

# Soutenance en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches

## Suivi du cycle de l'eau et de la biomasse des surfaces continentales au moyen des données SMOS

**MIALON Arnaud**  
Ingénieur de recherche IR2

UMR 5126, CESBIO Toulouse



### Jury

- Catherine Ottlé : *rapporteuse*
- Agnès Bégué : *rapporteuse*
- Nicolas Delbart : *rapporteur*
- Thierry Pellarin : *examineur*
- Jean Philippe Gastellu Etchegorry : *examineur*
- Yann H. Kerr : *examineur*



# Plan de la présentation

- Parcours
- Motivations et contexte
- SMOS
- Humidité du sol
- Epaisseur Optique de la Végétation
- Hautes latitudes
- Perspectives - Conclusion



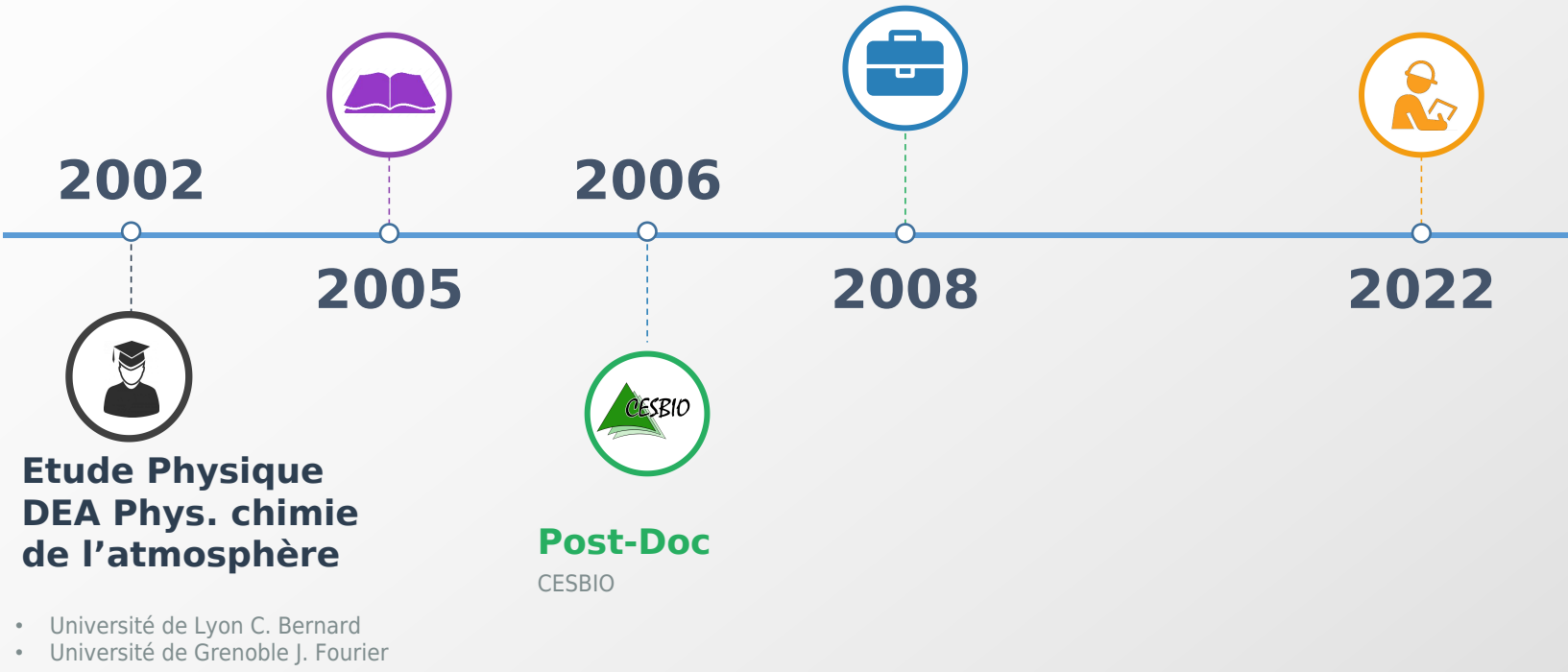
**Doctorat**

- **Climat**
- **Ph.D. Télédétection**

- Université Grenoble J. Fourier  
 - Université de Sherbrooke Qc.

**Ingénieur de Recherche IR2 CNRS**

BAP E  
 Expert calcul scientifique



**Doctorat**

- **Climat**
- **Ph.D.**
- **Téledétection**

- Université Grenoble J. Fourier  
 - Université de Sherbrooke Qc.

### 2002- 2005 : Doctorat en cotutelle



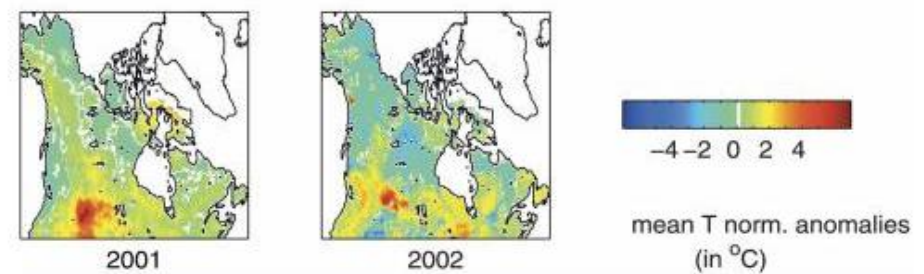
- LGGE Grenoble, direction de Michel FILY
- CARTEL Sherbrooke Qc, Canada, direction de Alain ROYER

- Utilisation des données des satellites SMMR et SSMI
- Micro-ondes passives à 19 et 36 GHz
- Estimation de la fraction d'eau
- Présence de neige
- Températures du sol dans les régions arctiques

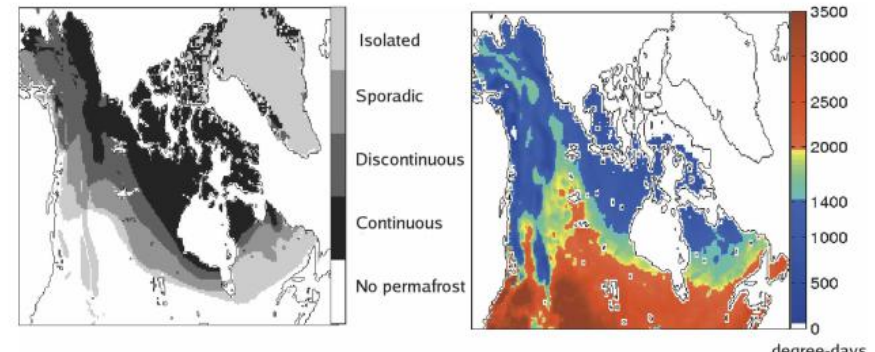


## 2005

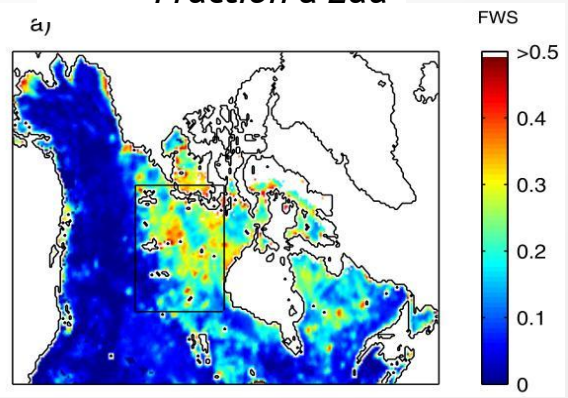
*Estimation de la température du sol*



*Lien avec le pergélisol*



*Fraction d'Eau*



*Fily et al. 2002, Mialon et al. 2005*



2006-2008 : Post Doc

- CESBIO Toulouse
- P. Richaume et Y. Kerr
- Préparation à la mission satellite SMOS
- Validation des algo, jeux de données test

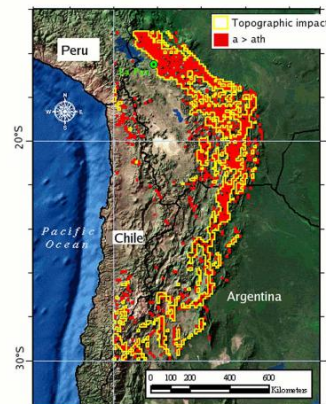
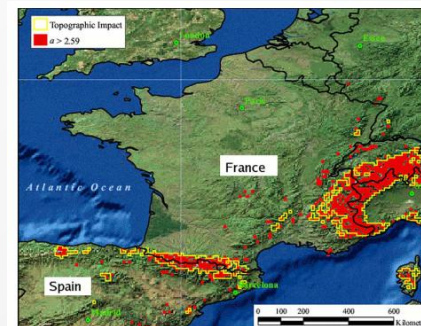
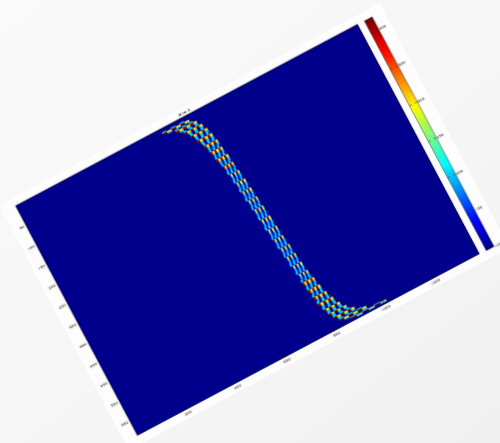


2006



Post-Doc

CESBIO



- Effet de la topographie
- Donnée Auxiliaire

Dec. 2008 : Ingénieur de Recherche classe 2

## Ingénieur de Recherche IR2 CNRS

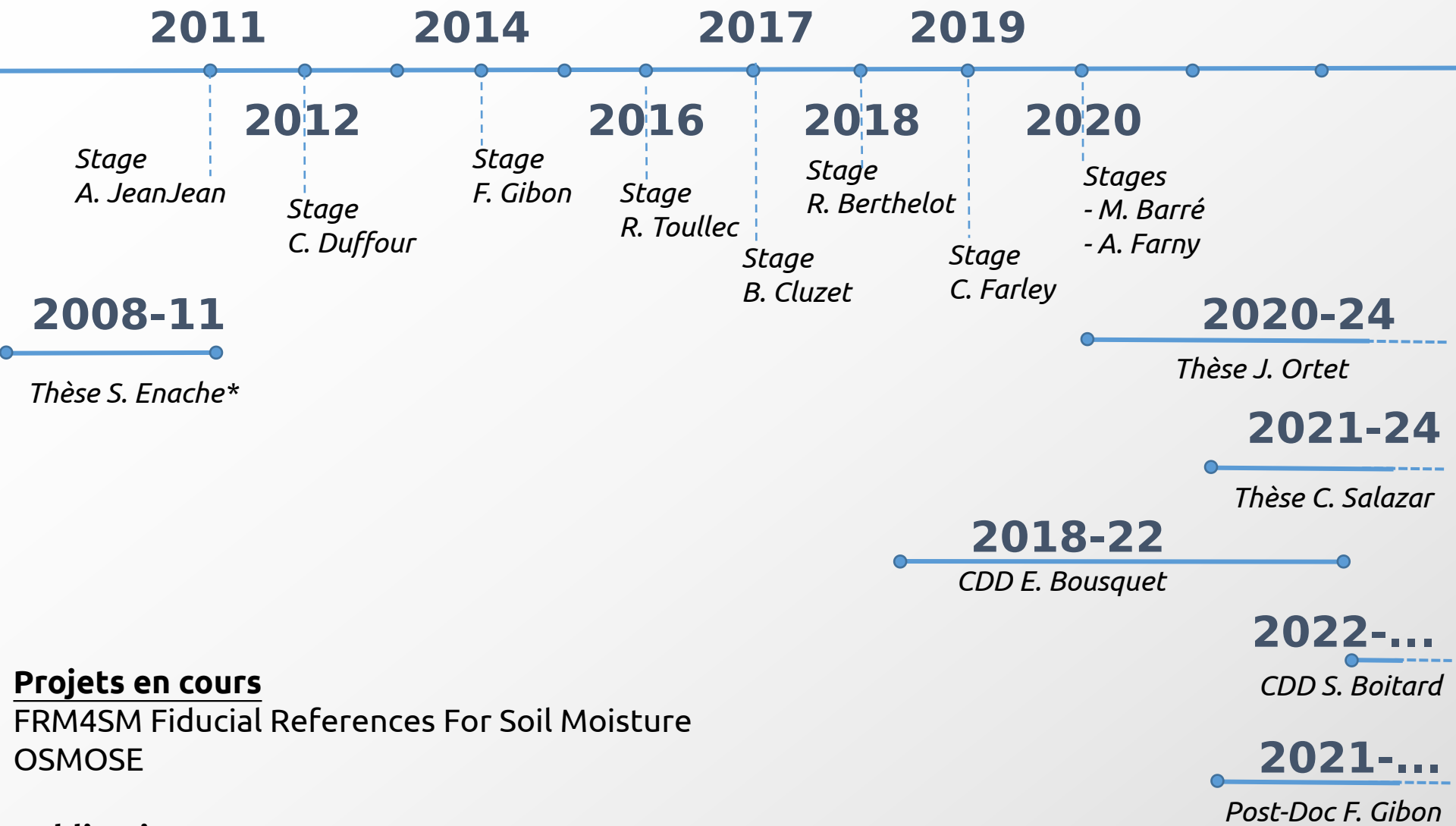
BAP E  
Expert calcul scientifique



**2008**

- BAP E
- Expert en calcul scientifique
- Chaîne de traitement de données satellite
- Mission satellite SMOS





**Projets en cours**

FRM4SM Fiducial References For Soil Moisture  
OSMOSE

**Publications**

- 57 publications dans des journaux de rang A  
dont 1 Nature climate change, 1 dans Nature Plants, 1 dans Nature Ecology and Evolution  
1<sup>er</sup> auteur = 6, 2<sup>nd</sup> auteur = 5

## Contexte d'étude

- Changement climatique : IPCC AR6
- Modifications et boucles de rétroactions du cycle de l'eau

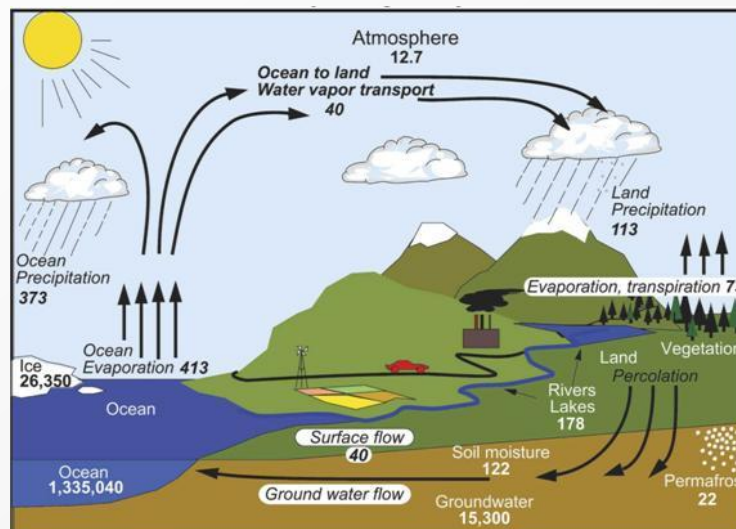


figure © 2007 American Meteorological Society (AMS)

- Besoin d'une meilleure connaissance de l'hydrologie et l'humidité du sol à l'échelle globale



## Hydrologie, rôle de l'humidité des sols

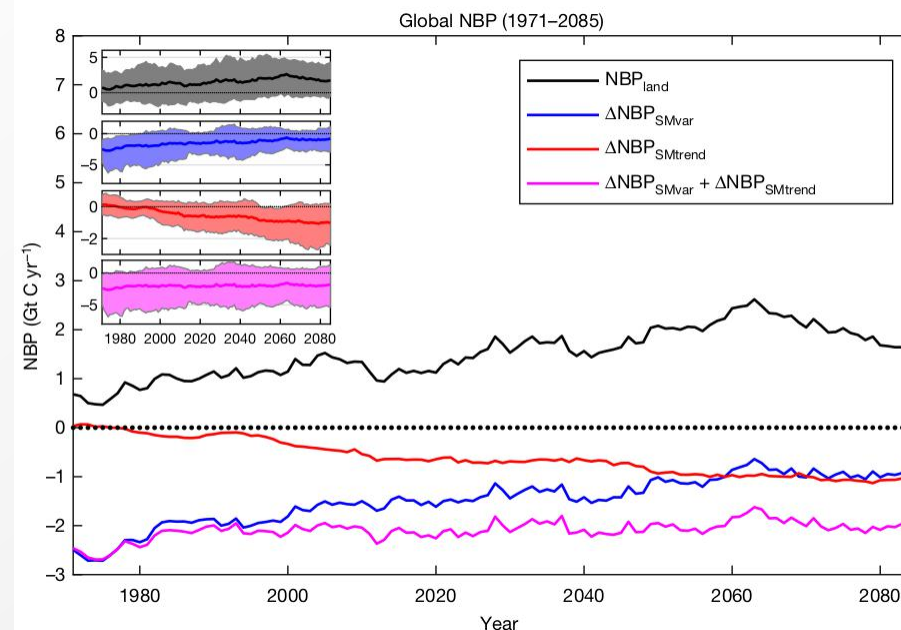
⇒ Amplifie les vagues de chaleurs extrêmes et sécheresses

*IPCC Special Report on Climate Change and Land*

⇒ Assèchement des sols réduit la capacité du sol à absorber et stocker le Carbone

*Green et al. 2019, Nature*

Net Biome  
Productivity  
(NBP)



**Fig. 1 | Global NBP during the twenty-first century.** The evolution of total global NBP ( $NBP_{land}$ ), along with changes in NBP that can be attributed to soil-moisture variability ( $NBP_{SMvar}$ ) and trend ( $NBP_{SMtrend}$ ) through the twenty-first century. The shaded areas in the insets show the spread of the results of the four models for each of the NBP components.

Source : *Green et al 2019*

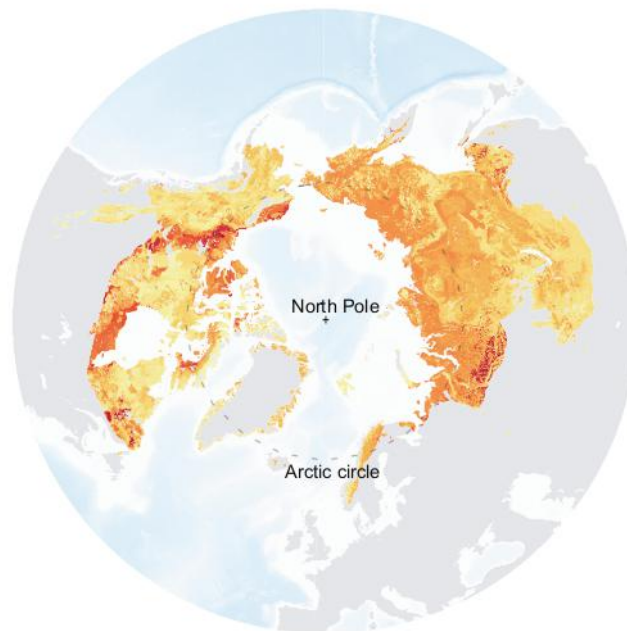
- Liens importants entre les cycles de l'eau et du carbone  
*IPCC AR 6 : «The terrestrial water and carbon cycles are also strongly coupled »*  
*Cross-Chapter Box 5.1*

## Hautes latitudes

- Source importante de carbone et de méthane
- Quantités estimées : 1014 Pg de carbone émis (+ 194 à -175 Pg) Mishra et al. 2021

The thawing of frozen ground in the Arctic will release carbon that will amplify global warming but this will not lead to runaway warming.

