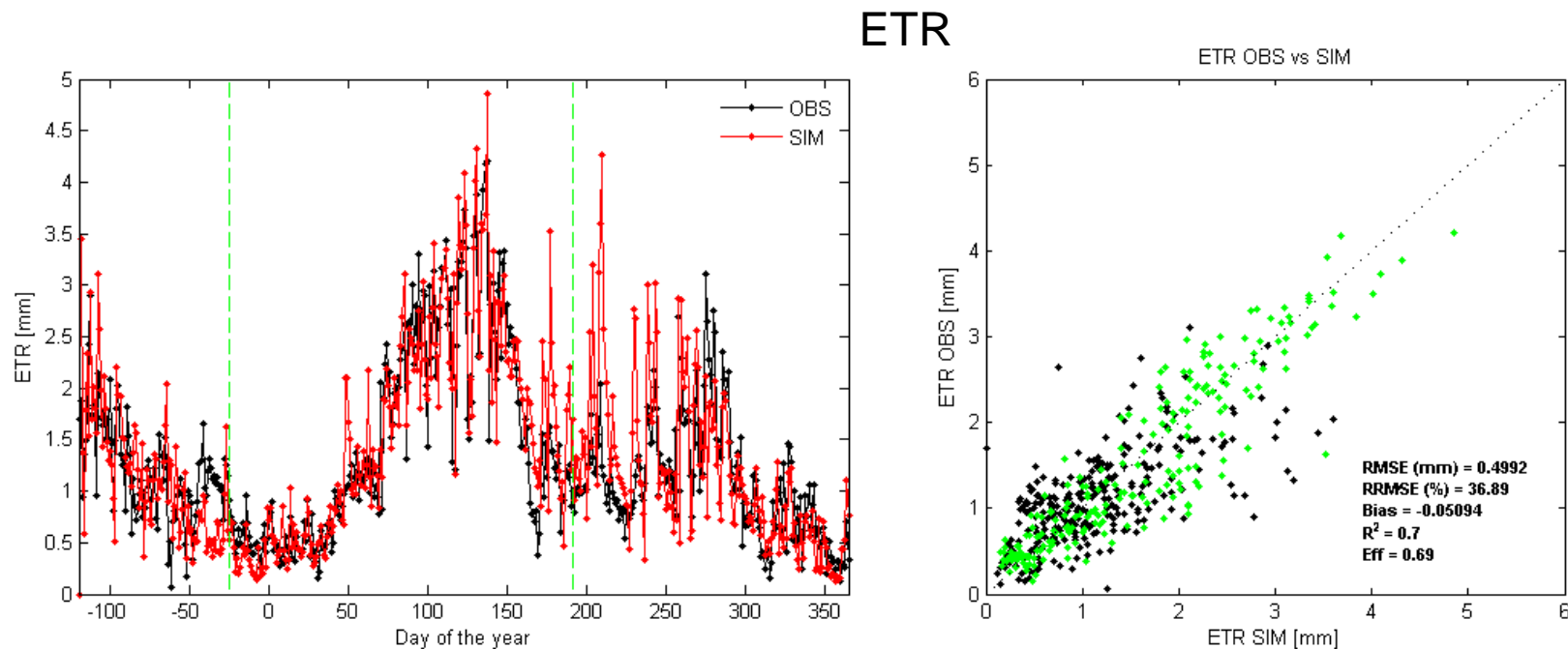
Dérivés de Formosat 2 (M. Claverie, V. Demarez, B. Duchemin)



Performance of the SAFYE model: ETR

Study Case: winter wheat at the **Auradé Site, 2006**

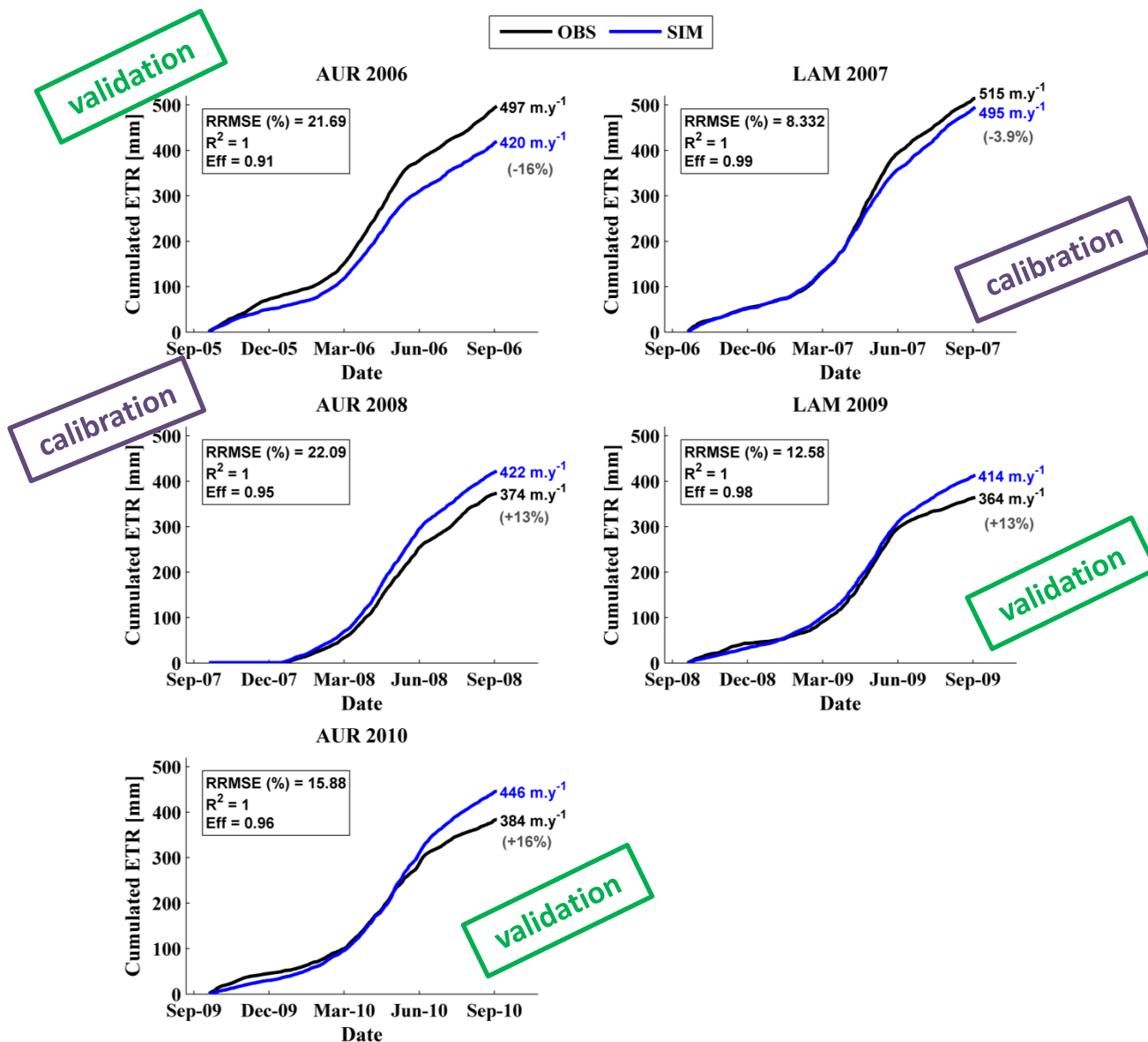
See Duchemin et al. (2008) and Claverie et al. (2012) for a description of the water flux module



The previous version of the model had a quite good performance in estimating ETR (and SWC dynamics, not shown)