Carbon stored in the Arctic permafrost



Kg of organic carbon per m<sup>2</sup>

0	20	40	60	80+
---	----	----	----	-----

Permafrost **vulnerable** to abrupt thaw



0 1000 2000 km

FAQ 5.2, Figure 1 | The Arctic permafrost is a big pool of carbon that is sensitive to climate change. (Left) Quantity of carbon stored in the permafrost, to 3 m depth (NCSCDv2 dataset) and (right) area of permafrost vulnerable to abrupt thaw (Circumpolar Thermokarst Landscapes dataset).

## Hautes latitudes

### L'humidité des sols

- Pilote les flux de carbone et le développement de la végétation, Zona et al. 2022
- Tendance à l'assèchement de ces sols : drainage vers les couches profondes car l'épaisseur de la couche active de pergélisol augmente, Andresen et al. 2019

### Lawrence et al. 2015 :

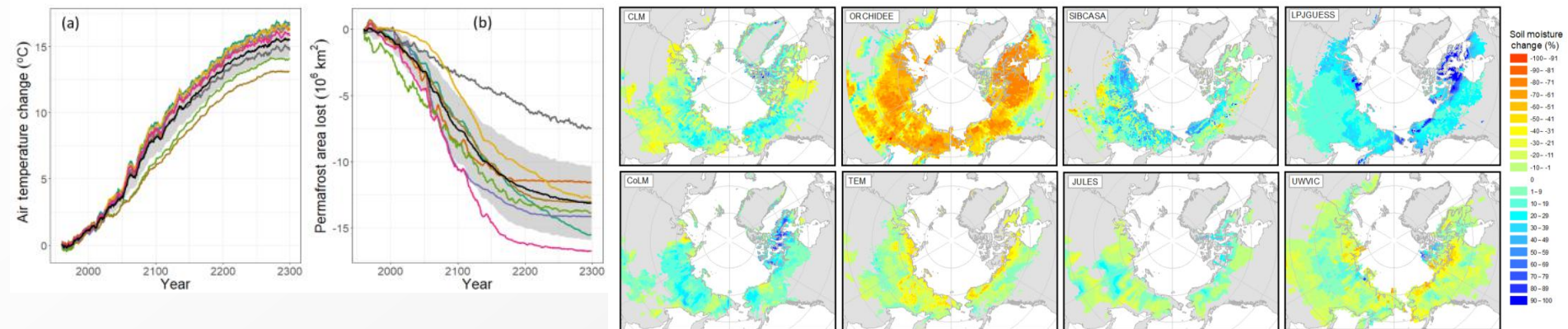
« Permafrost thaw and resulting soil moisture changes regulate projected high-latitude CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions »

- Incertitudes sur les émissions de Carbone dues à la fonte du pergélisol
- Incertitudes sur les rétroactions : émissions de carbone/climat
- Ces incertitudes sont liées aux changements hydrologiques
- Besoin : **meilleure compréhension et modélisation des changements des conditions d'humidité du sol à grande échelle en réponse à la fonte du pergélisol**

Andresen et al. 2019 :

«Soil moisture and hydrology projections of the permafrost region-a model intercomparison»

- Les projections de cet assèchement varient bcp en intensité et en spatiale



**Figure 3.** Spatial variability of projected changes in surface soil moisture (%) among models. Depicted changes are calculated as the difference between the 2071 to 2100 average and the 1960 to 1989 average. Colored area represents the initial simulated permafrost domain of 1960 for each model.

IPCC AR 6 , box Box 5.1 : Permafrost Carbon and Feedbacks to Climate

« thawing terrestrial permafrost will lead to carbon release under a warmer world (high confidence).

However, there is low confidence on the timing, magnitude and linearity of the permafrost climate feedback owing to the wide range of published estimates and the incomplete knowledge and representation in models of drivers and relationships »



IPCC recommandations

«Quantitative estimates of the actual role of soil moisture feedbacks are uncertain»

Source : *Special Report on Climate Change and Land*

<https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-2/>

Besoin de mesure de l'humidité des sols à l'échelle globale

⇒ Définition de la mission satellite SMOS Soil Moisture and Ocean Salinity en 1999

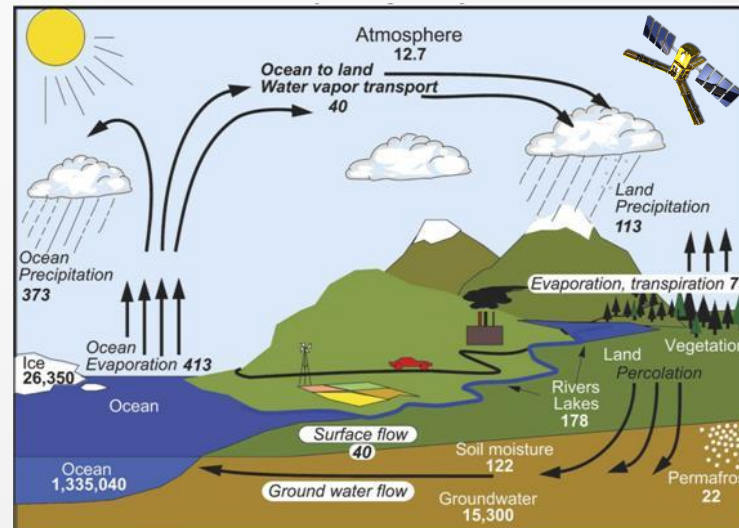
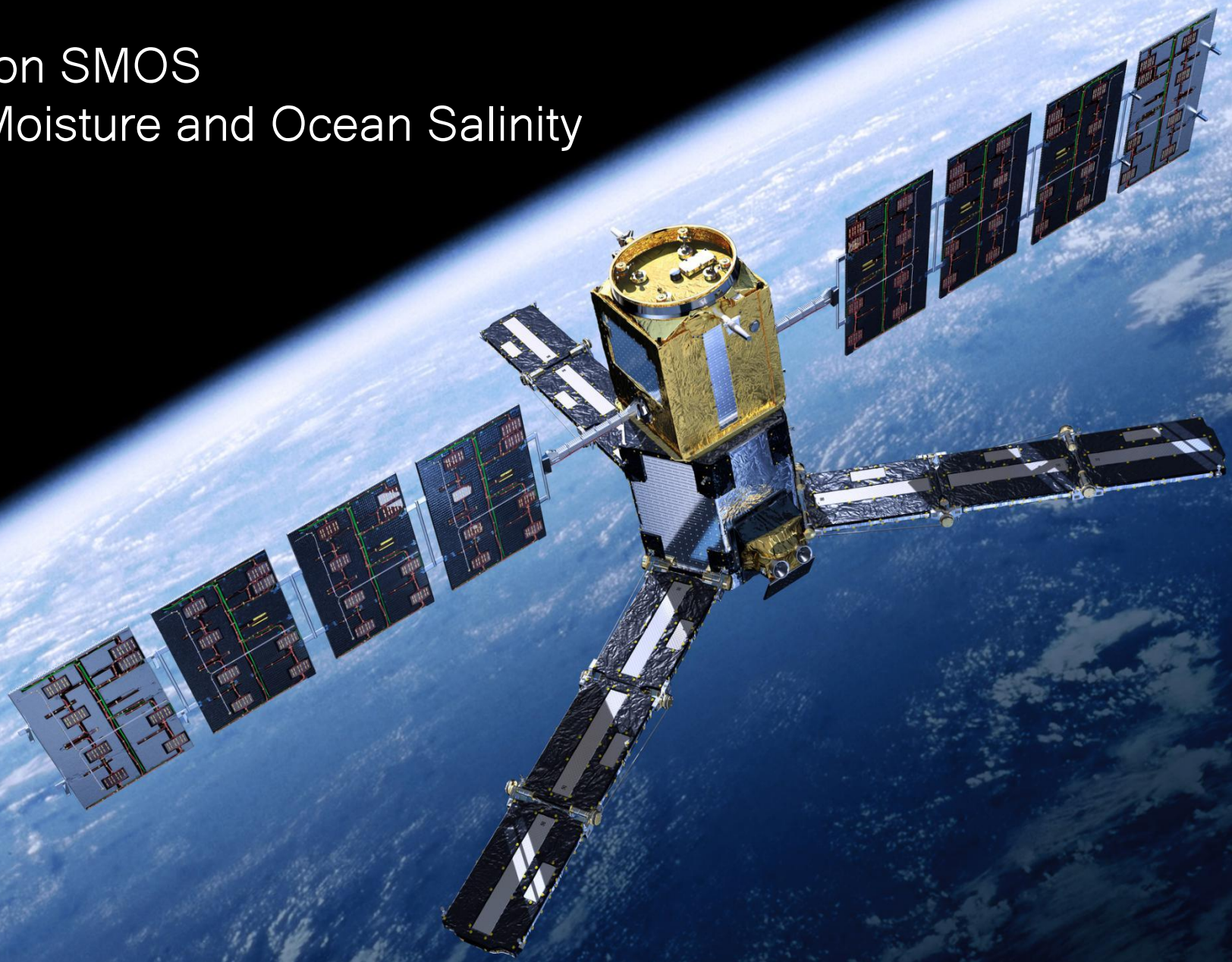


figure © 2007 American Meteorological Society (AMS)

Cycle de l'eau

# Mission SMOS

## Soil Moisture and Ocean Salinity





- Mission ESA - CNES - CDTI
- Lancement en Novembre 2009  
Données depuis juin 2010
- Données : Températures de brillance, multi-angulaires, full polarisation
- Résolution spatiale :
  - ~ 40 km comme mission SMAP, AMSR...
  - les données sont reprojctées
    - 15 km
    - EASEv2 - 25 km x 25 km à 30 deg de latitude

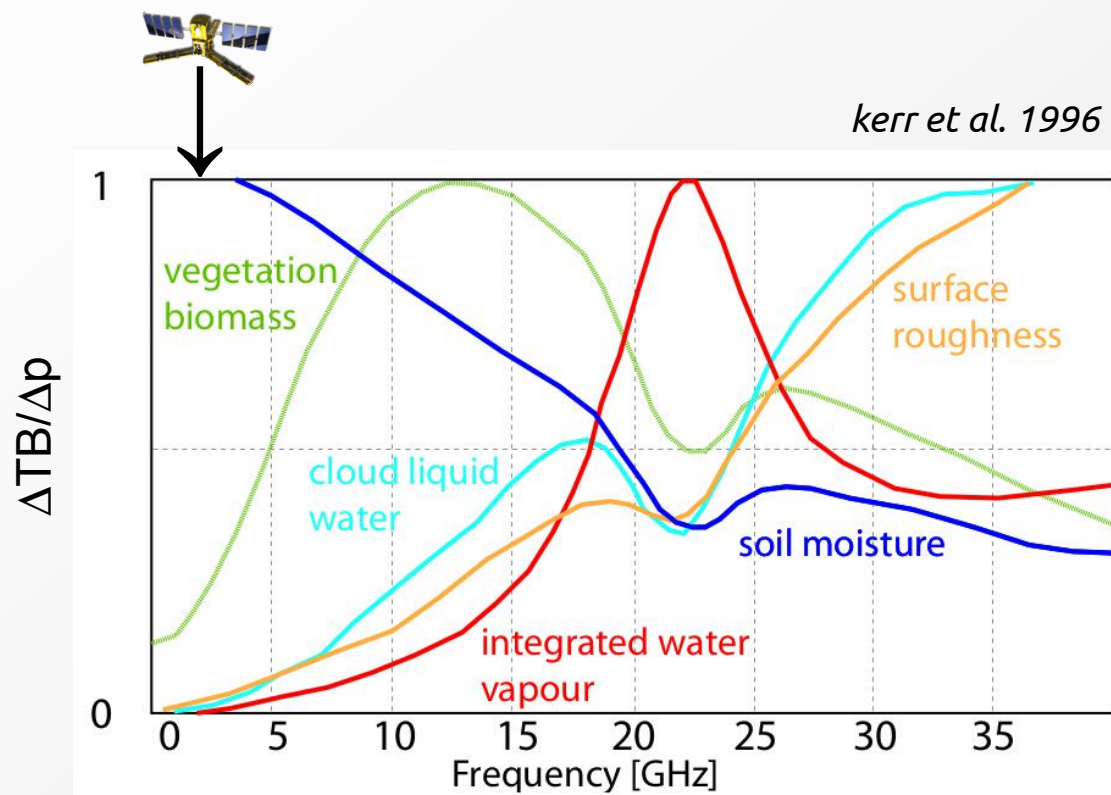
## ⇒ Etudes grandes échelles

- Résolution temporelle
  - Couverture globale en ~ 3 jours
  - Passage orbites ascendantes : 6h à l'équateur
  - Passage orbites descendantes : 18h à l'équateur





- Fréquence : 1.4 GHz,  $\lambda = 21$  cm
- Domaine de micro-ondes passives
- Bande L



- Forte sensibilité des mesures aux faibles fréquences à la molécule d'eau
- Bande L protégée pour l'astrophysique...normalement



## Objectifs principaux de la mission

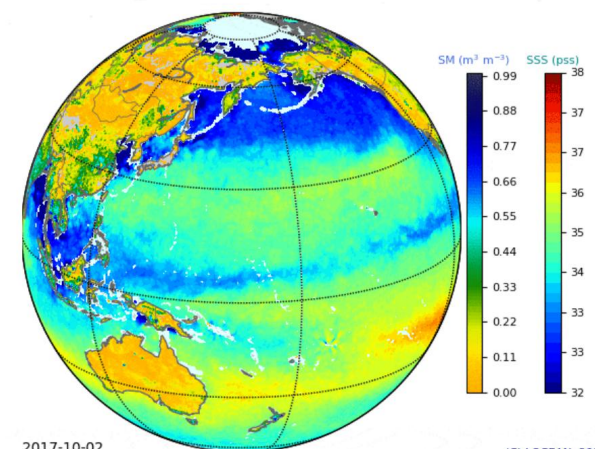
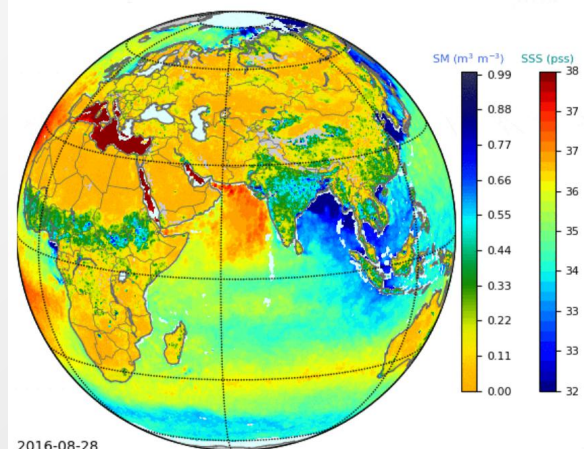
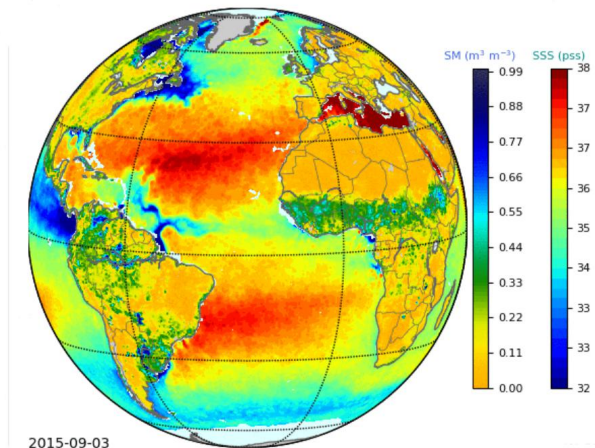
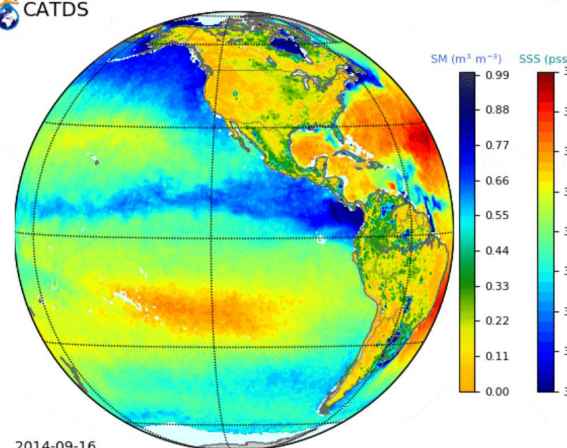
- Humidité des sols des surfaces continentales
  - valeur absolue de SM ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
  - incertitude de  $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (\*)
- Salinité des Océans

(\*) pas partout !  
on y reviendra ...



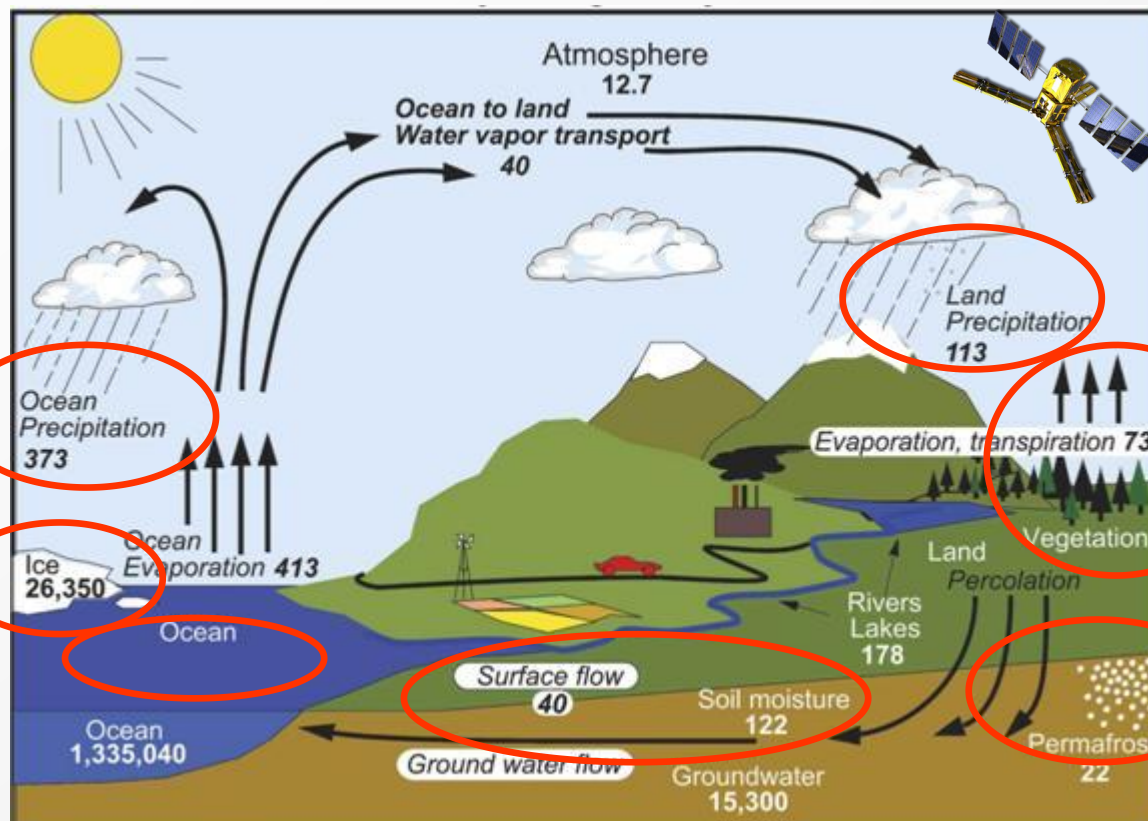
Mais de nombreuses autres applications...

CATDS



## le cycle de l'eau et les observations des données SMOS

figure © 2007 American Meteorological Society (AMS)



### Cryosphère

- Etendue de la glace de mer
- Kaleschke et al. 2012*
- Densité de la neige
- Contenu en eau de la calotte Groenlandaise
- Houtz et al. 2019, 21*
- Température de la calotte antarctique
- Macelloni et al. 2016*
- Fonte de surface en Antarctique
- Leduc-Leballeur et al. 2020*

### Océan

- pluie, cyclones, grands fleuves dans les océans
- J. Boutin, N. Reul...*

### Précipitations

- PrISM (*Pellarin et al.*)

### Biomasse

- Estimation de la biomasse (*Rodriguez et al.*)

### Région de pergélisol

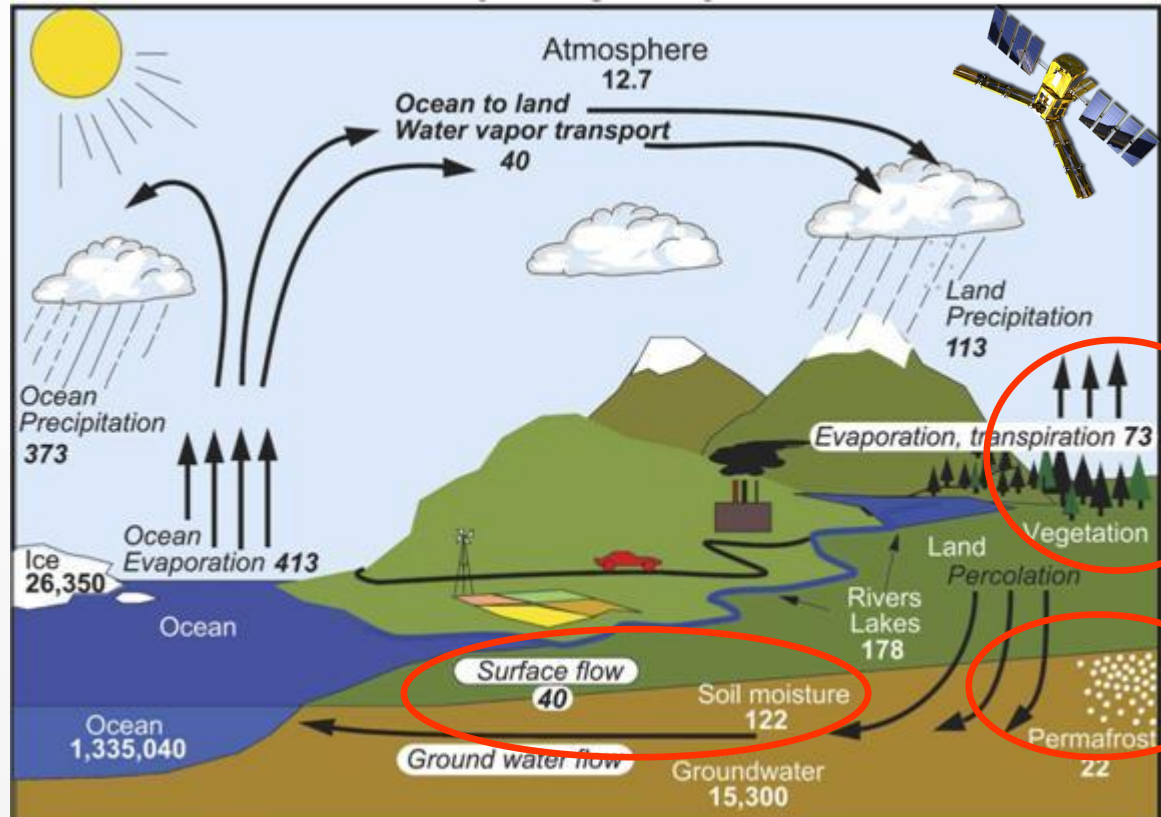
- Produits de gel/dégel (*Rautiainen et al.*)
- Flux de Carbone associé au cycle gel/dégel

### Eau dans le sol

- Humidité surface 0 - ~5cm
- Humidité en zone racinaire (*Al Bitar et al.*)
- Indice de Sécheresse

## le cycle de l'eau et les observations des données SMOS

figure © 2007 American Meteorological Society (AMS)



**Biomasse**

**Région de pergélisol**

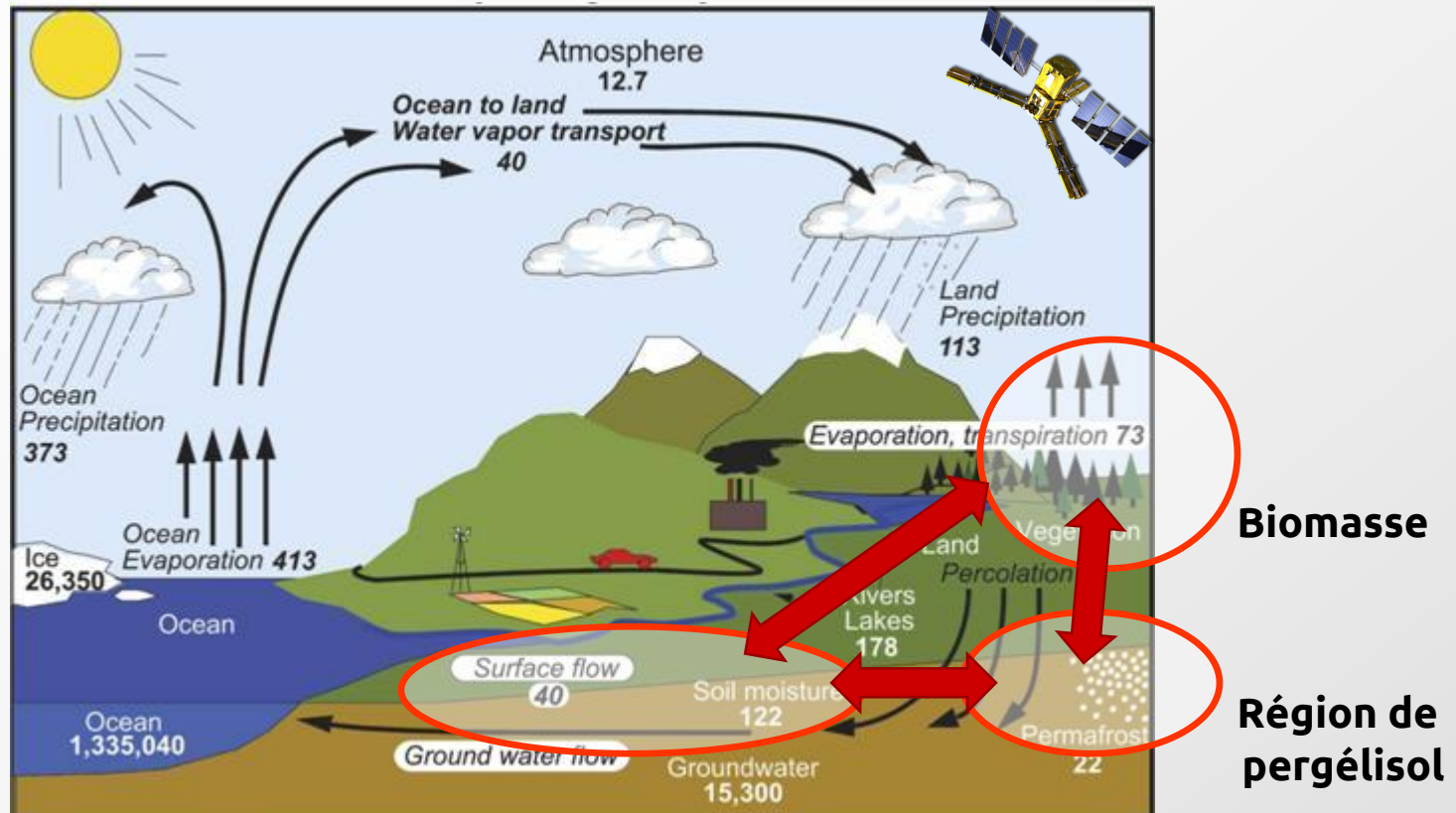
**Eau dans le sol**

Mon projet se focalise sur 3 composantes



## Questions scientifiques Interactions et liens entre ces 3 composantes

figure © 2007 American Meteorological Society (AMS)



**Biomasse**

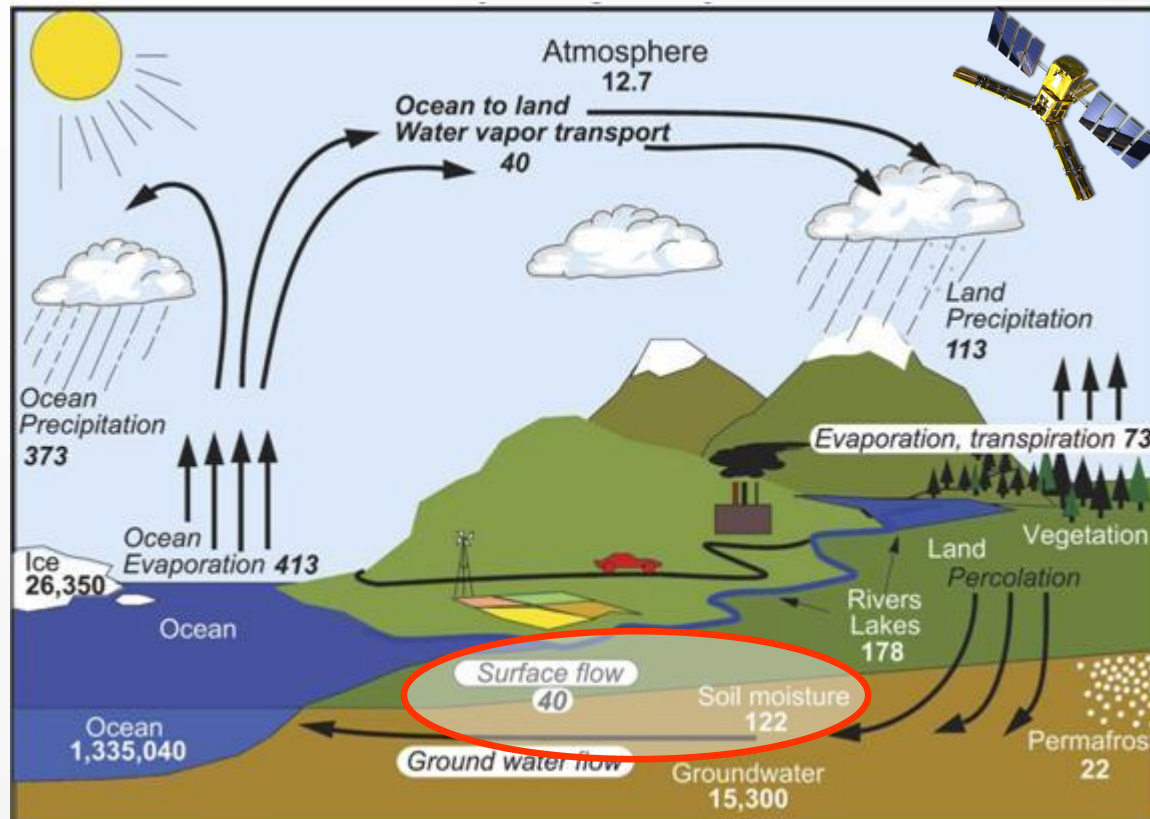
**Région de pergélisol**

**Eau dans le sol**



## Questions scientifiques Interactions et liens entre ces 3 composantes

figure © 2007 American Meteorological Society (AMS)



**Eau dans le sol**

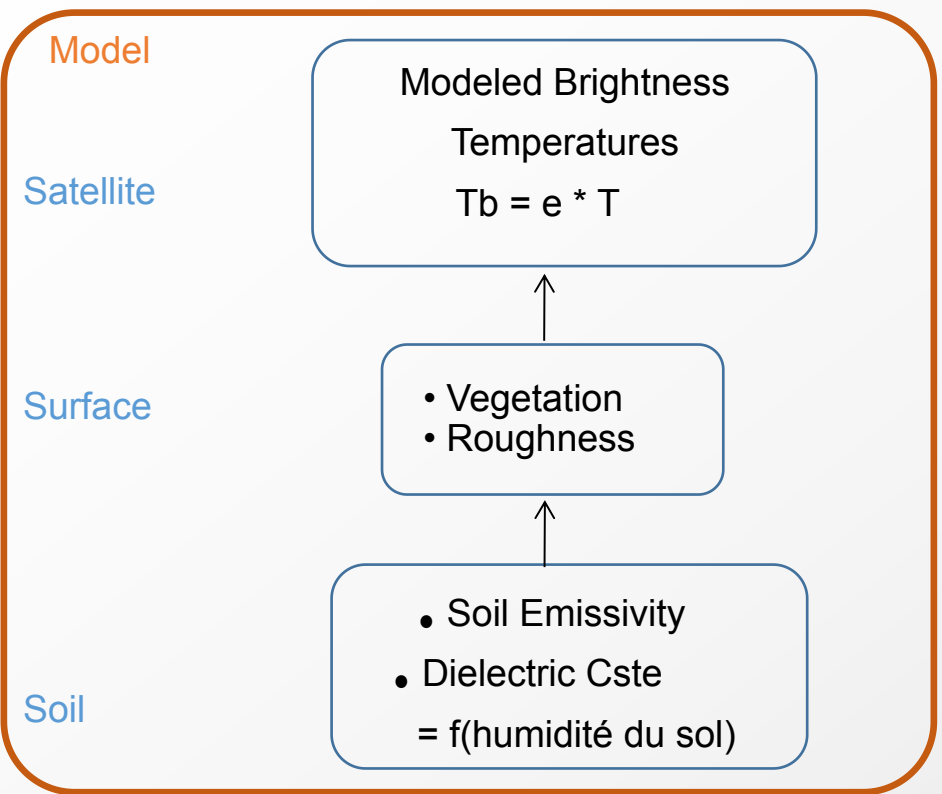
## humidité des sols : Soil Moisture - SM

- Algorithme d'inversion d'humidité des sols
- Lien avec mes travaux de recherche
- Validation des données SM
- Travaux en cours et à venir

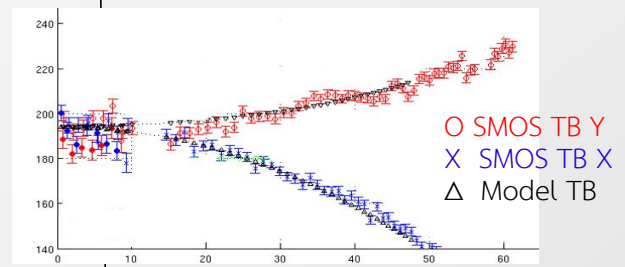
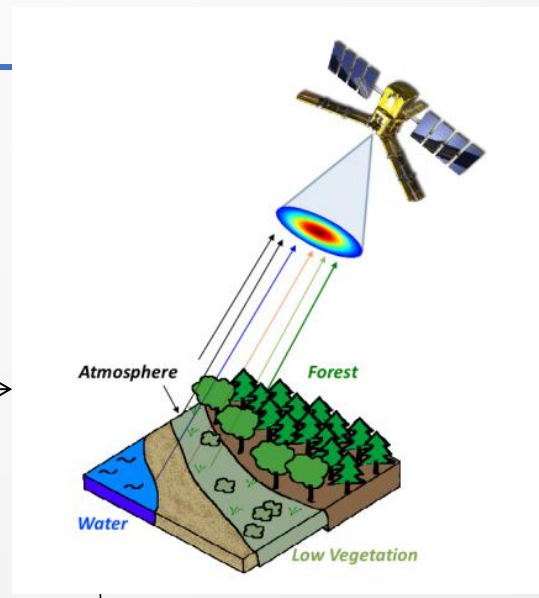
### L'intérêt

- Améliorer la qualité des données SMOS

Algorithme d'inversion :  
de la température de brillance à l'humidité du sol



versus



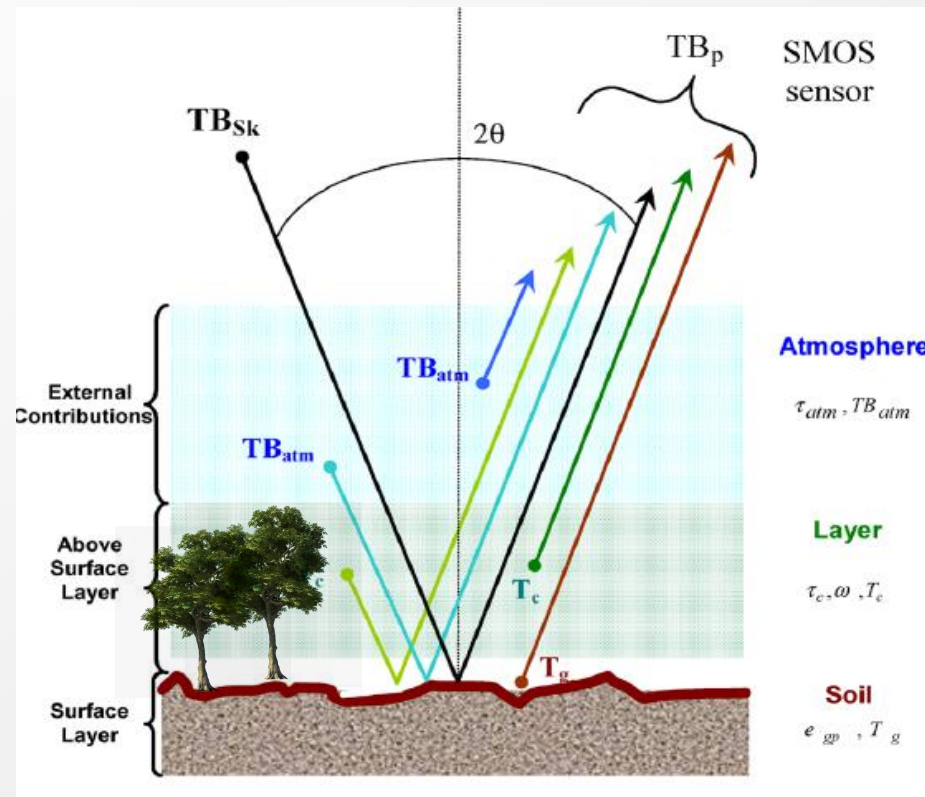
Minimisation d'une fonction de coût

$$\text{Costfunction} = \sum_{P=H,V} \frac{(TB_{SMOS,P} - TB_{model,P})^2}{\sigma_{SMOSaccuracy}^2} + \sum_{i=sm,tau_{nad}} \frac{(Param_{init,i} - Param_{model,i})^2}{\sigma_{Param}^2}$$

Paramètres inversés : SM, Tau

## L'algorithme de SMOS est basé sur le modèle **L-Meb** L-band **M**icrowave **E**mission of the **B**iosphere

- Emission de la surface en bande L
- Multi couches
- Prend en compte les effets d'angle d'incidence
- Polarisation Verticale V et horizontale H





$$T_{B,tot}(P, \theta) = e_s T_s \gamma + (1 - \omega) (1 - \gamma) T_v + (1 - \omega) (1 - \gamma) T_v (1 - e_s) \gamma + T_{B,sky} \gamma^2 (1 - e_s)$$