SAFYE-
CO₂

Evapotranspiration cumulée

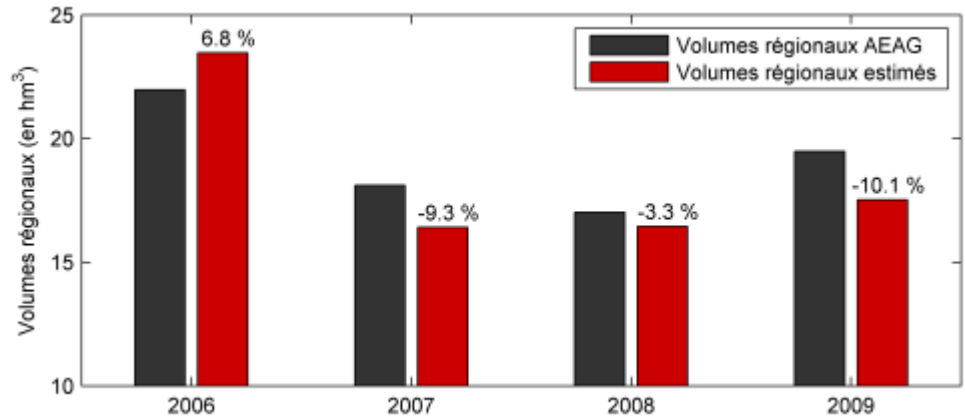
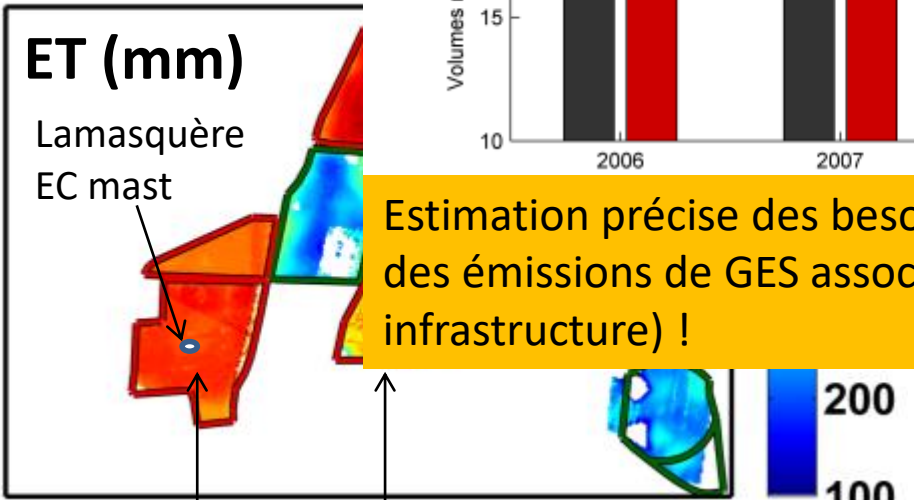
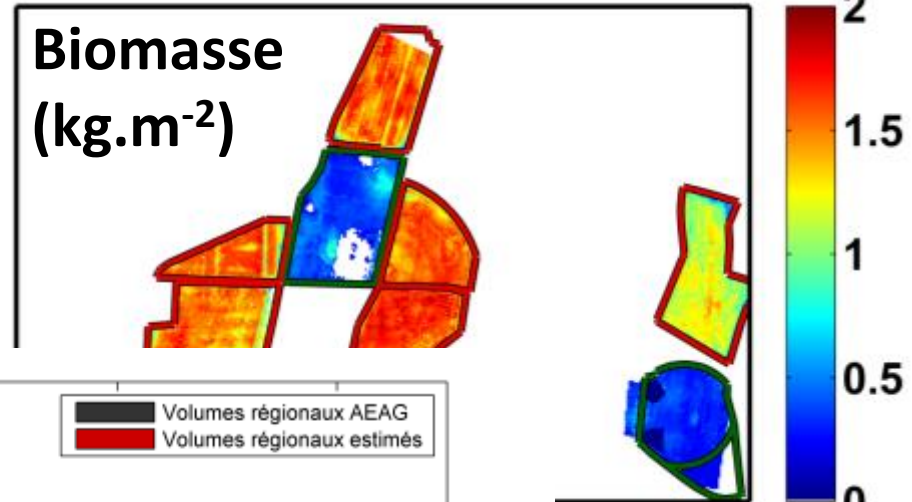
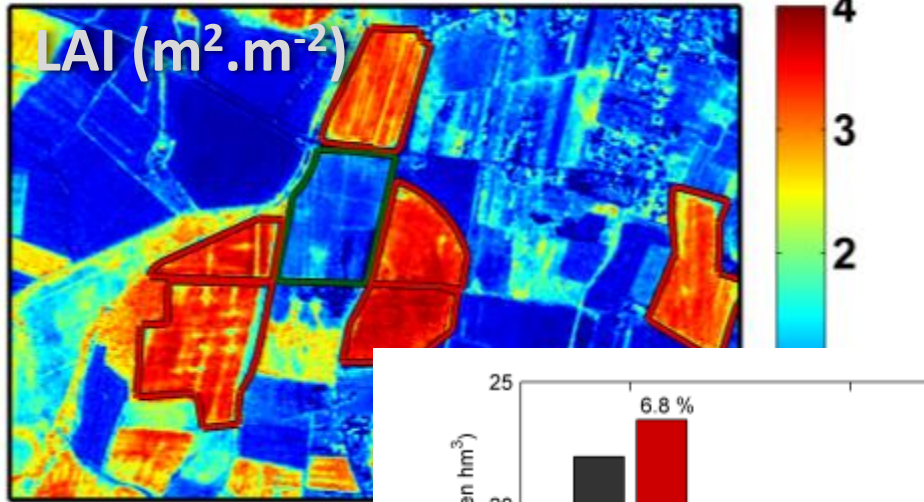


Exemple de simulation des cultures d'été

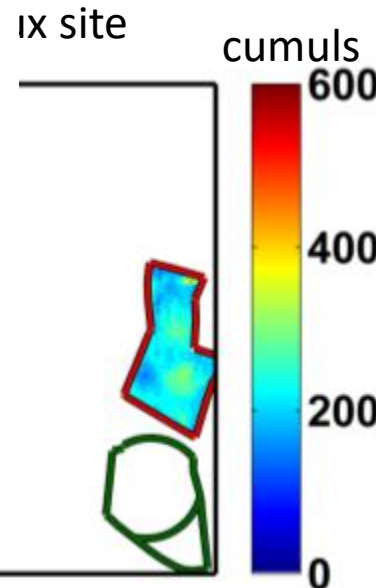
2006

maïs

Tournesol



Estimation précise des besoins en irrigation et donc des émissions de GES associées (pompage et infrastructure) !



Sol profond

Sol peu profond

Faible besoins

Besoins importants

Validation des simulations de biomasse et de rendement avec SAFYE-CO₂

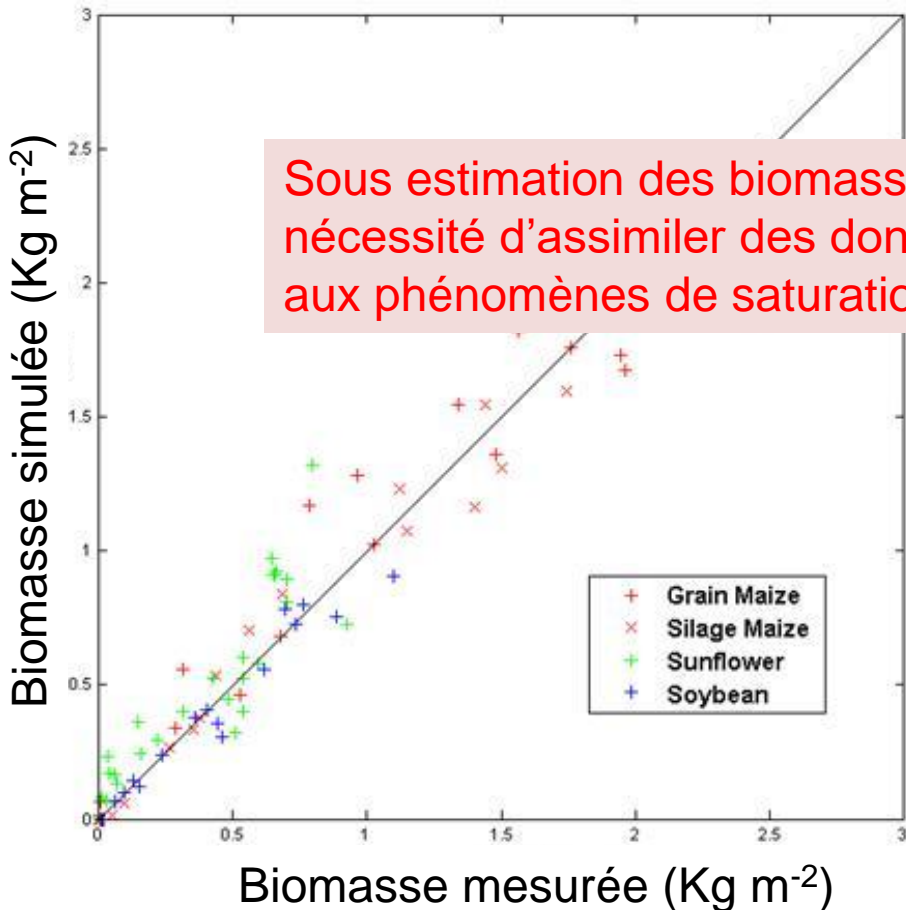
Comparaison des simulations et mesures destructives de biomasse