1. soil

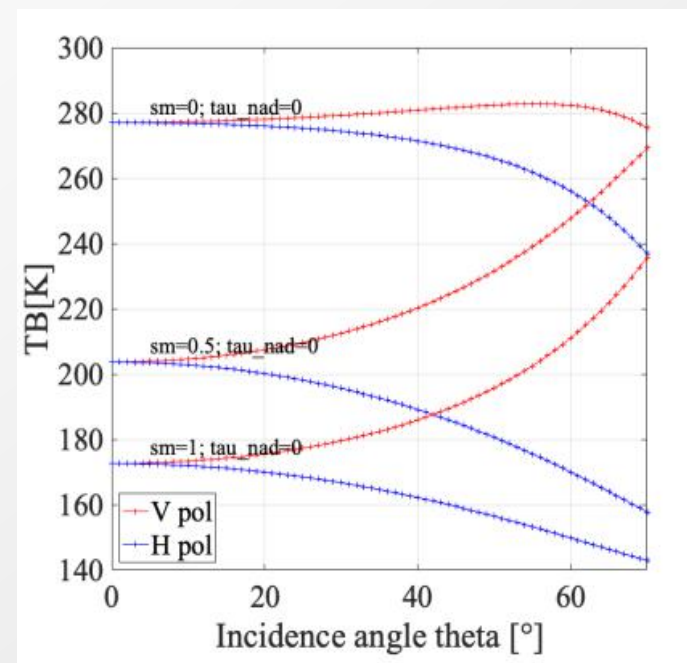
2. vegetation

3. vegetation-soil

4. sky

## Emissivité des sols : $e_s$

- Dépend de l'humidité des sols
  - cste diel de l'eau 80
  - sol sec ~4
- Dépend de la texture
- Modèle : *Mironov et al. 2009, 2013*
- Sol organique : *Bircher et al. 2016*



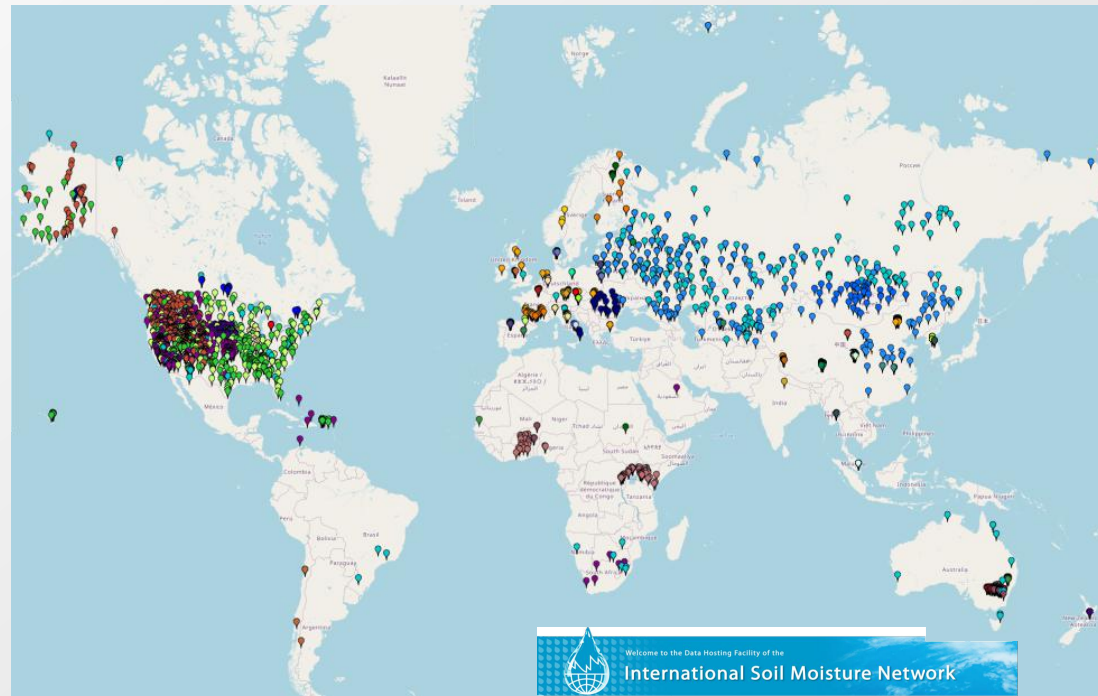
- Mes travaux :
- Utilisation des modèles de cste diélectrique dans SMOS (*Mialon et al. 2015*)
  - Effets de la rugosité de surface (*Mialon et al. 2012, Stage F. Gibon*)
  - Données auxiliaires (neige)
  - **Etalonnage des données SMOS**

## Etalonnage et Validation

- Objectifs mission (mission requirements) : précision absolue de  $0.04 \text{ m}^3 \text{ d'eau/m}^3 \text{ de sol}$
- Utilisation du réseau in-situ ISMN comme référence
- Améliorer et étalonner les données SMOS
- Problématiques de validation
  - a. SMOS
  - b. Référence : Sonde
  - c. Méthodologie

⇒ incertitude globale = fct(a, b, c)

*Sites in-situ de l'ISMN - International Soil Moisture Network*

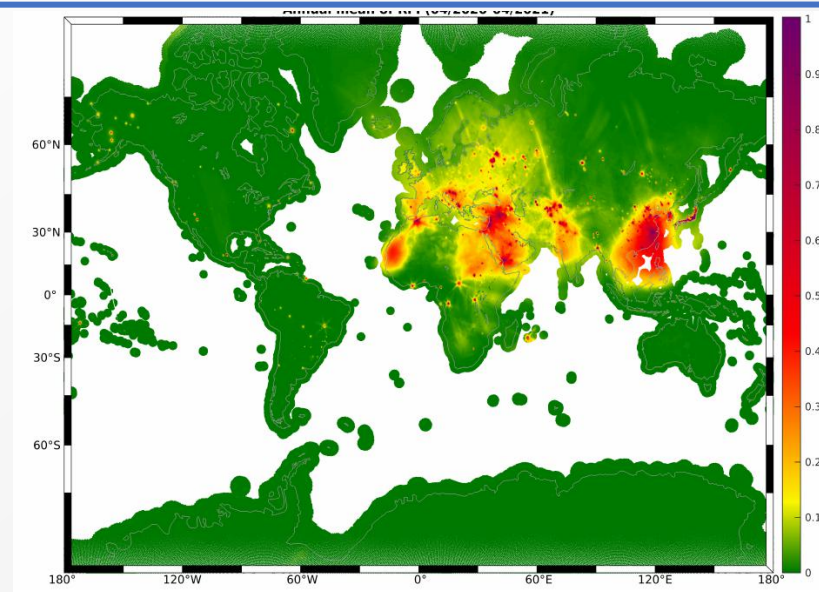


- Post doc François Gibon
- Projet FRM4SM  
Fiducial Reference Measurements  
For Soil Moisture

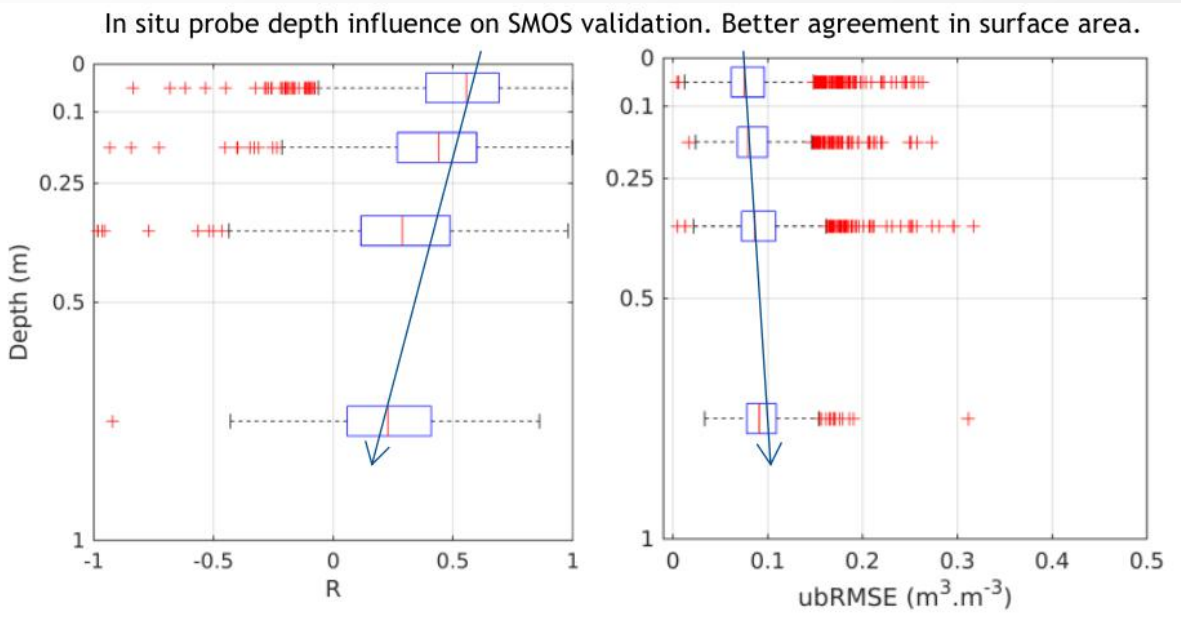
Etalonnage et Validation

- SMOS
- Référence : Sonde
- Méthodologie

- Bruits instrumentaux
- RFI : Radio Frequency Interferences
- Profondeur de pénétration de l'onde
  - théorie : ~5 cm du sol
  - Escorihuela et al. : ~ 3cm
  - Dépend du SM
- Dépend de la texture (sable/argile)



*Sources anthropiques qui émettent un signal trop important (RFI)  
Moyenne pour la période 2020-2021*



Travail à venir :  
Evaluer les performances de SMOS en fct de la profondeur lors des épisodes secs

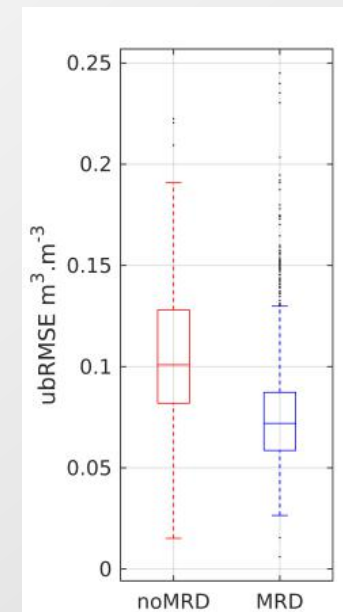
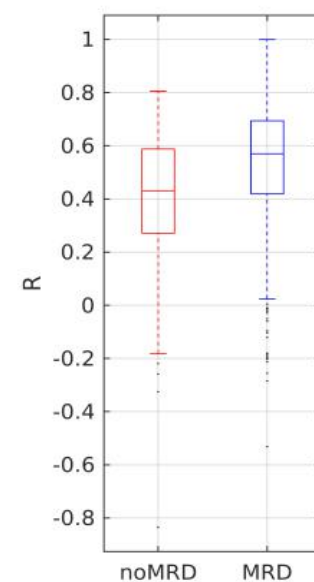
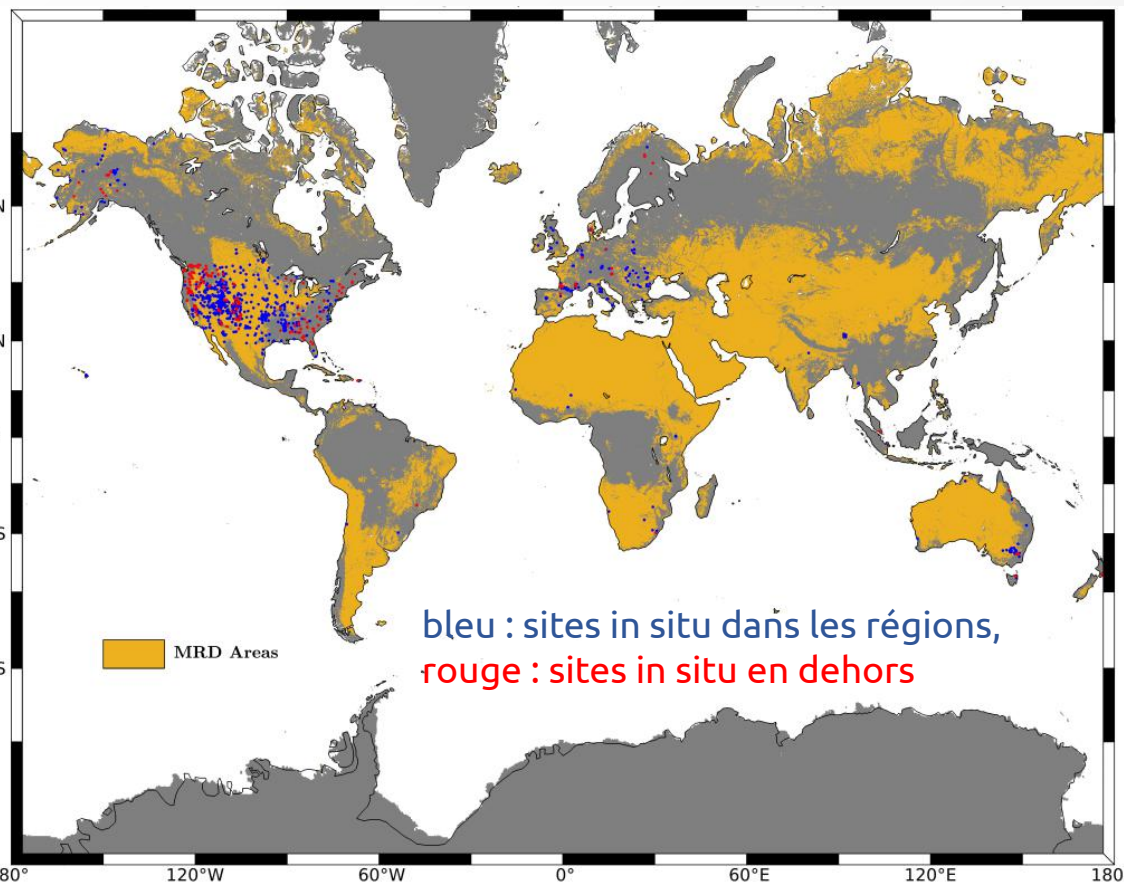
## Etalonnage et Validation

- SMOS
- Référence : Sonde
- Méthodologie

Régions et conditions pour lesquelles l'incertitude de SMOS est attendue à 0.04 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

- Surface observée homogène
- Contenu en eau de la végétation < 5 kg/m<sup>2</sup>\*

\* ~blé en développement



Coefficient de corrélation et unbiased RMSE des données SMOS SM vs in-situ



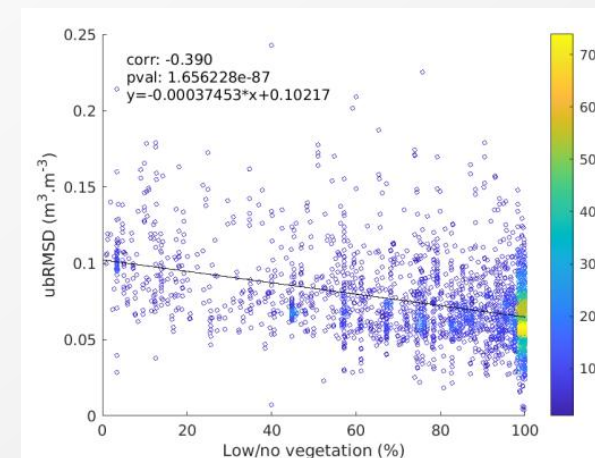
## Etalonnage et Validation

- SMOS
- Référence : Sonde
- Méthodologie

Performance de SMOS à chaque site fct des conditions de surface

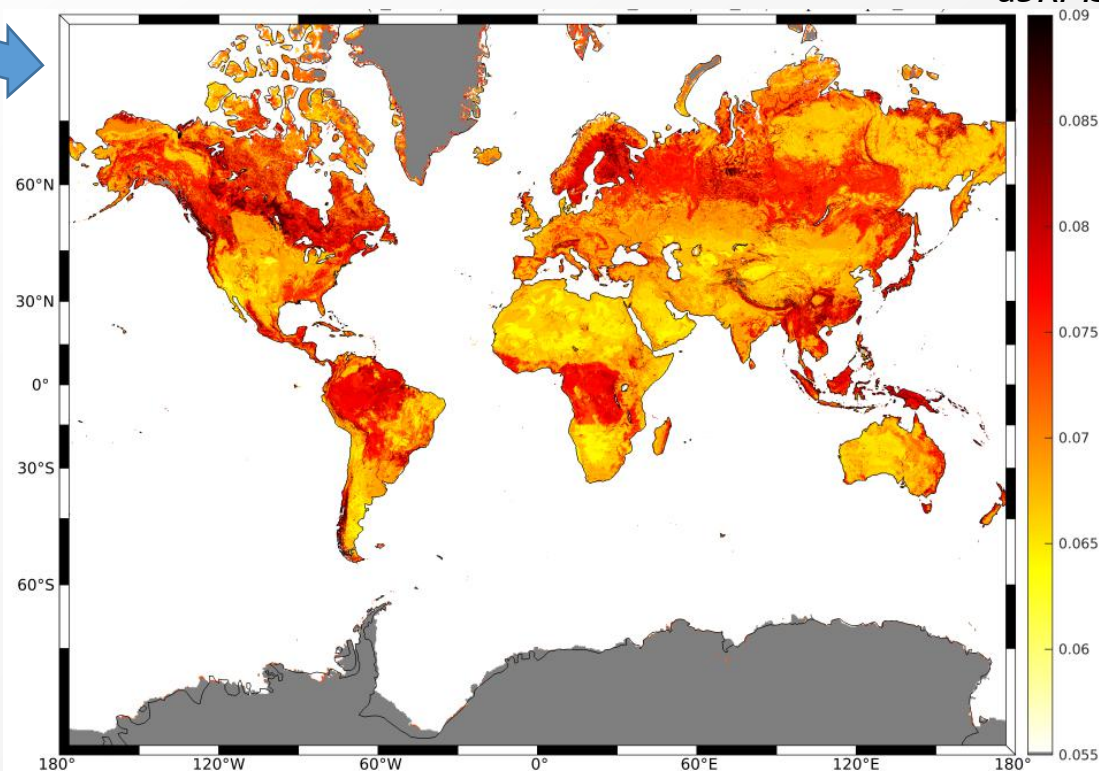
- Argile/Sable
- Densité du sol
- Fraction de forêt

Exple :  $ubRMSD$  à tous les sites in situ, en fct de la fraction de végétation basse



$ubRMSD$

1ere estimations de l'incertitude des SM SMOS à l'échelle globale



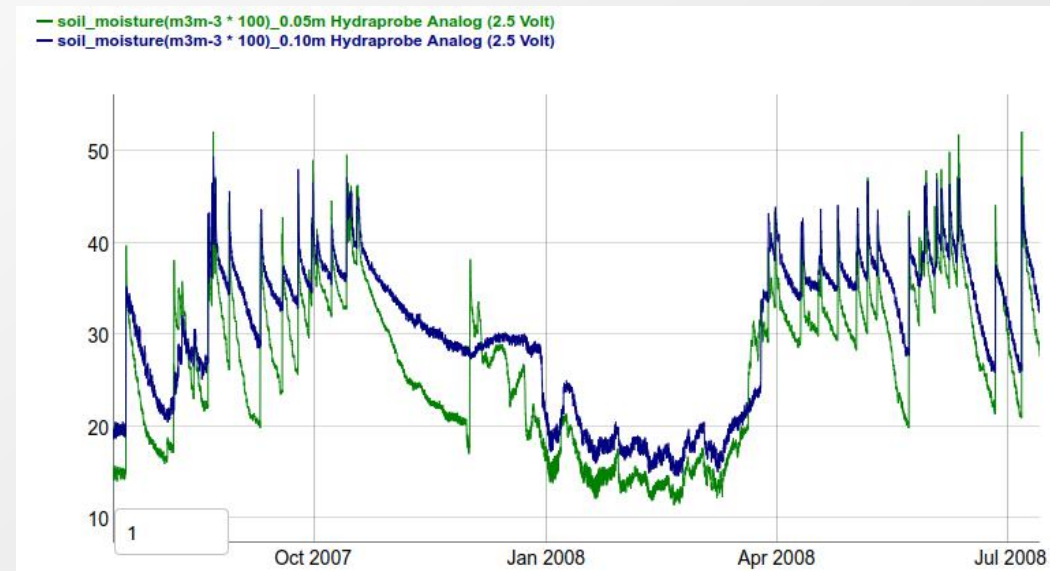
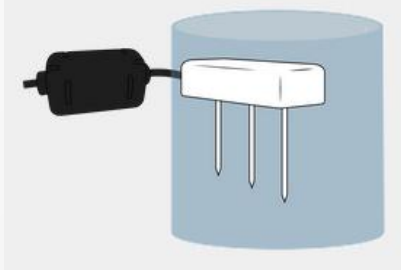
## Etalonnage et Validation

- a. SMOS
- b. Référence : Sonde
- c. Méthodologie

- Installation : lieu (au milieu du champ vs sur les bords), position (horizontale vs vertic.)
- Incertitudes de mesure
- Technologie utilisée : TDR, capacitive, neutron ...
- Calibration



Volume sondé par la sonde terros 12



*ex : SM à 5 cm et 10 cm*

*⇒ différences importantes entre les couches du sol*

## Etalonnage et Validation

- a. SMOS
- b. Référence : Sonde
- c. Méthodologie

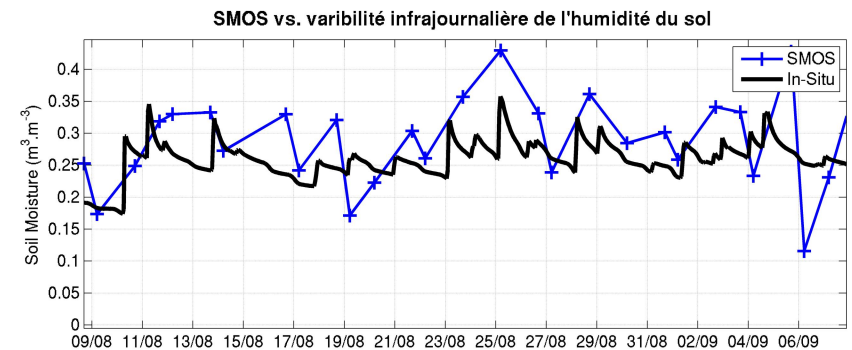
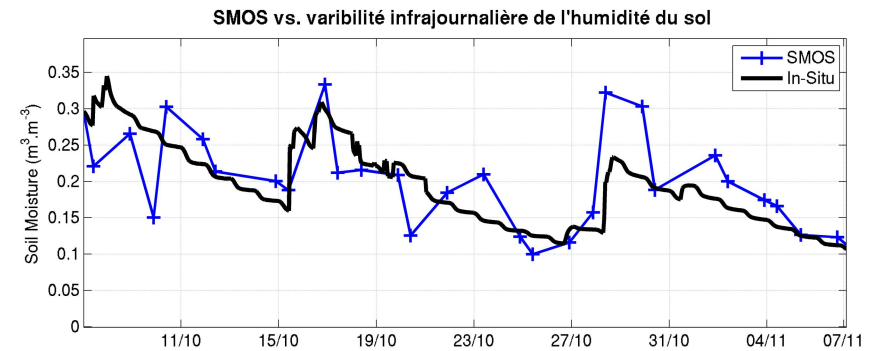
- Représentativité des sites in-situ
- Thèse de B. Molero (Y. Kerr, D. Leroux, P. Richaume)
- Projet FRM4SM
- Problèmes d'échelles :
  - Echantillonnage temporel
  - Spatiale

## Etalonnage et Validation

- a. SMOS
- b. Référence : Sonde
- c. Méthodologie

## Problèmes d'échelles :

- Echantillonnage temporel
  - In situ : ts les 15mn, heures...
  - SMOS : ts les 3/4 jours
- Spatiale





## Etalonnage et Validation

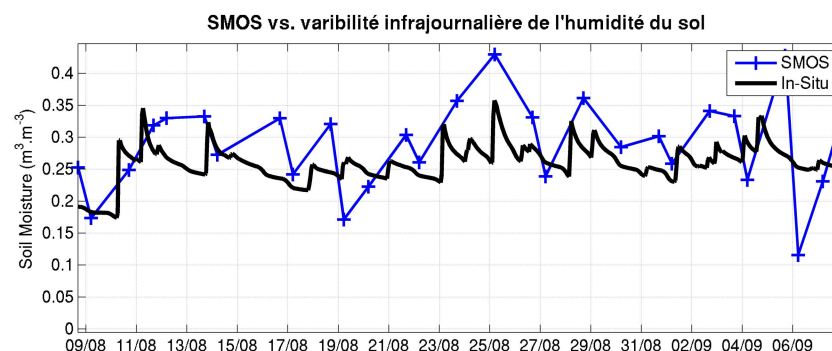
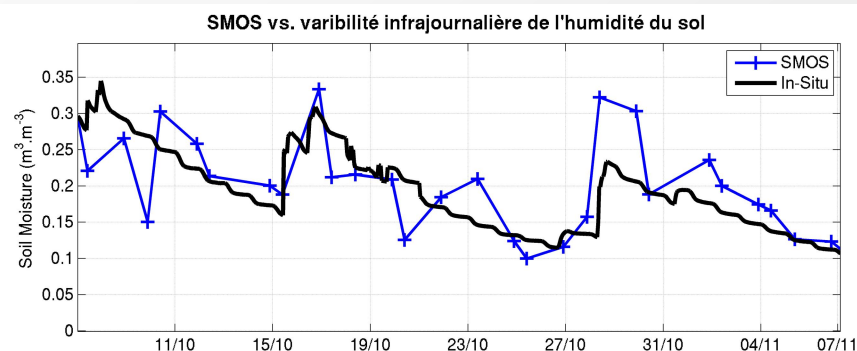
- SMOS
- Référence : Sonde
- Méthodologie

## Problèmes d'échelles :

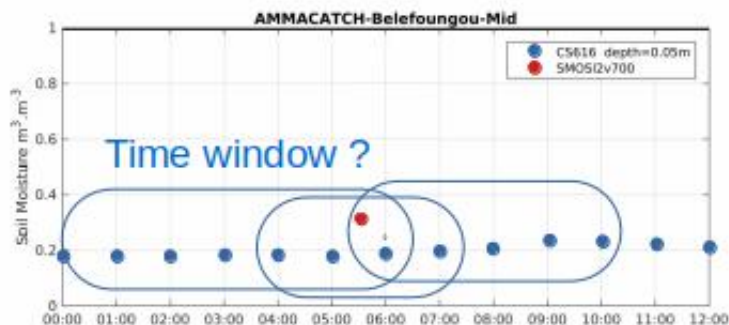
- Echantillonnage temporel
  - In situ : ts les 15mn, heures...
  - SMOS : ts les 3/4 jours
- Spatiale

? Echelle du signal commun ?

## SMOS capte les évènements : pluie, assèchements



*fréq. des évènements > fréq. revisites de SMOS*

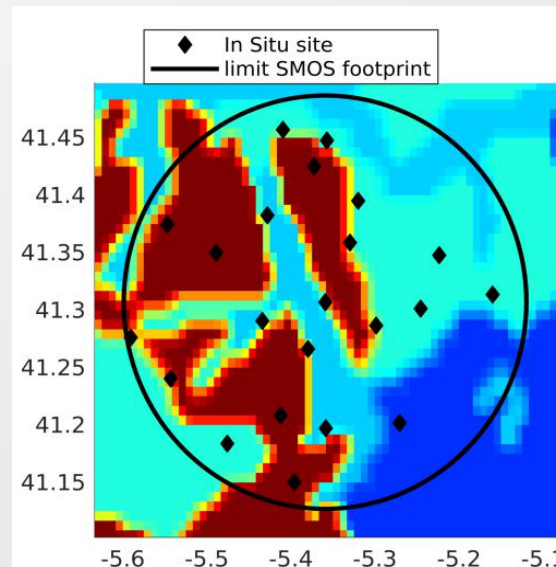
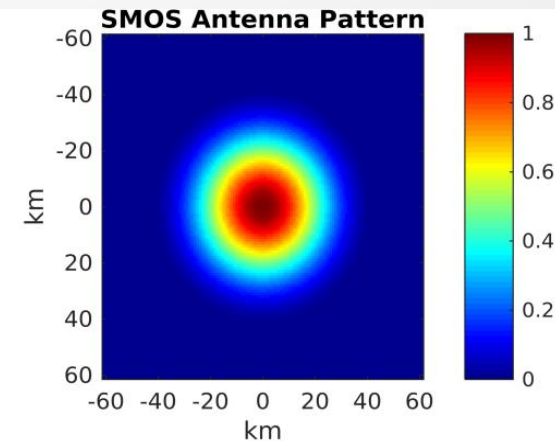
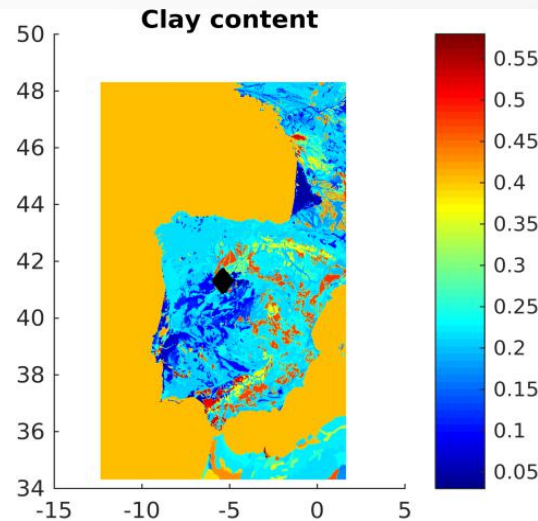


## Etalonnage et Validation

- a. SMOS
- b. Référence : Sonde
- c. Méthodologie

## Problèmes d'échelles :

- Echantillonnage temporel
  - In situ : ts les 15mn, heures...
  - SMOS : ts les 3/4 jours
- Spatiale
  - In situ : local qlq cm<sup>3</sup>
  - SMOS : diam. ~40km



## Etalonnage et Validation

- SMOS
- Référence : Sonde
- Méthodologie

## Problèmes d'échelles :

### - Echantillonnage temporel

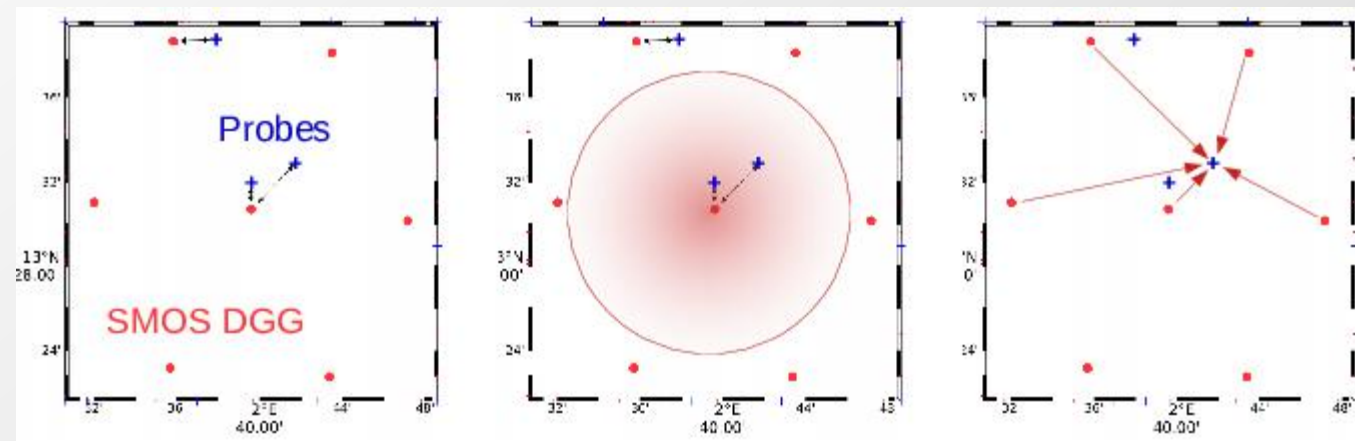
- In situ : ts les 15mn, heures...
- SMOS : ts les 3/4 jours

### - Spatiale

- In situ : local qlq cm<sup>3</sup>
- SMOS : diam. ~40km

## Stratégie ?

- Plus proche voisin
  - Conditions locales ~ conditions vues par SMOS
- critères d'homogénéité - hétérogénéité spatiales**
- Moyenne de plusieurs noeuds SMOS ?



## Etalonnage et Validation pour une mission spatiale

- Classer les sites utiles pour la validation des différentes missions satellite
- Améliorer les algorithmes

focus dans les régions où les performances sont moins bonnes

⇒ En cours :

Travailler sur l'aspect multi-temporel de l'inversion

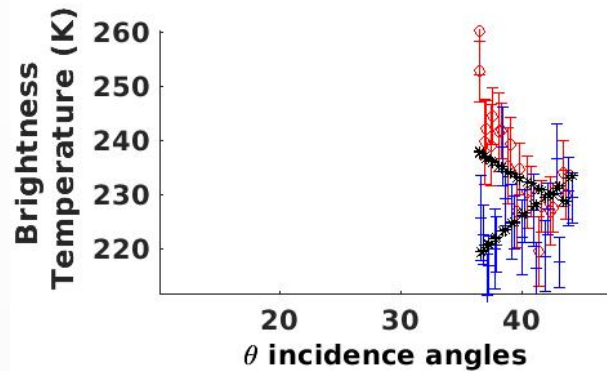
Utilisation des passages orbitaux précédents



## Evolution des algorithmes : prise en compte des passages précédents

Jour 24-09-2019

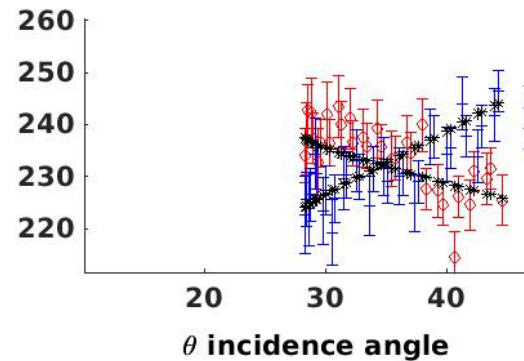
Distance sous trace = 486 km  
40 températures de brillance



**SM = 0.235** ← 0.2  
**Tau = 0.138** ← 0.4

Jour 25-09-2019

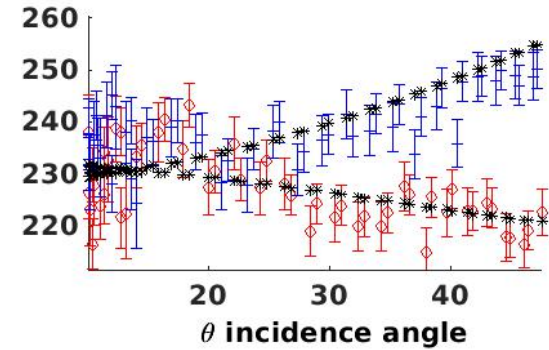
Distance sous trace = 364 km  
65 températures de brillance



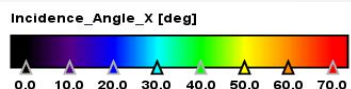
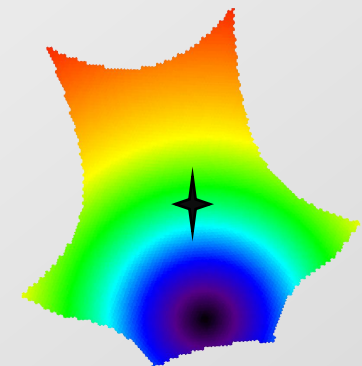
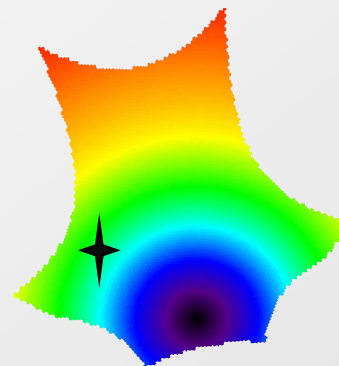
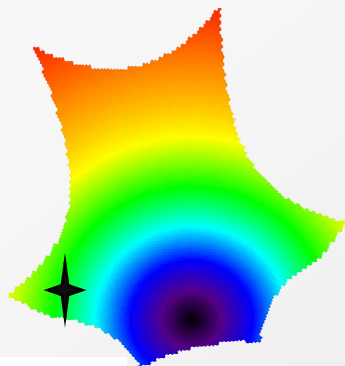
**SM = 0.230** ← 0.2  
**Tau = 0.175** ← 0.4

Jour 27-09-2019

Distance sous trace = 122 km  
103 températures de brillance



**SM = 0.220** ← 0.2  
**Tau = 0.193** ← 0.4

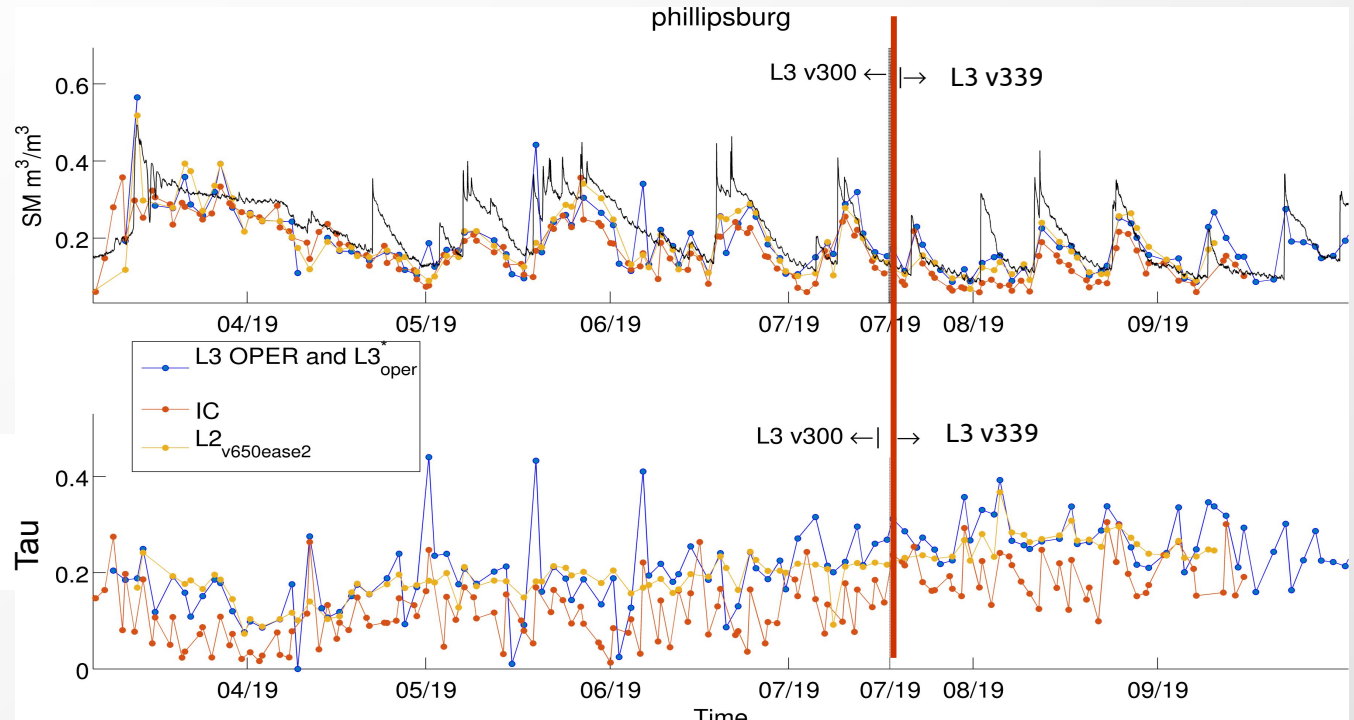
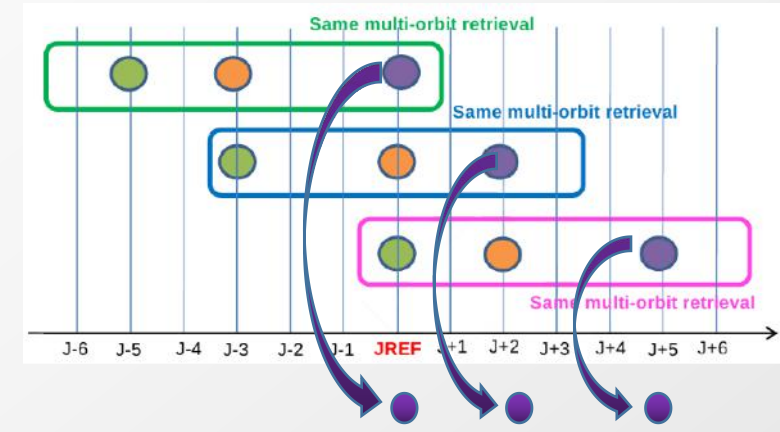