Claverie et al (2012) dans RSE

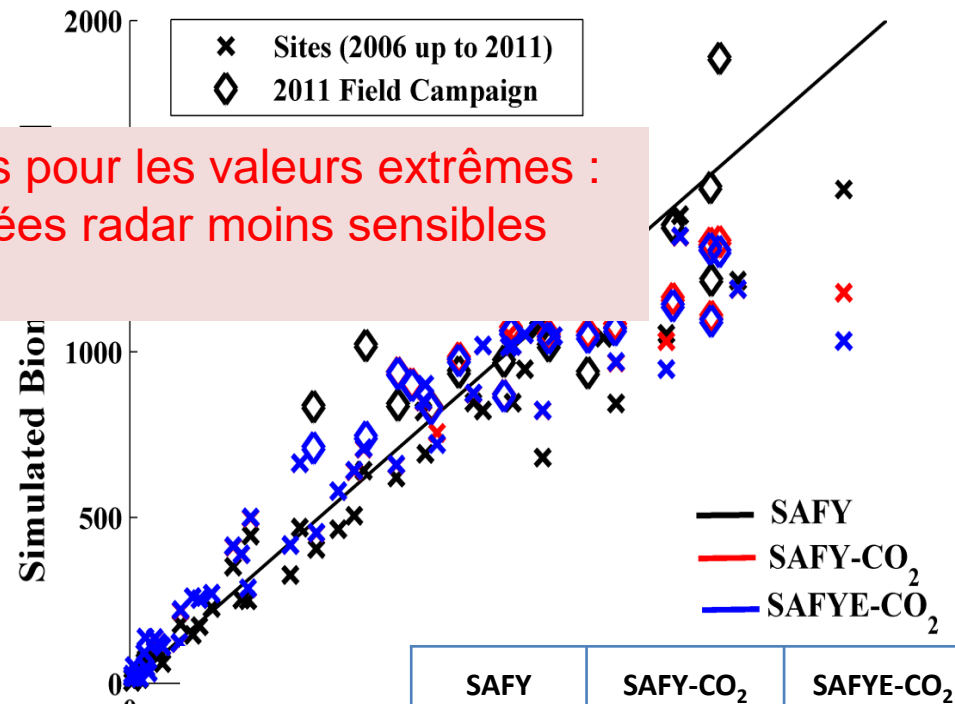
Veloso (2014)

Cultures d'été (ESU 2006, 2008)

Cultures d'hiver



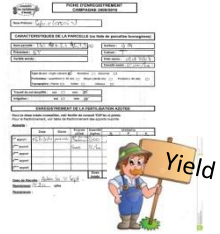
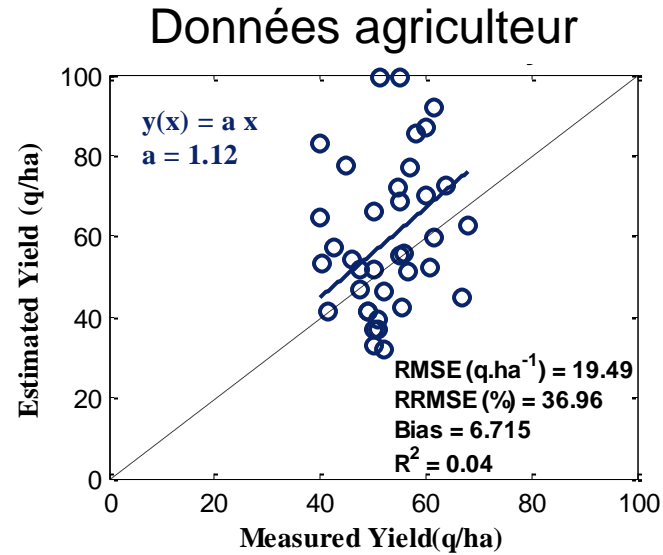
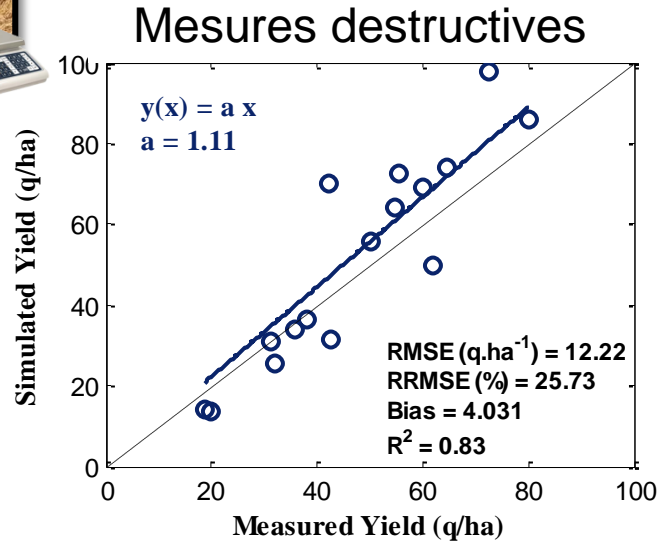
Sous estimation des biomasses pour les valeurs extrêmes : nécessité d'assimiler des données radar moins sensibles aux phénomènes de saturation



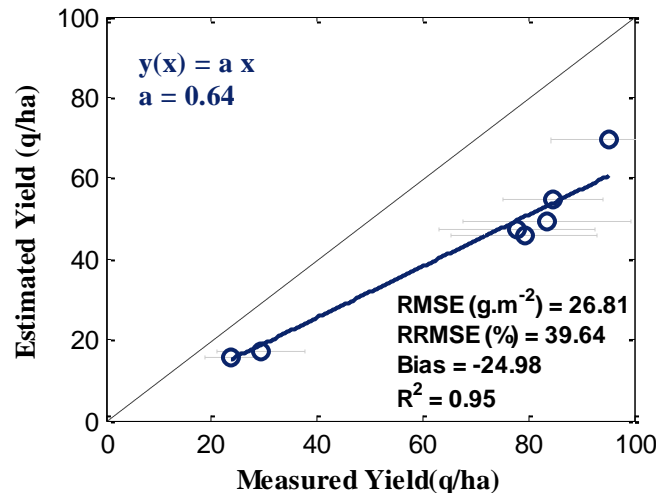
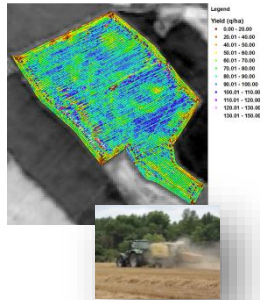
	SAFY	SAFY-CO ₂	SAFYE-CO ₂
RMSE (g.m ⁻²)	180.3	171.0	186.8
RRMSE (%)	25.0	23.7	25.9
Bias (g.m ⁻²)	-20.1	-22.6	-30.7
R ²	0.88	0.91	0.89

Validation des simulations de rendement de blé avec SAFYE-CO₂

Campagne 2011 (Thèse A. Veloso)



Capteurs de rendement



Très intéressant pour l'analyse des causes de variabilité spatiale de rendement mais nécessite vérif de la calibration du capteur de rendement

Validation des flux nets de CO₂ avec SAFYE-CO₂



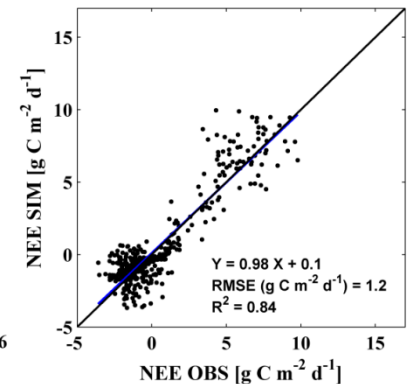
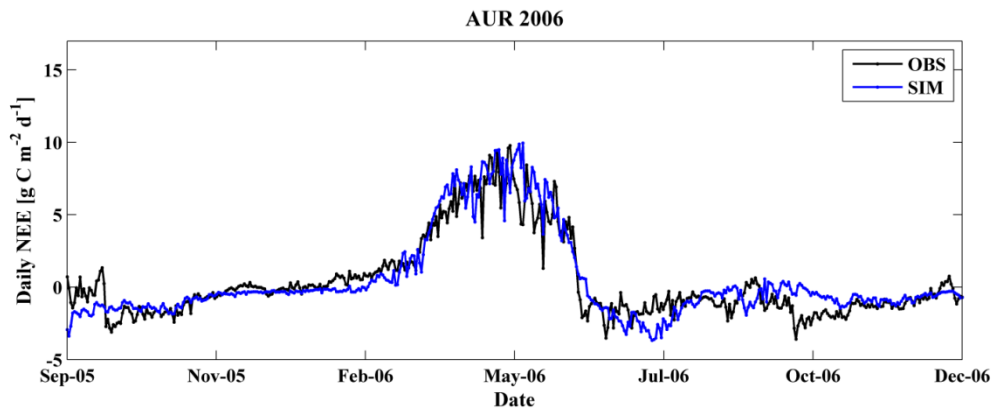
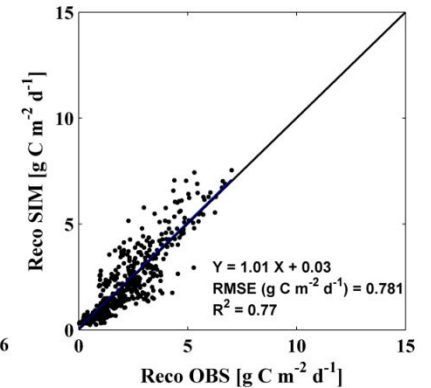
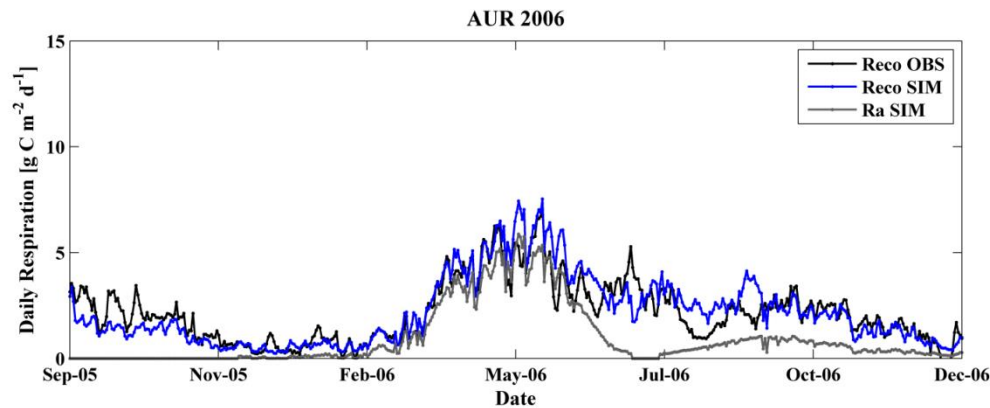
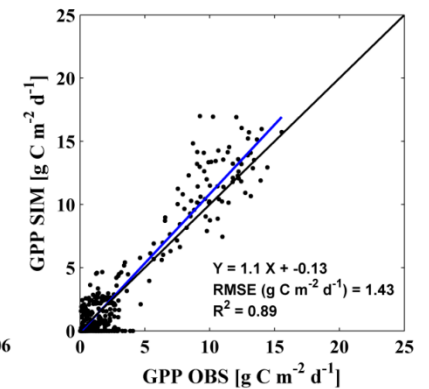
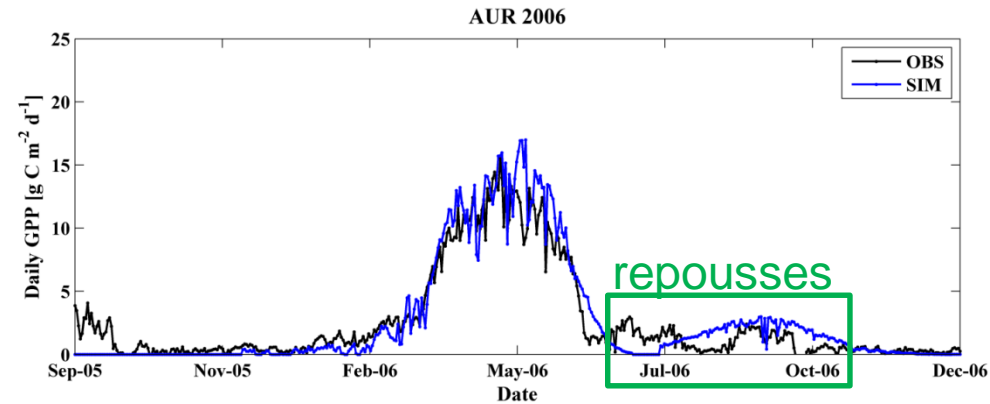
Photosynthèse

+

Respiration de l'écosystème

=

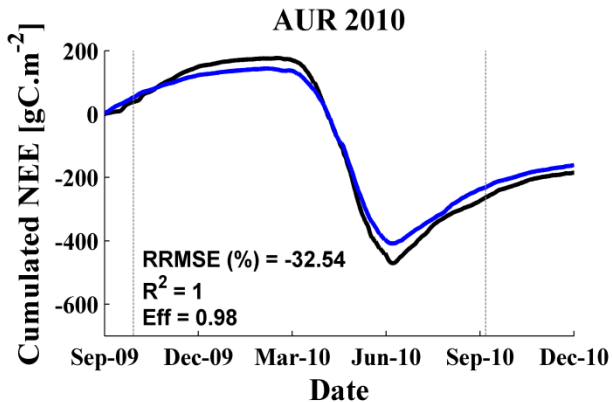
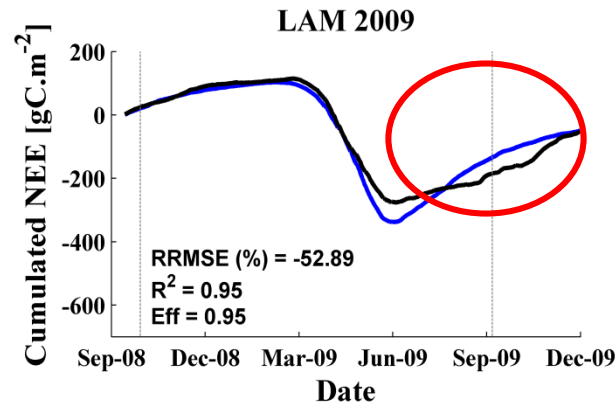
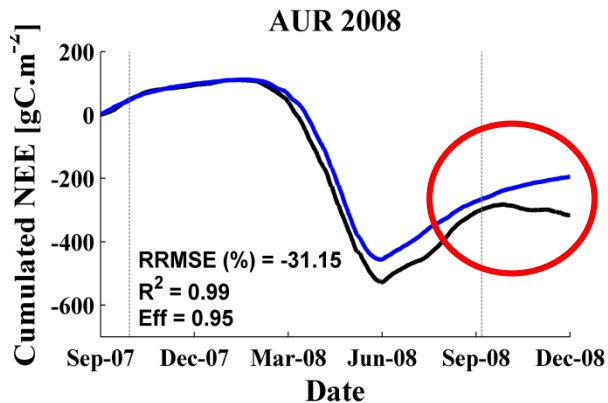
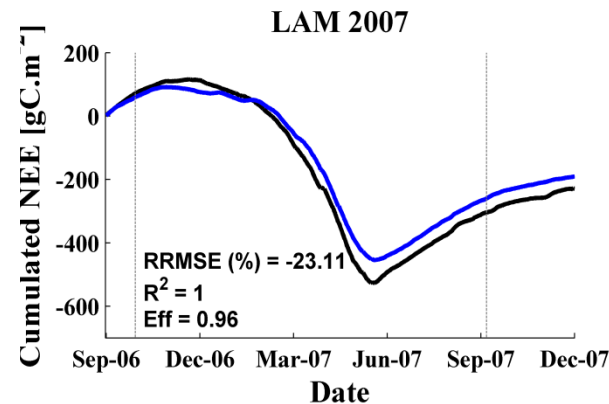
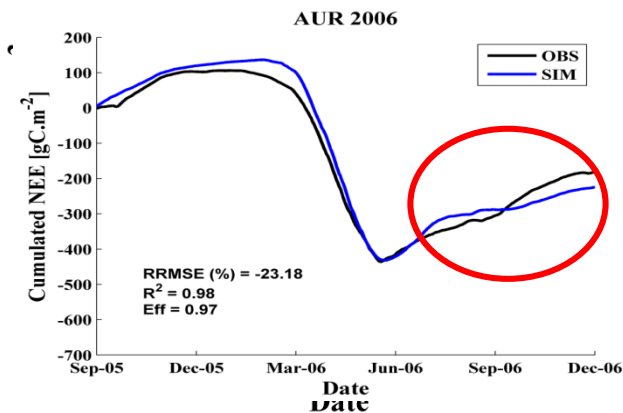
Flux net de CO₂