## Evolution des algorithmes : prise en compte des passages précédents

3 inversions en même temps

- Fenêtre temporelle de 7 jours
- Hypothèse : Tau doit peu varier sur 7 jours  
~ végétation évolue peu
- Contrainte sur 3 Tau consécutifs
  - *Version 300 : Corrélation temporelle*
  - *Version 339 : Contrainte sur l'écart type*

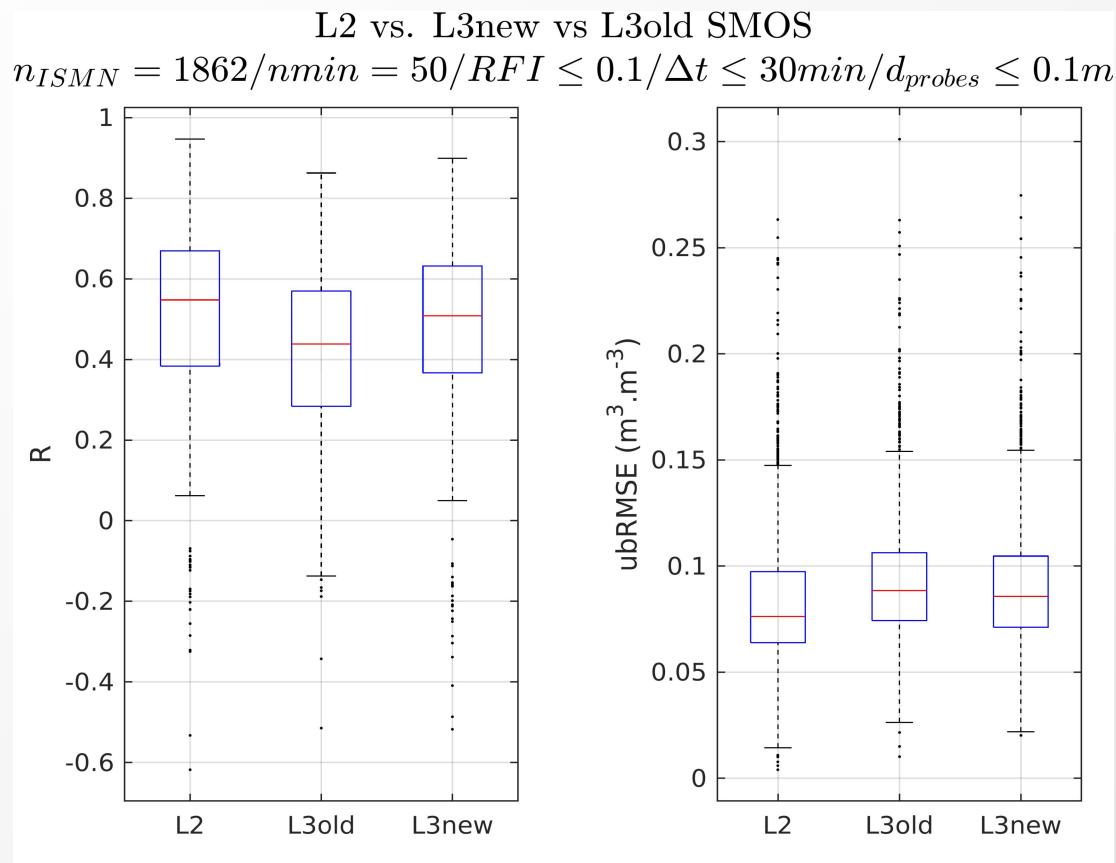
Al Bitar et al. 2017  
ATBD Niveau 3



Mialon et al. in prep 2023

Performances algorithme multi-orbites < algorithme classique

- Idée est intéressante mais les performances pas au niveau attendu
- Mieux définir le Tau sur les 7 jours
- Tau est devenu une variable importante de la mission SMOS



⇒ Travaux 2023

## Résumé travaux SM

- Validation des données

Participations et organisations de campagnes de mesures

- Meilleures compréhensions des différences entre les données : satellites vs in-situ
  - Echelles spatiales
  - Echantillonnage temporelle
- Algorithme : travaux sur le multi-orbite  $\Rightarrow$  meilleure définition du Tau

## Stages

*Mathilde Barrée 2020*

*Clovis Farley 2019*

*Romain Berthelot 2018*

*Renan Toullec 2016*

*François Gibon 2014*

*Clément Duffour 2012*

*Antoine JeanJean 2011*

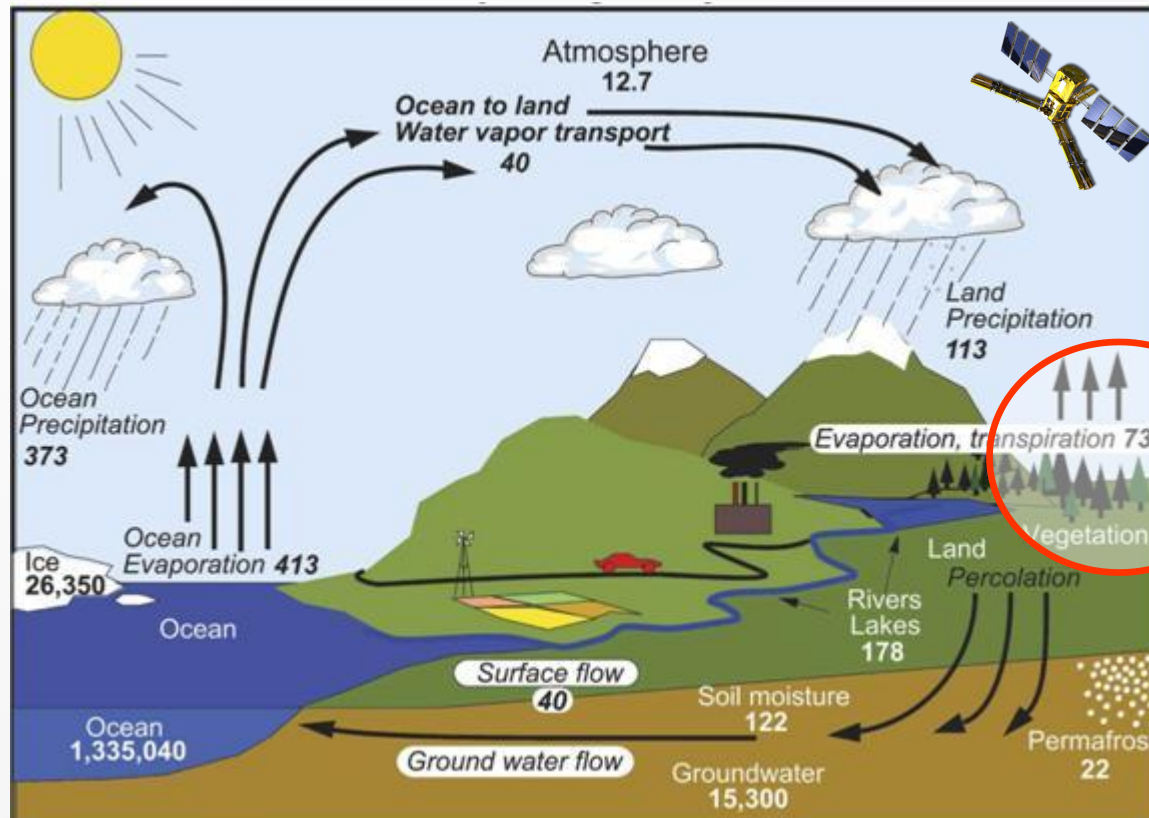
Post-doc F.Gibon

P. Richaume (Cesbio)

Projet ESA FRM4SM (*Fudicial References For Soil Moisture*)



## le cycle de l'eau et les observations des données SMOS



Biomasse

...et VOD

Copyright 2007 American Meteorological Society (AMS)

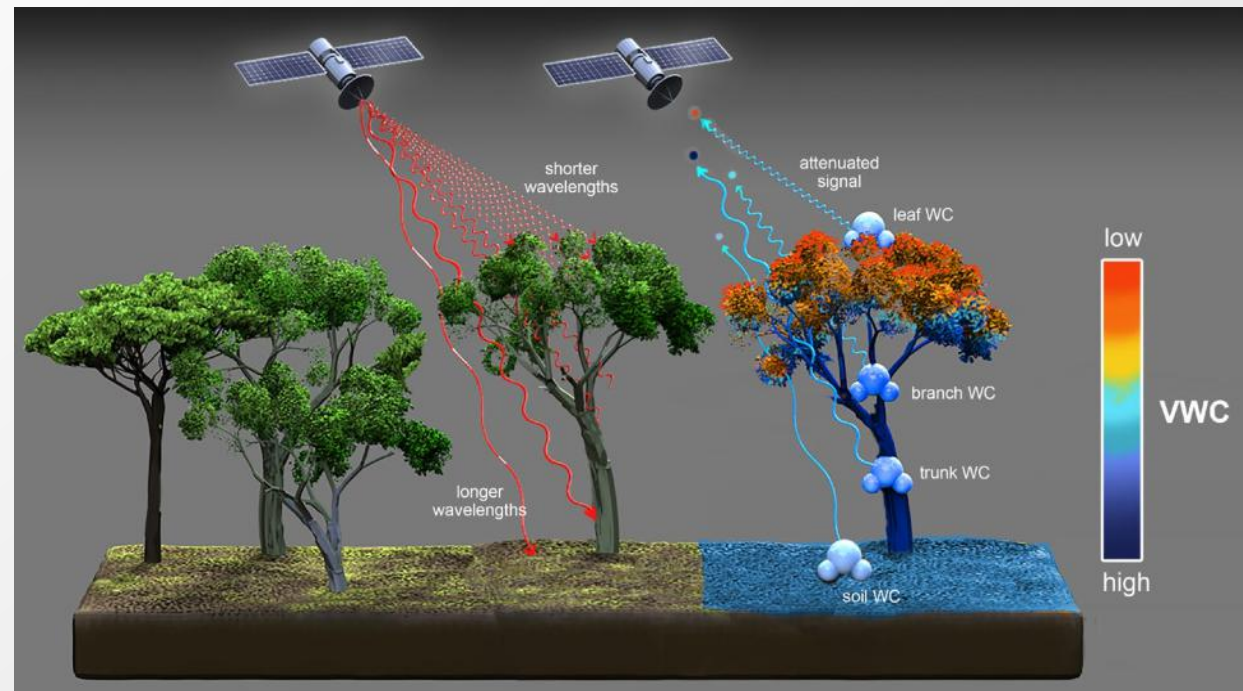
Pourquoi s'intéresser au Tau (Vegetation Optical Depth) et à la végétation

Cartes de biomasse sont annuelles (radar, optique)

⇒ versus la répétitivité de SMOS

Bande L est sensible à l'eau, *Konings et al.*

⇒ information sur le contenu en eau de la végétation



*Konings et al. 2021*

Définition du VOD : la couche de végétation est représentée par le modèle Tau-Omega

$$T_{B,tot}(P, \theta) = e_s T_s \gamma + (1 - \omega) (1 - \gamma) T_v + (1 - \omega) (1 - \gamma) T_v (1 - e_s) \gamma + T_{B,sky} \gamma^2 (1 - e_s)$$

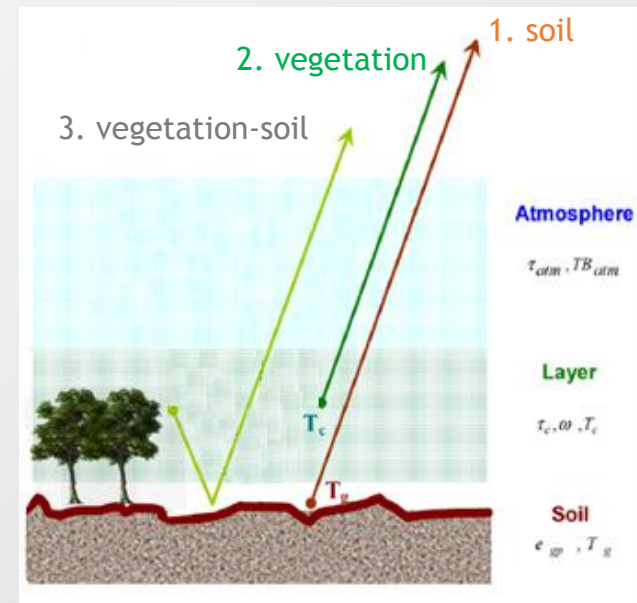
1. soil

2. vegetation

3. vegetation-soil

4. sky

- $e_s$  soil emissivity; linked to soil moisture through dielectric constant
- $T_s$  physical temperature of soil
- $T_v$  physical temperature of vegetation
- $\omega$  **single scattering albedo of vegetation (omega)**
- $\gamma$  **canopy transmissivity; linked to vegetation optical depth  $\tau$  (tau)**
- $T_{Bsky}$  sky brightness temperature
  
- $P$  polarisation (H or V)
- $\theta$  incidence angle

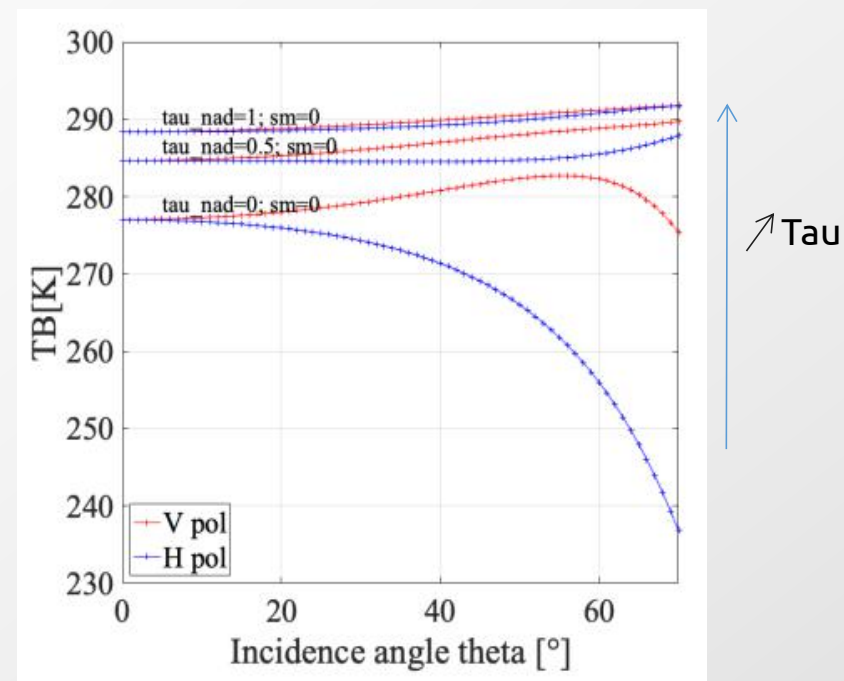


Définition du VOD : Vegetation Optical Depth au nadir,  $\tau$ , tau  $\gamma = e^{\frac{-\tau}{\cos\theta}}$

- Grandeur radiative
- Difficile à mesurer in situ

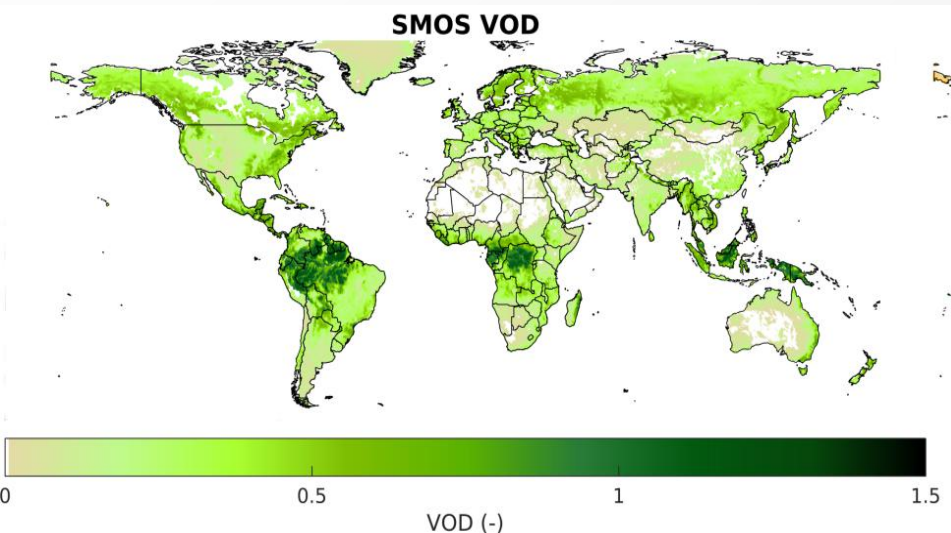


<b>X band</b>	<b>L band</b>	<b>P band</b>	<b>VHF</b>
=	=	=	>
<b>3 cm</b>	<b>21 cm</b>	<b>70 cm</b>	<b>3 m</b>