Validation des flux nets de CO₂ cumulés sur blé

SAFYE-
CO₂

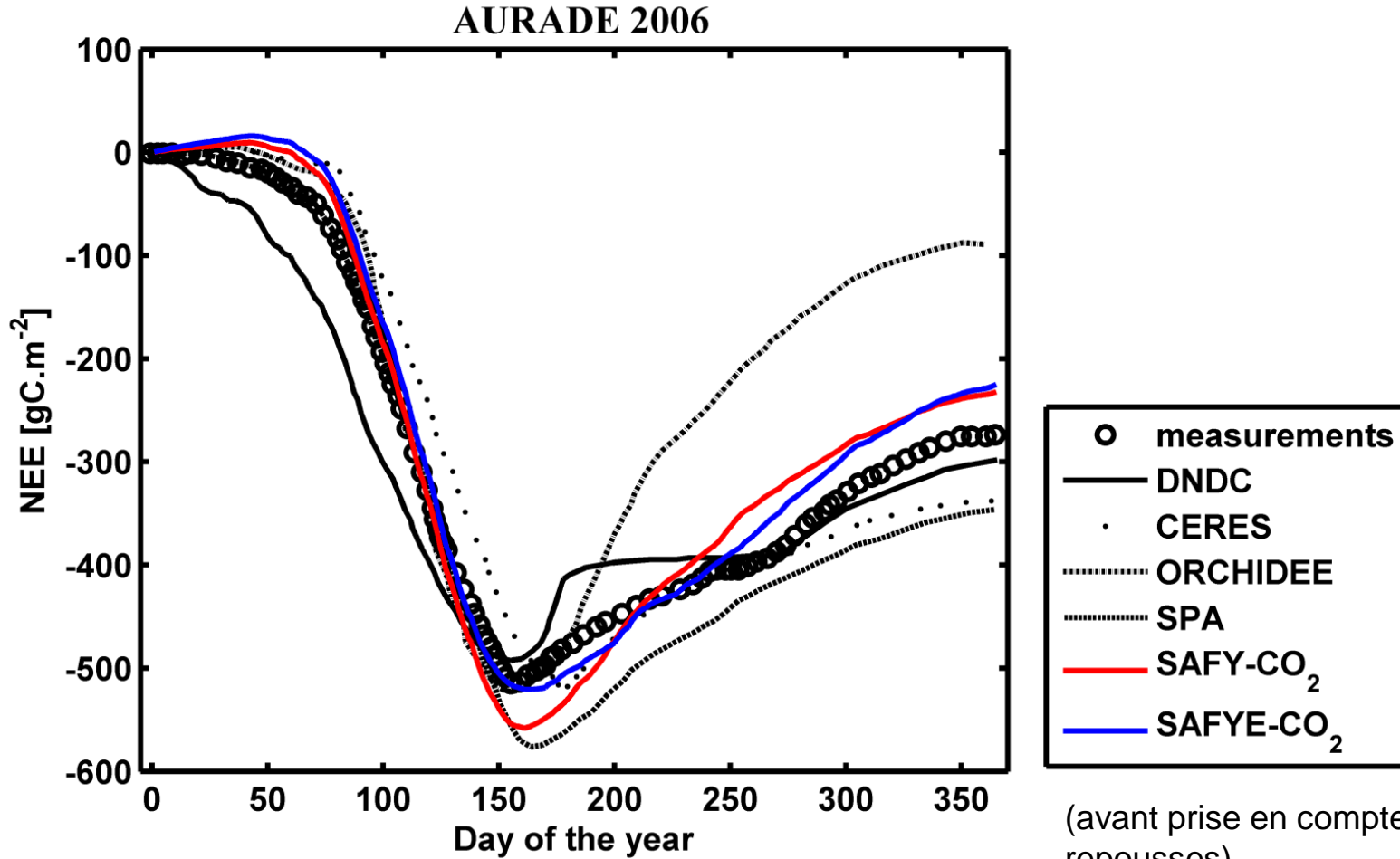
Avec prise en compte des repousses ou couverts intermédiaires (ex CIPAN) détectés par satellite



— OBS
— SIM

Comparaison des différents modèles: flux net de CO₂

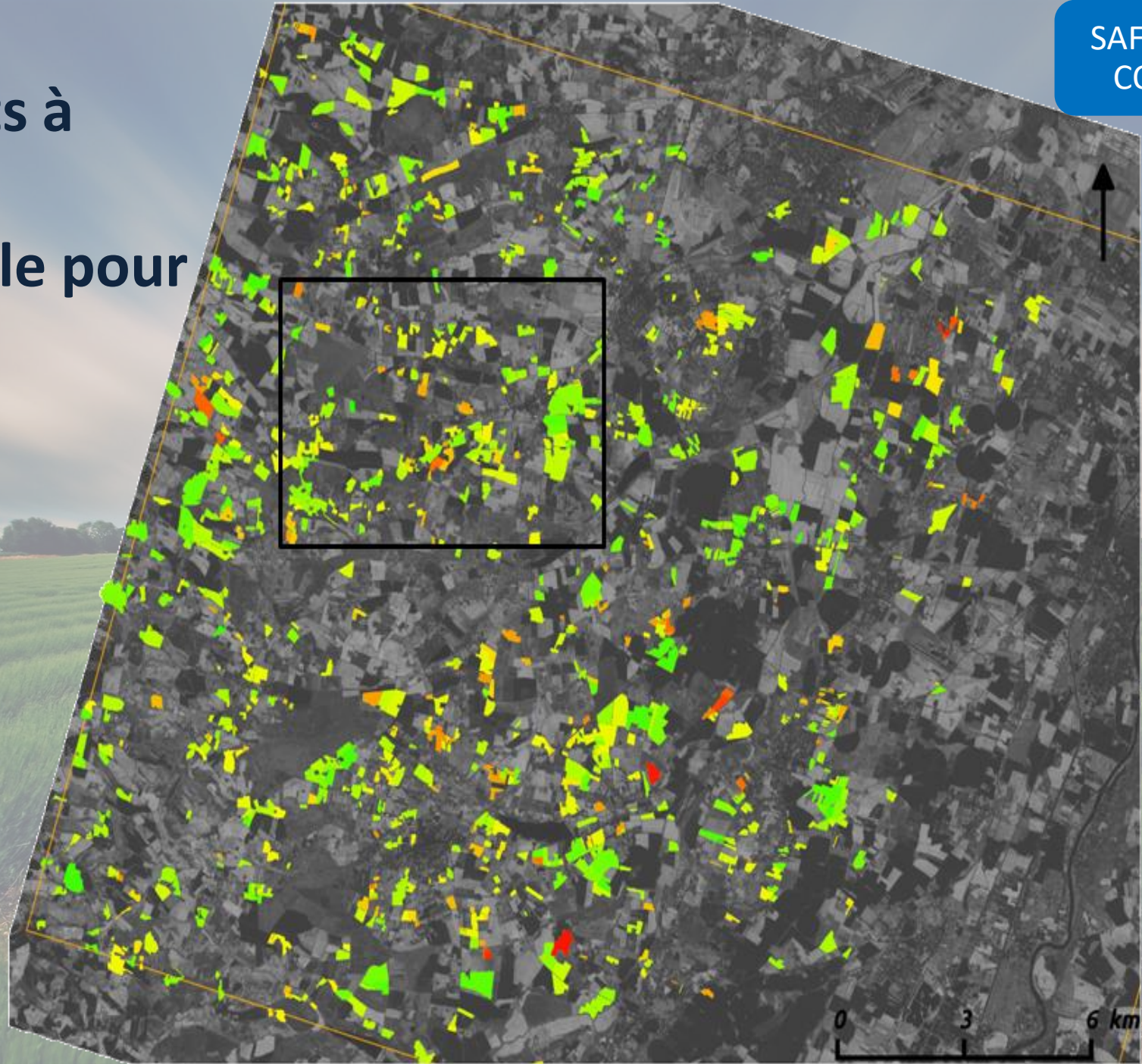
Comparaison de nos résultats avec l'étude de Wattenbach et al. (2010)



Très bonnes performances de notre modèle malgré une approche de modélisation très simple et aucune connaissance à priori du système de culture...

Illustre la puissance de l'outil télédétection pour contraindre les modèles de cultures

Résultats à l'échelle Régionale pour le blé



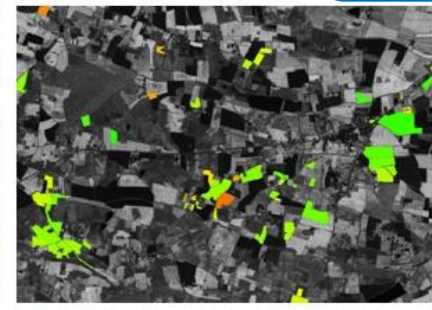
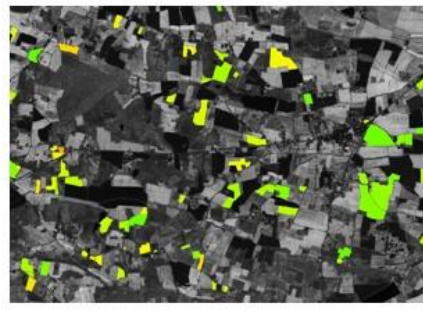
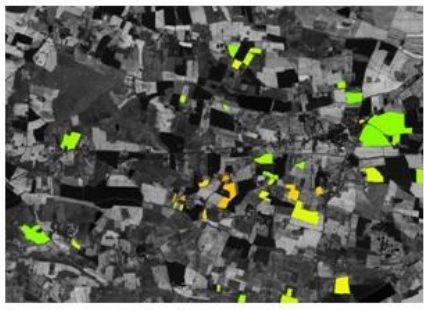
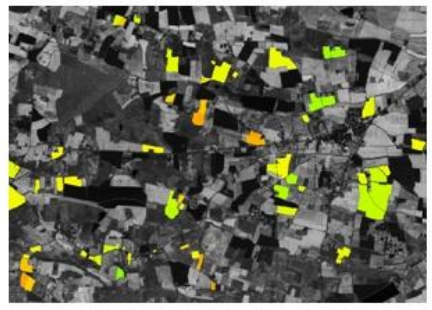
2006

2007

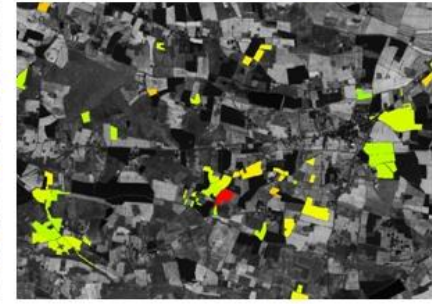
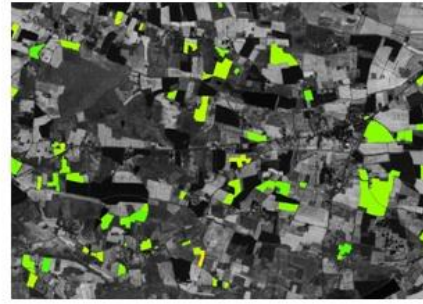
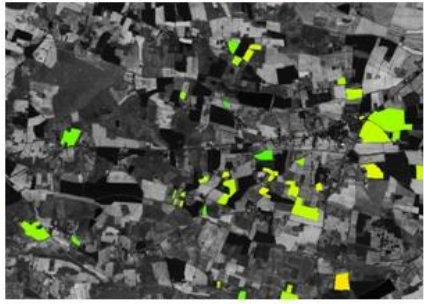
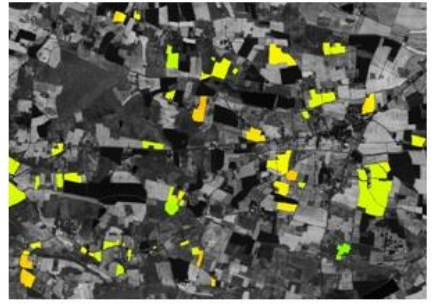
2010

2011

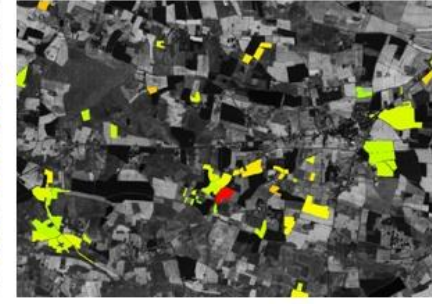
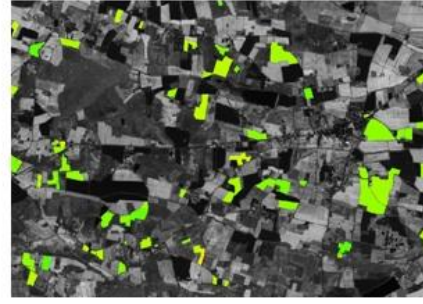
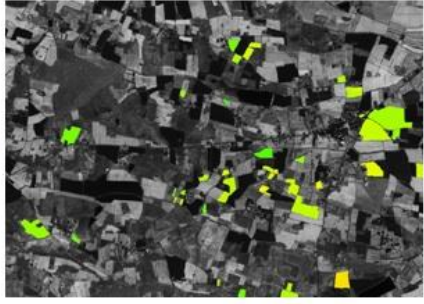
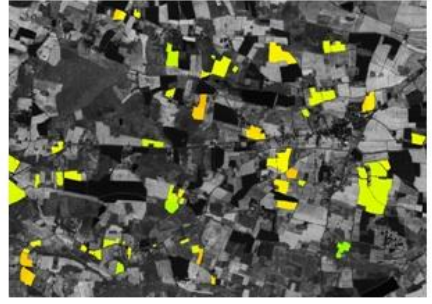
GAI [m².m⁻²]



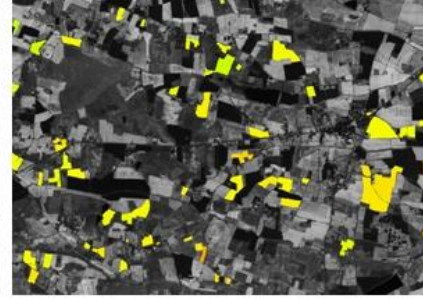
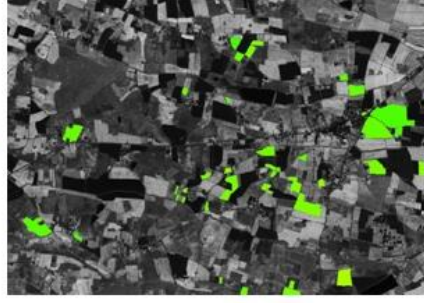
Biomass [g.m⁻²]



Yield [t.ha⁻¹]

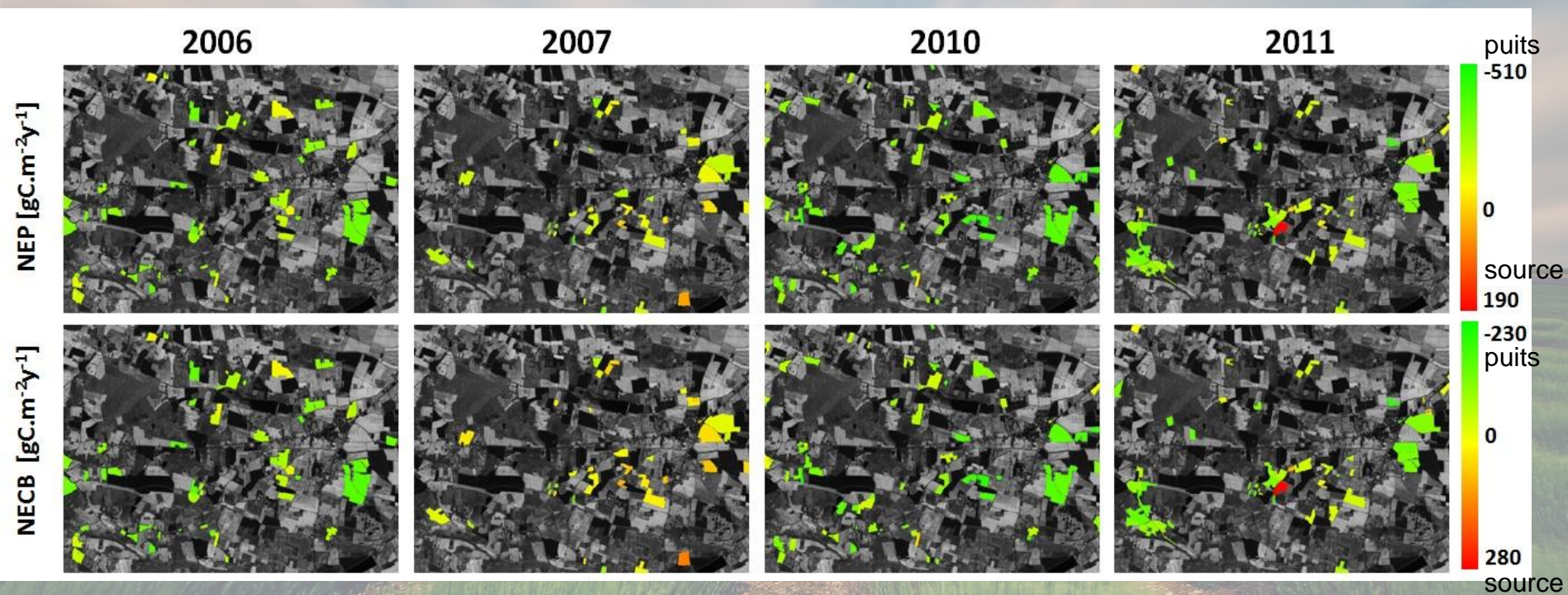


ETR [mm.y⁻¹]