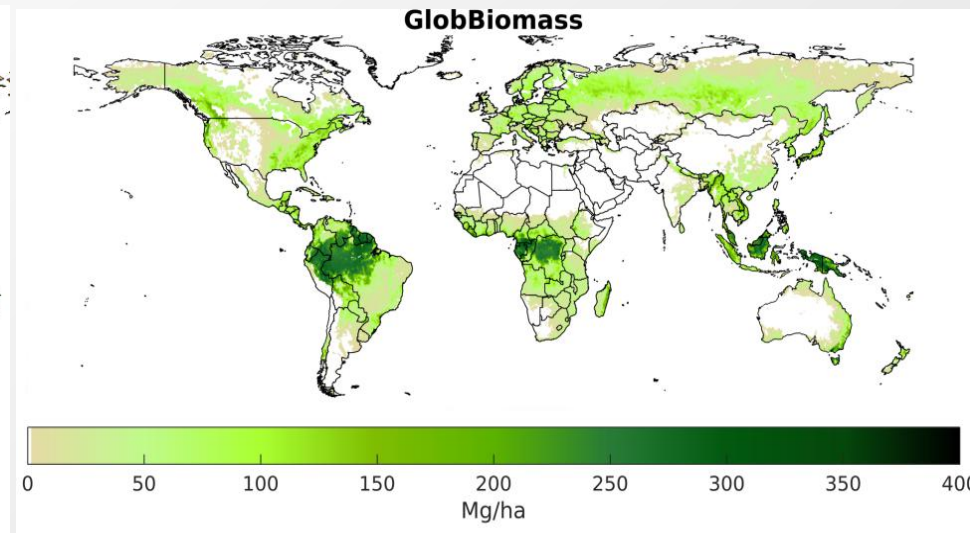


## VOD - Lien avec la biomasse AGB (Above Ground Biomass)

- Lien entre les micro-ondes passives (X, C bands) et la biomasse Above Ground Biomass (*Liu et al. 2015*)
- L-band VOD relié à la hauteur des arbres (*Rahmoune et al. 2014 ; Vittucci et al.*)
- ESA «SMOS+Veg» *Rodriguez-Fernandez et al. 2018, Mialon et al. 2020*



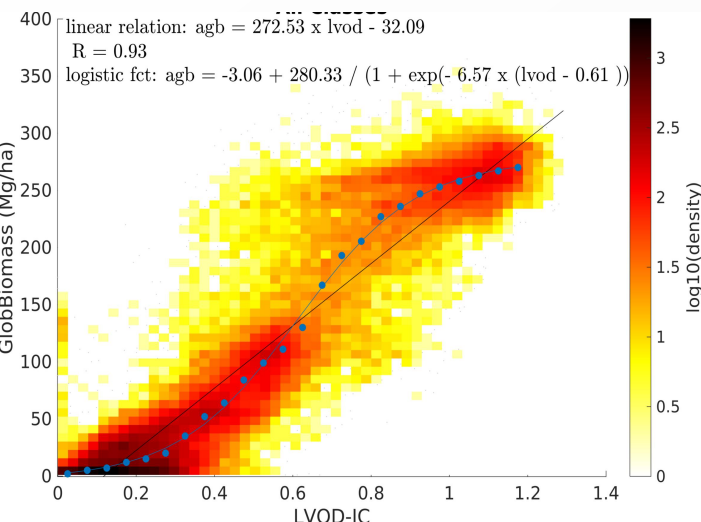
Moyenne annuelle de VOD pour 2011



Carte de Biomasse AGB GlobBiomass

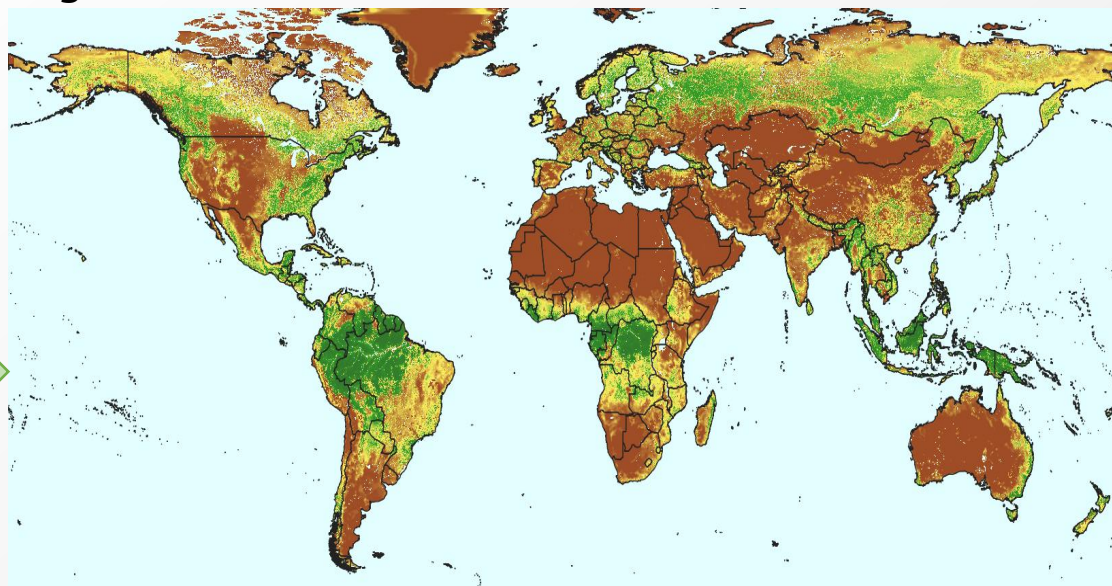


## Relations SMOS et cartes d'AGB à l'échelle globale



SMOS VOD vs GlobBiomasse (bas)

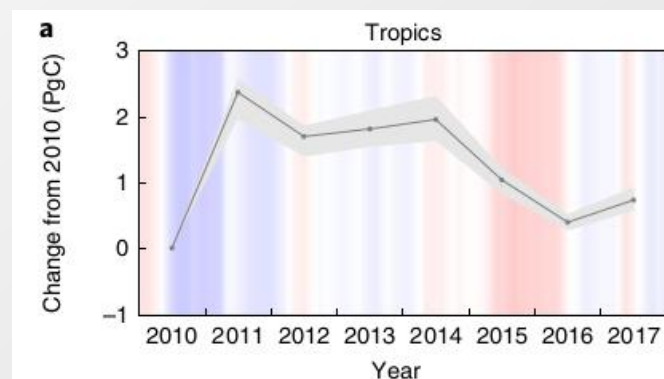
Mialon et al. 2020



carte d'AGB estimée à partir du VOD SMOS, travaux de E. Bousquet

- Répétitivité temporelle de SMOS  
 ⇒ Evolution de la biomasse et du stock de Carbone :

Fan et al.  
2019



- Estimation de la biomasse au CATDS
  - Fct de la carte de référence de biomasse, en préparation (Boitard et al. in preparation)
- Mais la bande L sensible à la quantité d'eau dans la végétation



## 10 YEARS OF SMOS PASSIVE MICROWAVE VEGETATION OPACITY STUDY

- CESBIO
- EMMAH (INRAE)
- globEO
- WSL
- Magellium
- Projet ESA de 2 ans : Juin 2022 - Mai 2024

<https://osmose.magellium.com/>

**Paper about fires and satellite observations, including SMOS VOD**

There is an increasing interest to use passive microwave vegetation optical depth (VOD) to study the vegetation and its evolution, which led to the start of this OSMOSE project. A ...

**Presentations during the next IGARSS 2022 conference**

Some of our activities will be presented during the upcoming IGARSS conference late July. Julio-Cesar Salazar-Neira is presenting the work of his Ph.D. entitled «ABOVE GROUND BIOMASS ESTIMATION FROM PASSIVE ...

**Nemesio Rodriguez-Fernandez is presenting the ESA Land Carbon Constellation project**

« PAVING THE ROAD TO FLEX AND BIOMASS: THE LAND SURFACE CARBON CONSTELLATION STUDY. More details on the talk: [https://igarss2022.org/view\\_paper.php?PaperNum=4107](https://igarss2022.org/view_paper.php?PaperNum=4107)

**10 years of SMOS – Passive Microwave Vegetation Opacity Study**

The overall objective of this project is to create two consistent data cubes containing long, consistent, times series of vegetation variables estimated with microwaves and visible observations. The microwave Vegetation Optical Depth (VOD) will be derived from at frequencies from 1.4GHz to 37 GHz. Vegetation variables such as the Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation or Leaf Chlorophyll Content will be derived from visible wavelengths. The VOD and visible data will be used to explore a number of applications, in particular to estimate the Above Ground Biomass (AGB). An alternative method using machine learning approaches to estimate AGB directly from the brightness temperatures measured at microwave wavelengths, without estimating VOD, will also be studied.



## Objectifs et questions scientifiques

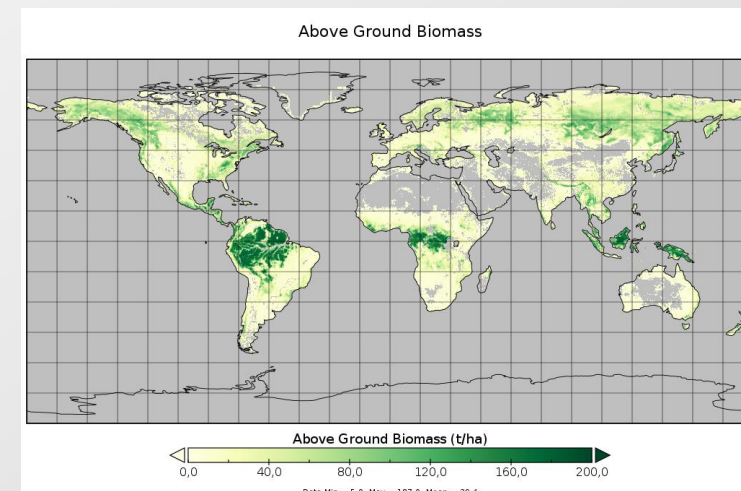
Créer des jeux de données sur 20 ans

- Indices optiques : LAI, FAPAR, FCOVER, NDVI, PAR
- Micro-ondes
  - VOD en bande L, C, X, Ku
  - Estimations d'AGB
    - à partir des TB et des réseaux de neurones  $\Rightarrow$  Thèse de C. Salazar
    - à partir des VOD



Questions abordées :

- Travail sur la modélisation de la végétation en micro-ondes :
  - Améliorer le modèle
  - $VOD(\lambda)$  et  $\omega(\lambda)$
  - Utilisation du modèle de transfert radiatif «Two Stream»
- Meilleure compréhension du VOD en bande L  
Quelle temporalité pour la biomasse?
- Complémentarité entre les indices de végétation  
Analyse de séries temporelles pour la végétation



## Complémentarité entre les indices de végétation :

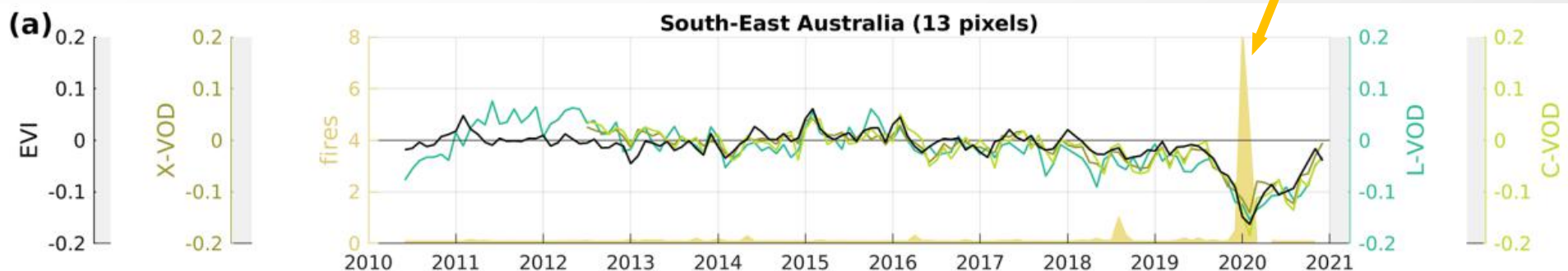
⇒ Suivi des feux, comment la végétation évolue après ces événements extrêmes

*Bousquet et al. 2022*

- Australia : Végétation sèche

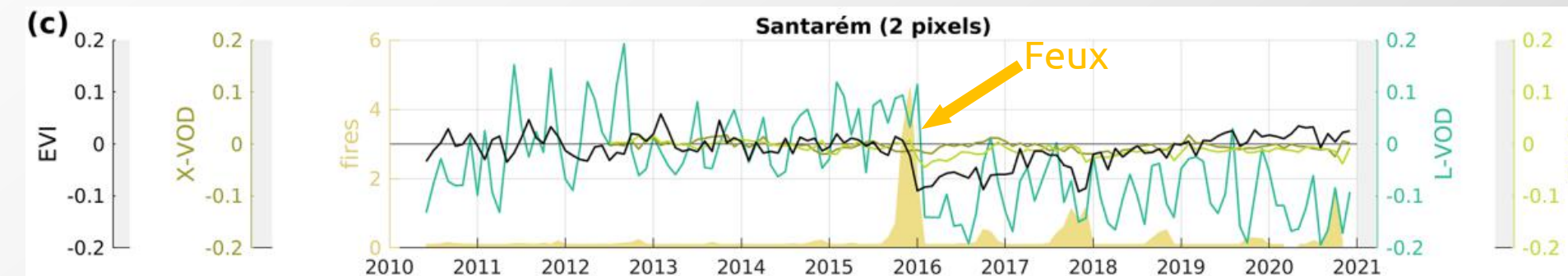


EVI, VOD : même évolution



- Amazonia : Forêt humide

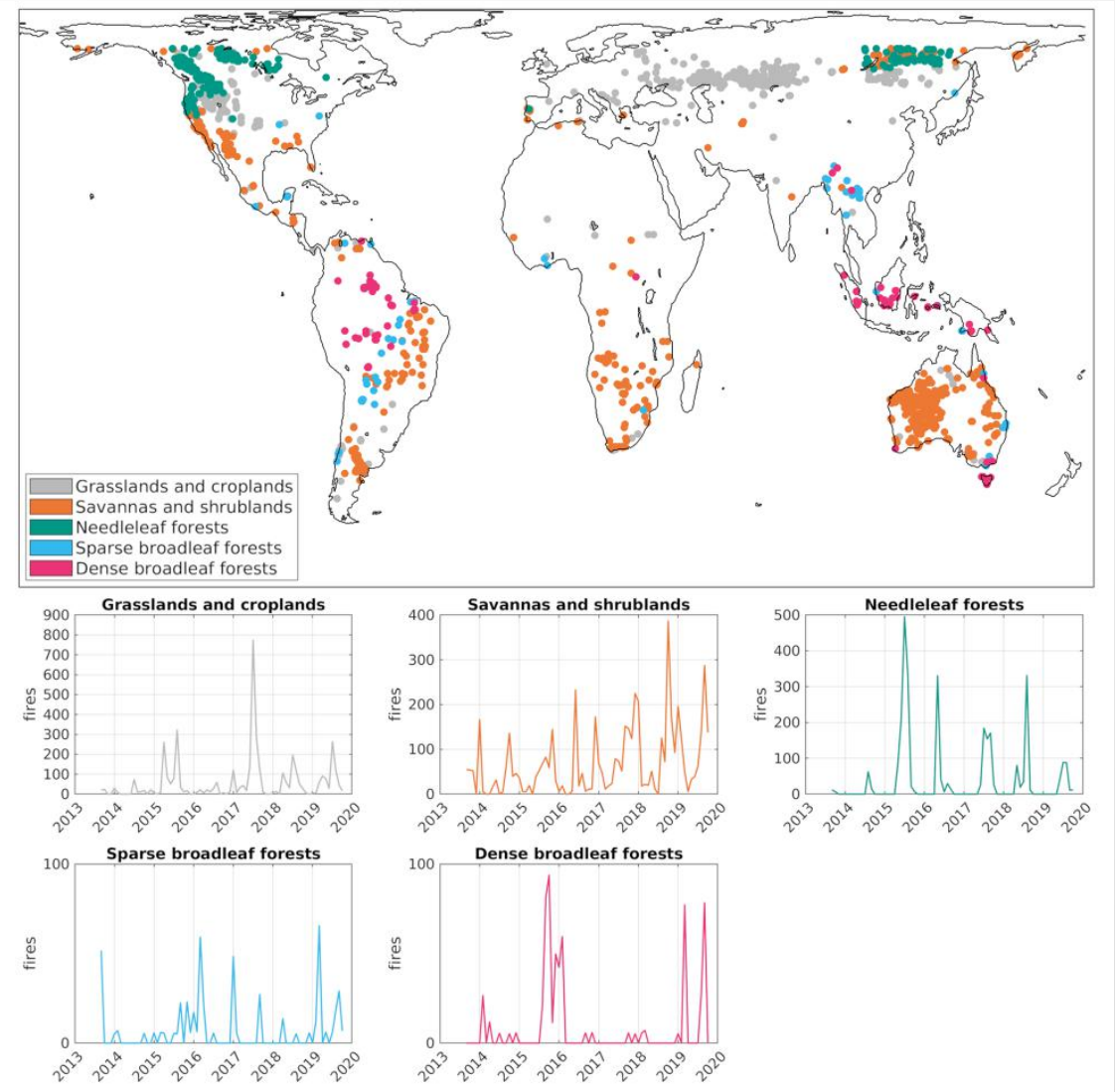
Post feux : anomalie négative des VOD SMOS





## Complémentarité entre les indices de végétation :

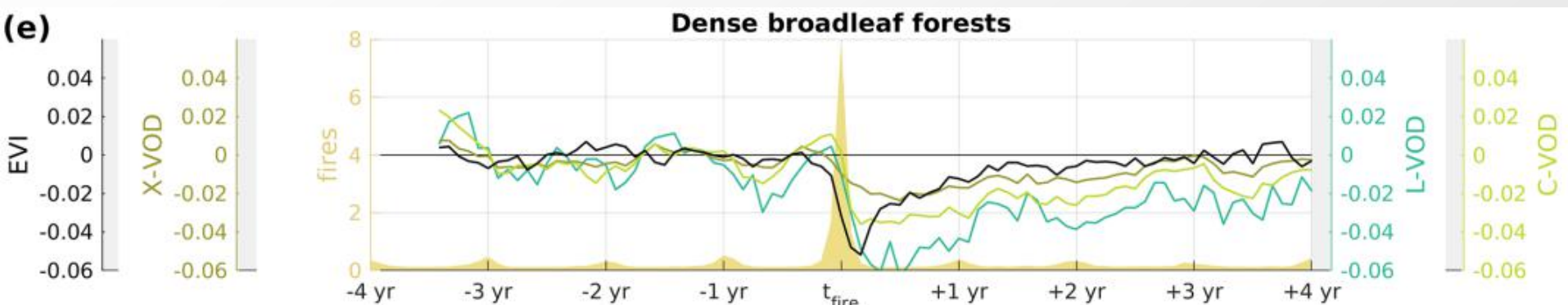
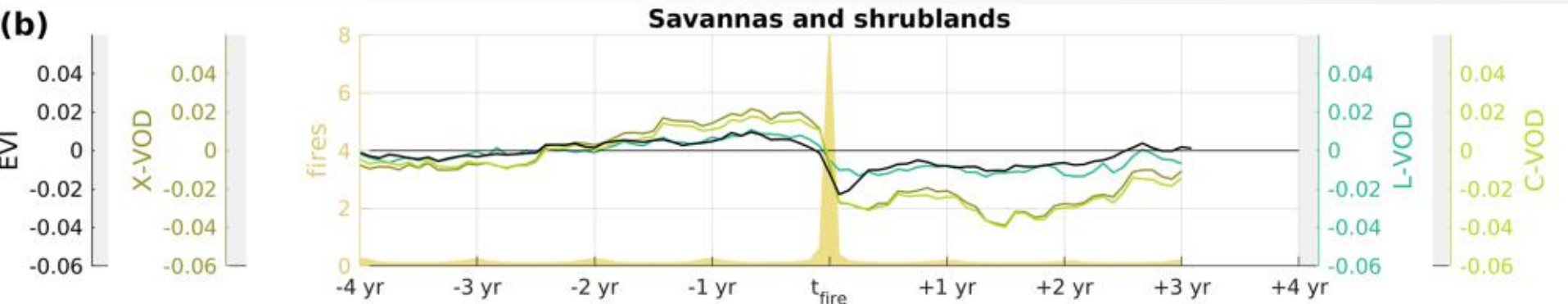
⇒ Suivi des feux, comment la végétation évolue après ces événements extrêmes