Cartographie des flux net de CO₂ et Bilan C

Thèse d'Amanda Veloso (2014)



Pour le calcul de bilan C l'hypothèse est faite que seul le grain est exporté : vrai sur plus de 90% des parcelles dans la zone sauf en 2011

Prochaine étape : application aux autres cultures et couverts intermédiaires de la zone pour une estimation des bilans de C des rotations complètes (projet CiCC en collab. avec INRA-Auzeville)

Cartes d'humidité de sol nu avec des données radar

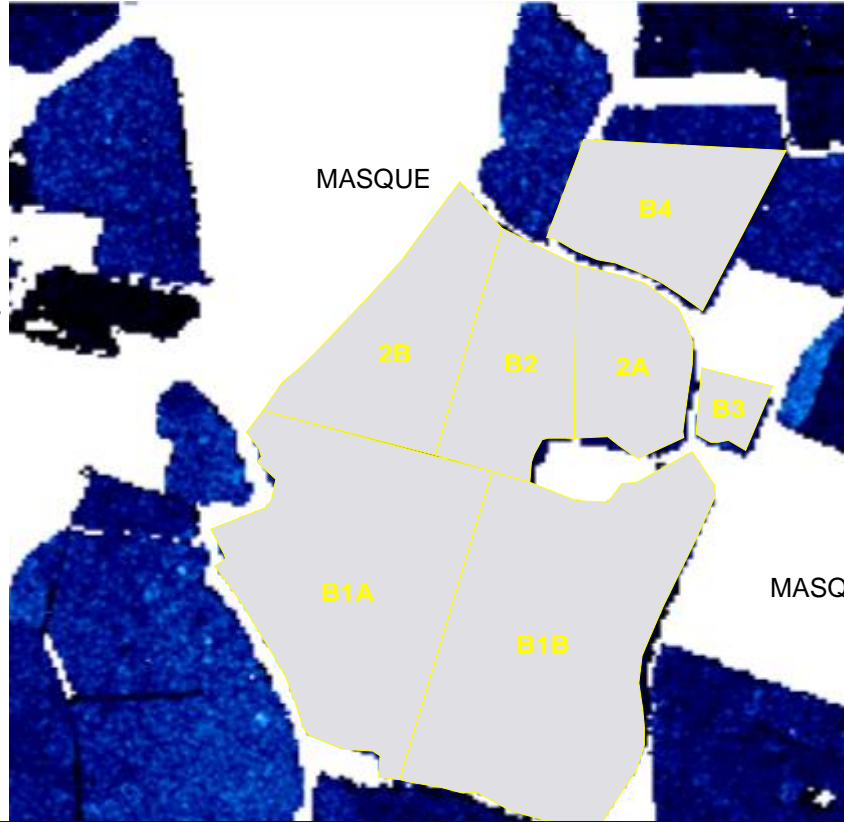
- Image TerrasarX

Source F. Baup, R. Fieuzal

Variable d'intérêt pour la modélisation de l'évaporation (en entrée ou pour la validation des modèles), de la respiration du sol (Rh dans SAFYE-CO₂), des flux de N₂O...



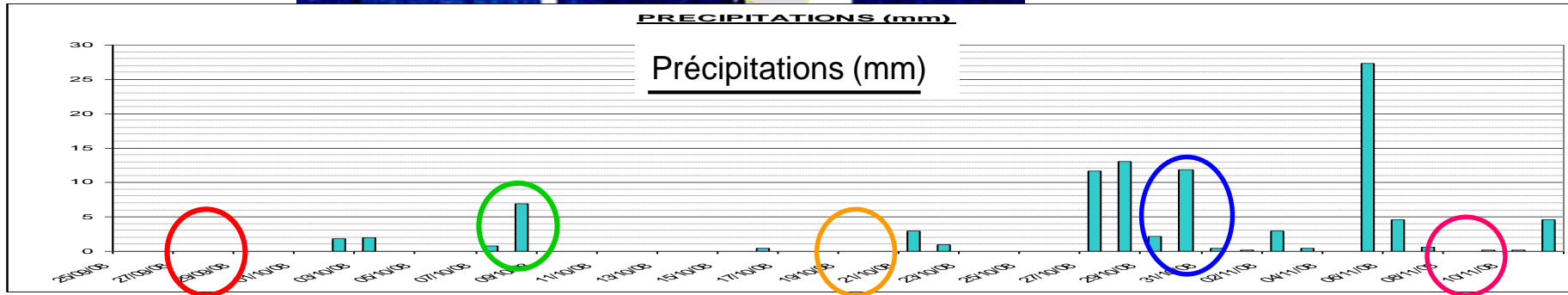
©CESBIO : TERRASARX, 11 days



% volumique

40%

2%

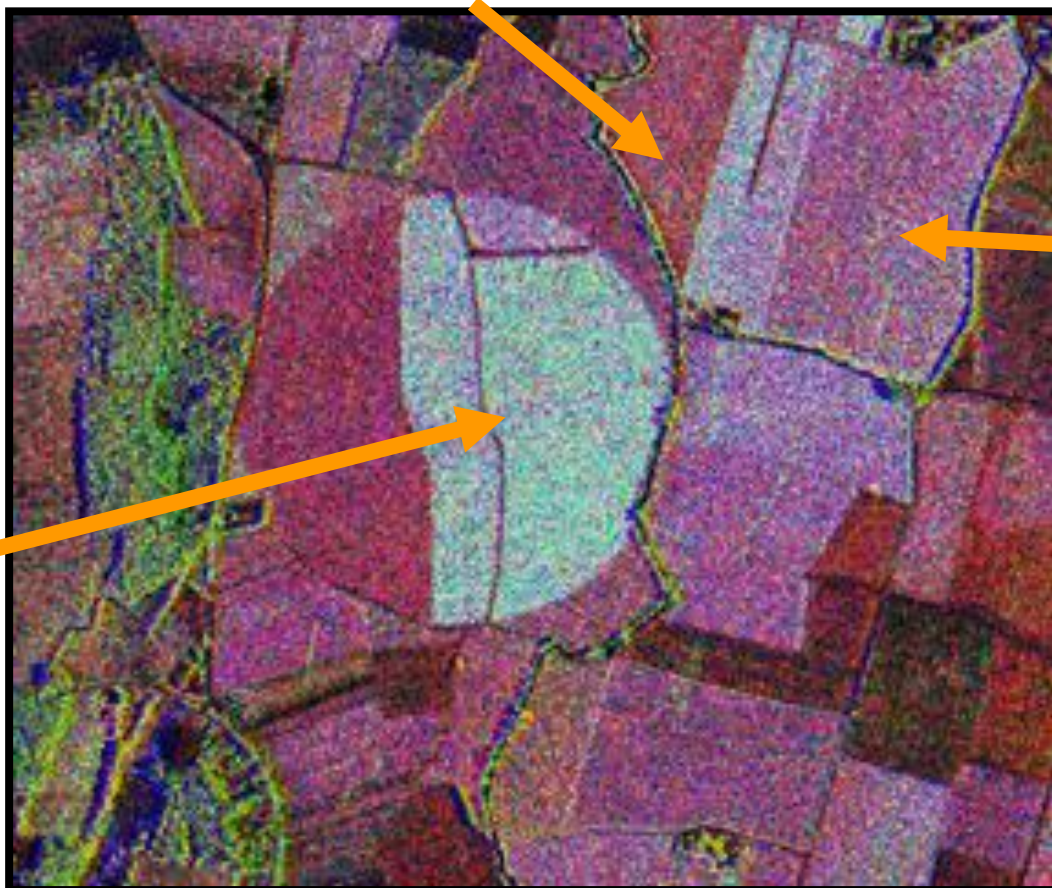


Analyse spatiale et temporelle des travaux du sol grâce aux données radar



- Selon les types de travaux du sol, des émissions de GES différentes peuvent être estimées (ex : différences de consommation en fioul par les machines agricoles).
- Ces travaux ont lieu en automne sur une période courte souvent nuageuse : seul le radar peut garantir l'obtention de ces informations (le signal traverse les nuages).

Sol lissé pour le semis



Reprise de labour avec mottes (rugosité moyenne)

Source F. Baup, R. Fieuzal

Labour avec retournement (forte rugosité)



Analyse spatiale et temporelle des travaux du sol grâce aux données radar

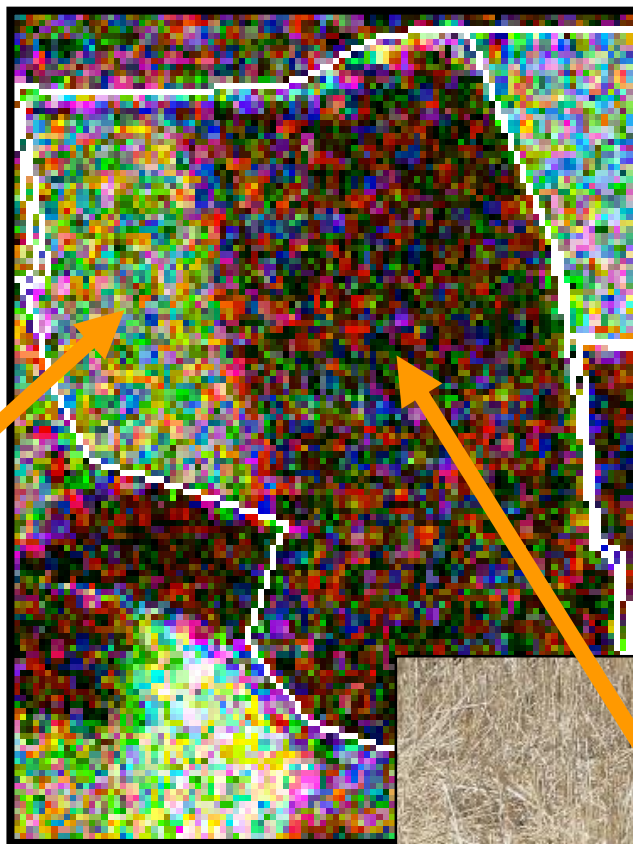


Détection de l'enfouissement des pailles et résidus de culture post récolte.

Bande C, Polar VV (14/07/2010)

Bande X, Polar HH (15/07/2010)

Bande C, Polar HV (14/07/2010)



Source F. Baup, R. Fieuzal

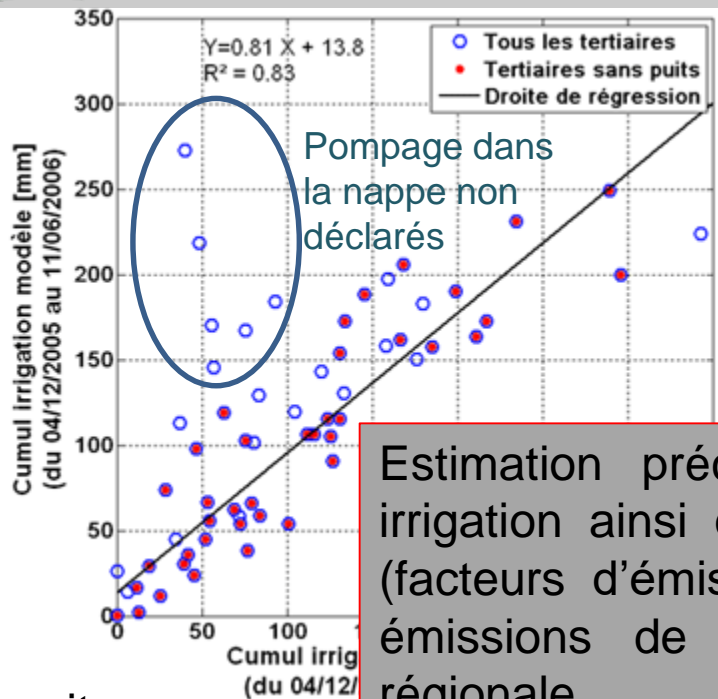


Sol déchaumé (cover crop)



Sol lisse avec chaumes de blé

Estimation des apports d'eau par irrigation et des émissions de GES associées



Cartographie radar des parcelles irriguées et des méthodes d'irrigation

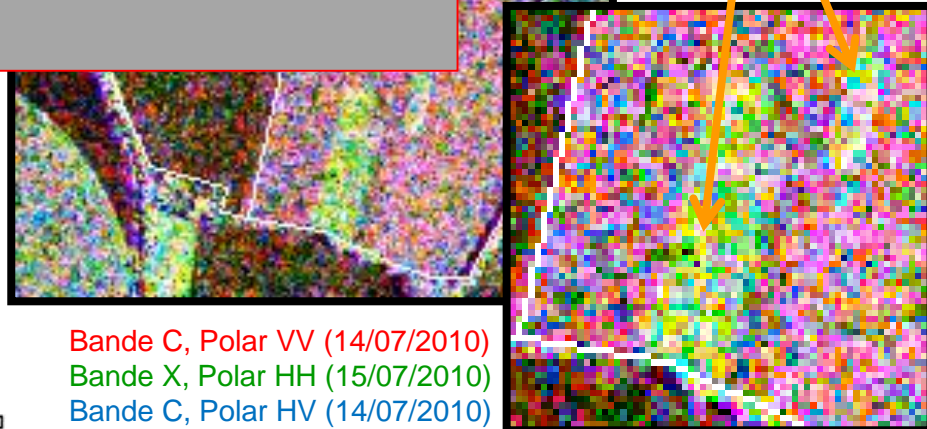


Source F. Baup, R. Fieuzal



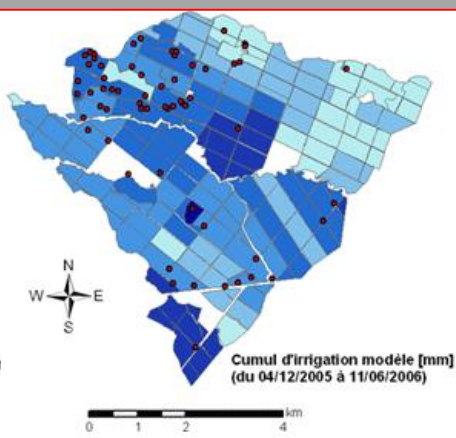
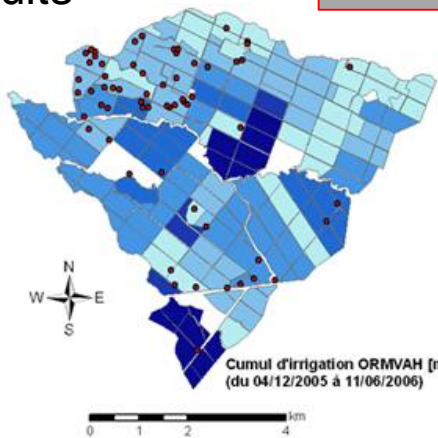
Sprinkler

Estimation précise des besoins/apports en irrigation ainsi que des méthodes d'irrigation (facteurs d'émissions différents) et donc des émissions de GES associées, à l'échelle régionale.



Bande C, Polar VV (14/07/2010)
Bande X, Polar HH (15/07/2010)
Bande C, Polar HV (14/07/2010)

● puits



Apports d'eau par canaux

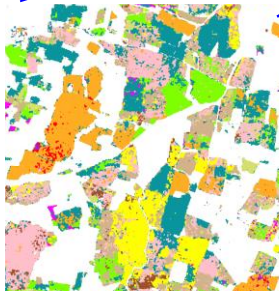
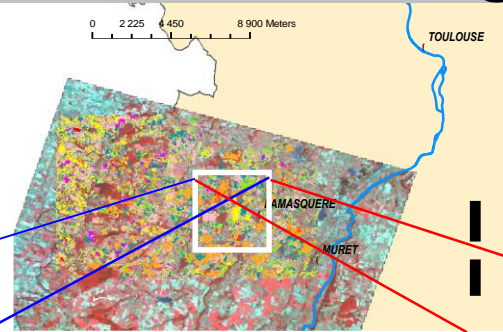
modèle SAFY

Combinaison optique/radar pour la cartographie des usages du sol en agriculture



Données Radar

Données Optique



Terrasar-X

Fusion (amélioration)

SPOT, Formosat-2



Legend

Classe name

	unclassified		corn
	worked		germination
	sun flower		tillage
	soya		inter culture
	prepared		plough stubble
			colza

Cartes d'occupation du sol et des itinéraires techniques parcellaires

Source :

Ducrot D., Baup F., Fieuzal, R.

CESBIO Estimation des bilans spatialisés de GES

- Résolu
- Partiellement résolu
- Solution indirecte
- Pas de solution ??