## Complémentarité entre les indices de végétation :

⇒ Suivi des feux, comment la végétation évolue après ces événements extrêmes



Pre fire:  
Decrease in water  
(precip, SM, TWS)

Fire  
Increase of  $T^\circ$   
Decrease in EVI

Post Fire  
Dense forest: L VOD still low for  
more than 2 years

## Travaux sur le VOD

- Estimation de la biomasse : données au CATDS début 2023
- VOD dépend de la quantité d'eau dans la végétation (*Konings et al. 2021*)  
Comment discerner la biomasse (AGB) du contenu en eau de la végétation ?  
Données des campagnes de terrain «SMAPVEX» aux USA et «TropiRAD» en Guyane
- Complémentarité entre les fréquences et les indices optiques  
Quelle échelle temporelle peut-on considérer le VOD comme un proxy de la biomasse ?
- Travaux sur les feux :  
stage M2 d'Emilio Baud Fraile février 2023, sur les régions des hautes latitudes  
A. Mialon, M. Parrens (CESBIO), A. Roy (Université Trois Rivières)

*Rodriguez et al. 2018*  
*Mialon et al. 2020*  
*Bousquet et al. 2021*  
*Bousquet et al. 2022*  
*Pique et al. in prep*  
*Boitard et al. in prep*

## Collaborations

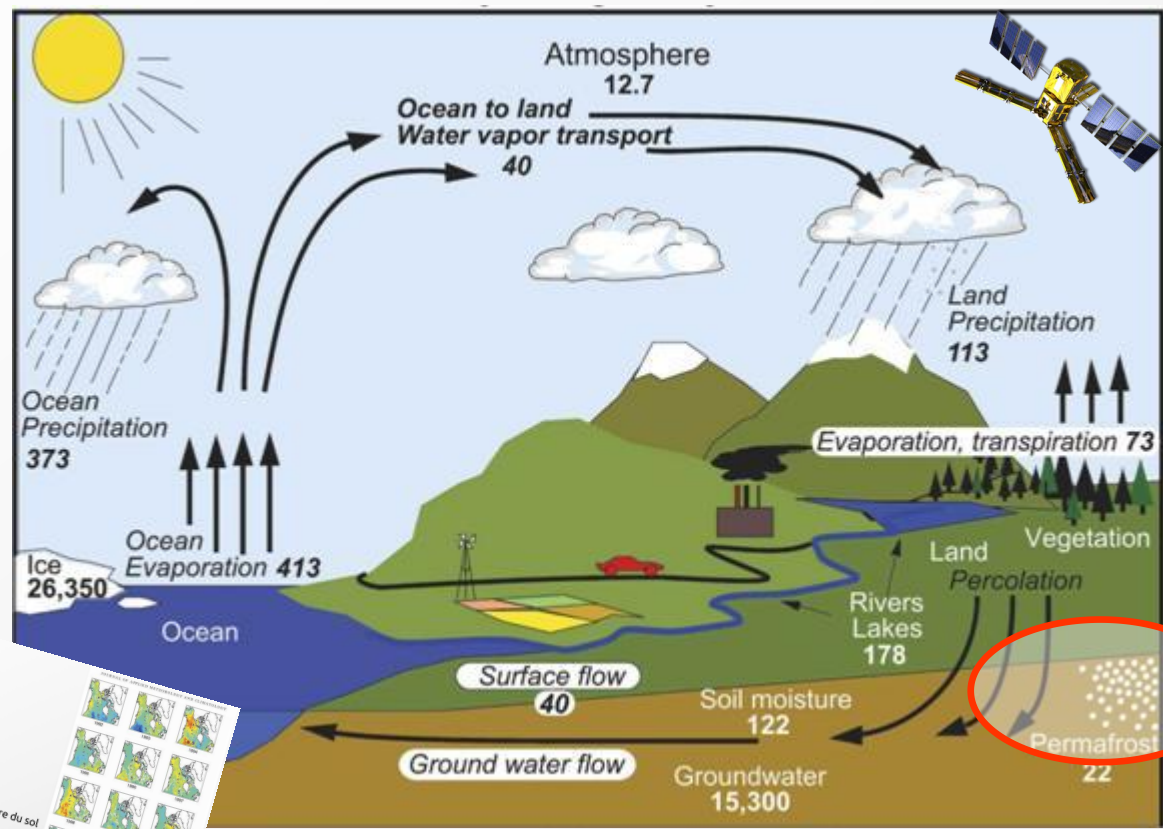
- Equipe «BIOMASS» du CESBIO

## Personnes encadrées :

*E. Bousquet (CDD)*  
*S. Boitard (CDD)*  
*C. Salazar (thèse)*

## le cycle de l'eau et les observations des données SMOS

figure © 2007 American Meteorological Society (AMS)



Région de pergélisol

Doctorat  
Climat  
Ph.D.  
Télé-détection  
Université Grenoble Alpes  
Institut de Recherche pour le Développement

2005

Estimation de la température du sol

Lien avec le pergélisol

Mialon et al. 2007, JAM

## Contexte :

- Riche en matière organique : 50% du carbone dans des sols continentaux
- Couvrent 16% de la surface terrestre Schuur et al., 2015, Tarnocai et al., 2009
- Source de Carbone : 1014 Pg de carbone émis (+ 194 à -175 Pg) Mishra et al., 2021

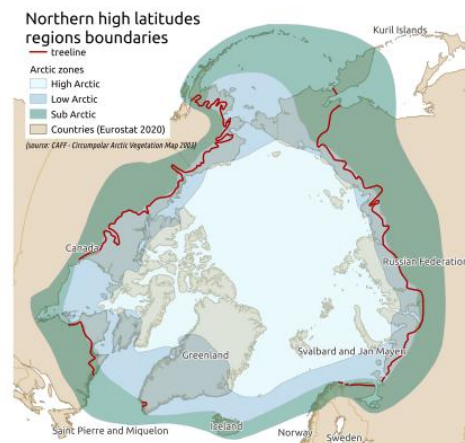
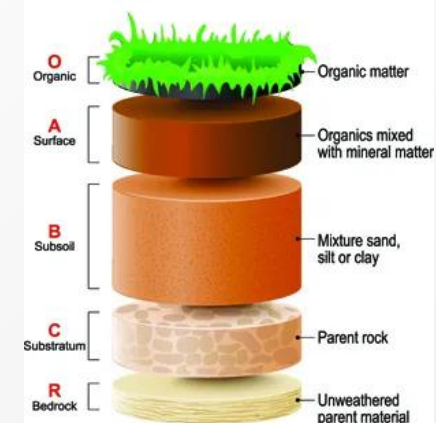


FIGURE 1 – Classification environnementale

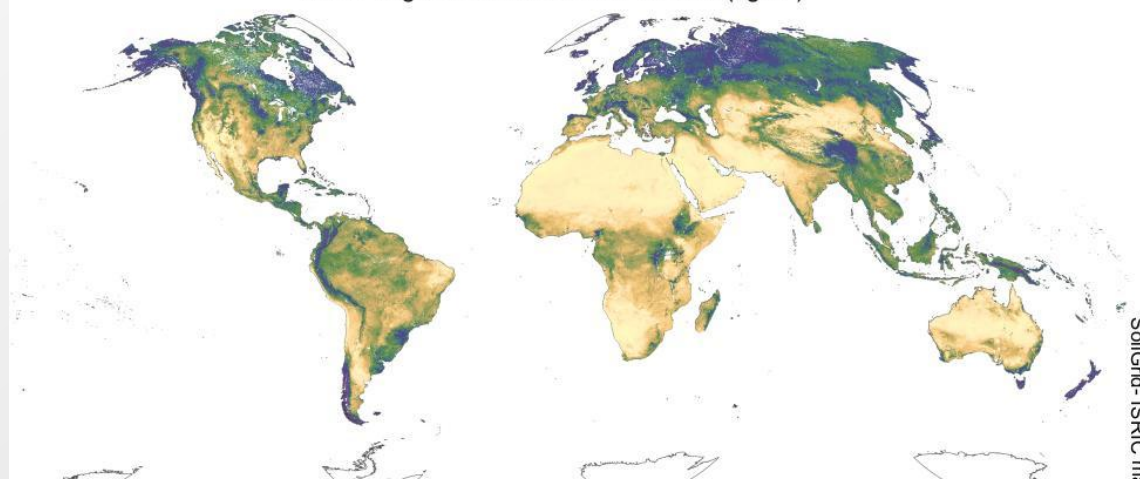


FIGURE 2 – Distribution de la région circumboréale (carte de Brandt (2013))

## SOIL LAYERS



## Mean Organic Carbon Stocks 0-30cm (kg/m<sup>2</sup>)

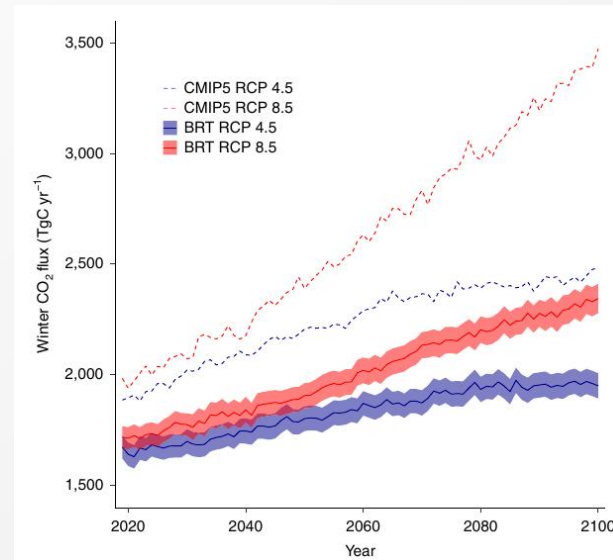
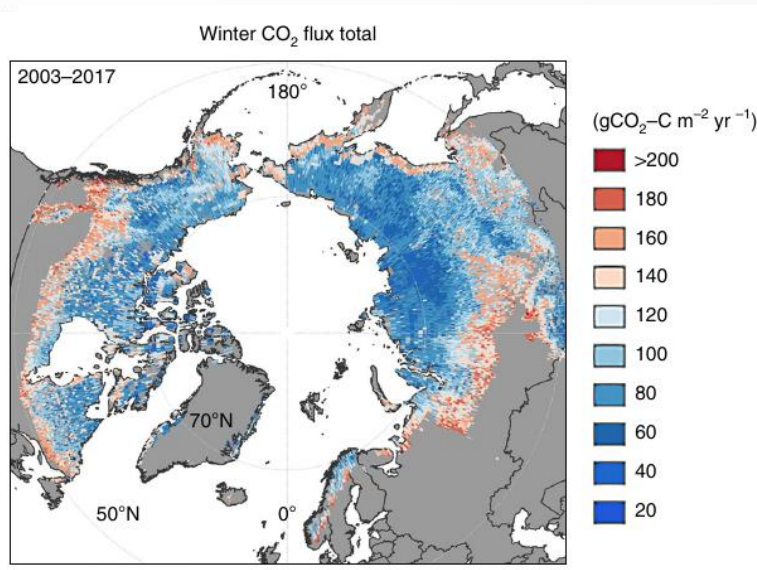




## Contexte et questions scientifiques

### Température du sol sous la neige

- Influence les flux d'émission de CO<sub>2</sub> en hiver.  
Emissions C en hiver pourraient compenser le C absorbé par la végétation au printemps



*Natali et al. 2019*

Average annual winter (October–April) CO<sub>2</sub> emissions estimated

- Influence le développement de la végétation arctique (*Niittynen et al. 2020, Schuur et al., 2008*)

### Nécessité de suivre la végétation

- On observe un verdissement de la végétation arctique et boréale, en lien avec la fonte du pergélisol *Peng et al. 2020*
- Végétations boréales sont reconnues pour être très fragiles = faible capacité à se rétablir et récupérer des évènements extrêmes, *Bolton et al. 2015*



## Contexte et questions scientifiques

3 points abordés avec SMOS pour suivre le sol et la végétation des hautes latitudes

1/ Qualité et étalonnage des données SMOS SM aux hautes latitudes

2/ Etat du pergélisol sous la neige en hiver

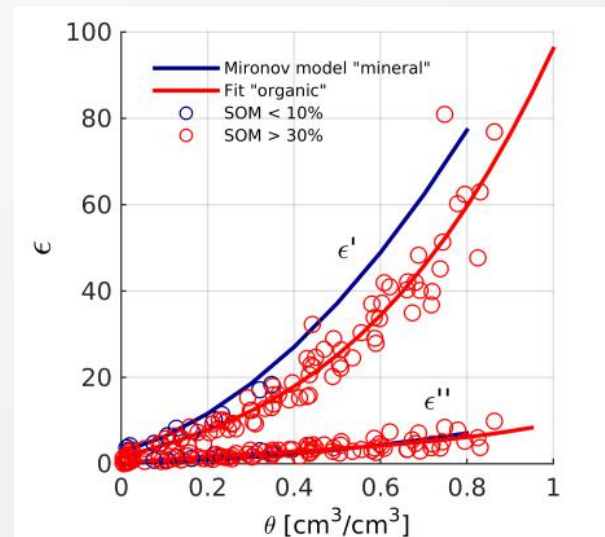
3/ VOD dans les forêts boréales et avec la présence de neige

## 1/ Qualité et étalonnage des données SMOS SM aux hautes latitudes

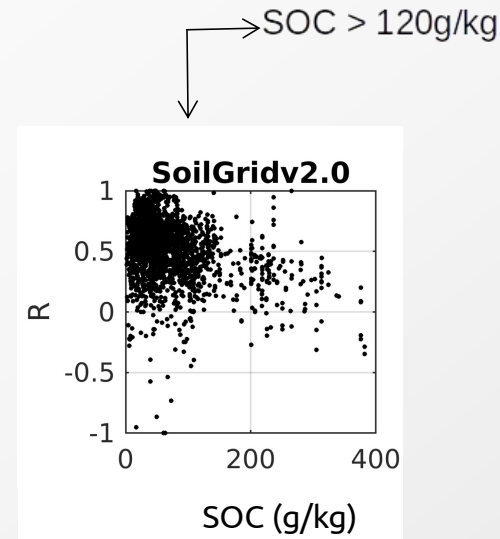
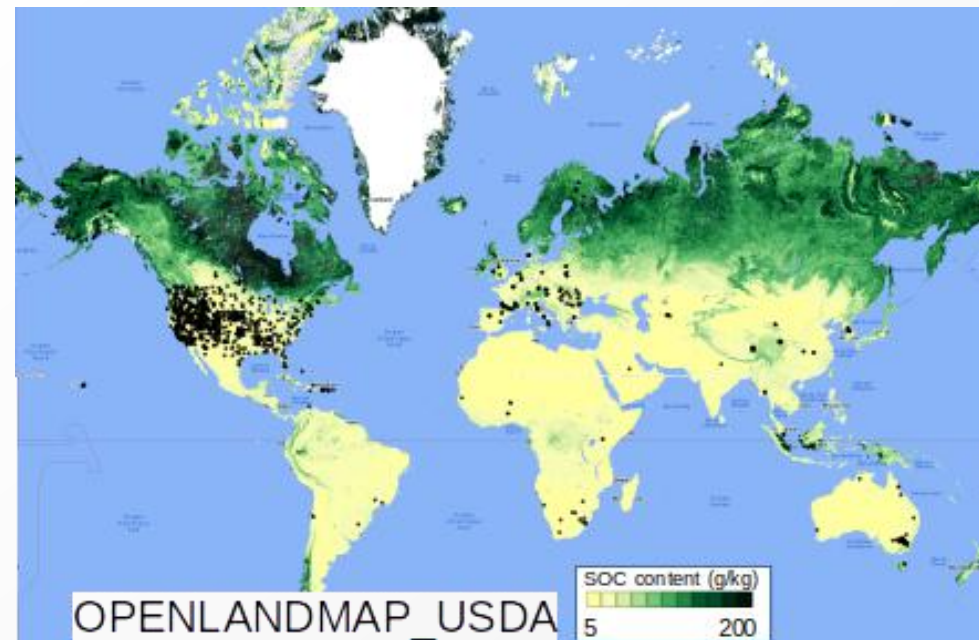
### Algorithme SMOS

- Modèle de constante diélectrique pour les sols organiques. *Bircher et al. 2016*
- Utilisation des modèles de cste diélectrique pour les sols minéraux et organiques

$$\text{fraction}_{\text{sol minéraux}} \times \varepsilon_{\text{mironov}} + \text{fraction}_{\text{sol organique}} \times \varepsilon_{\text{bircher}}$$



## 1/ Qualité et calibration des données SMOS SM aux hautes latitudes



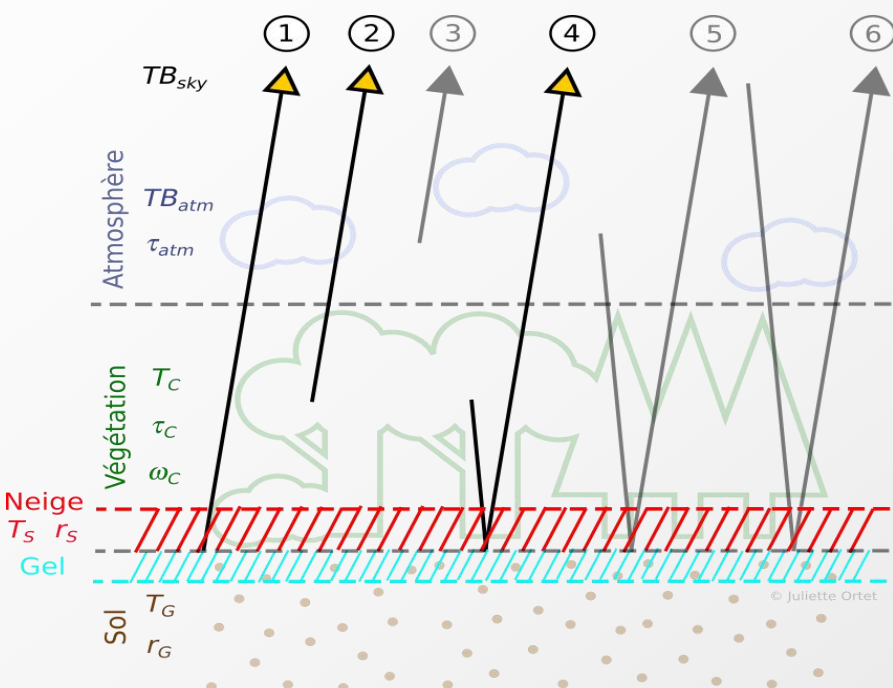
	ALL	SOC < 120 g/kg	SOC > 120 g/kg
R	0.60	0.62	0.41
ubRMSD	0.07	0.07	0.09

- Travaux en 2023 :  
Meilleure prise en compte des sols organiques dans les algorithmes SMOS  
Post doc F. Gibon

## 2/ Température sous la neige et lien avec le pergélisol

## Thèse J. Ortet

« Comment développer des approches de **télédétection micro-onde passive** afin de comprendre et quantifier les variations spatio-temporelles de la **Tsol** à l'année dans les **régions arctiques** ? »



Directeurs de thèse : Yann Kerr\*, Alexandre Roy

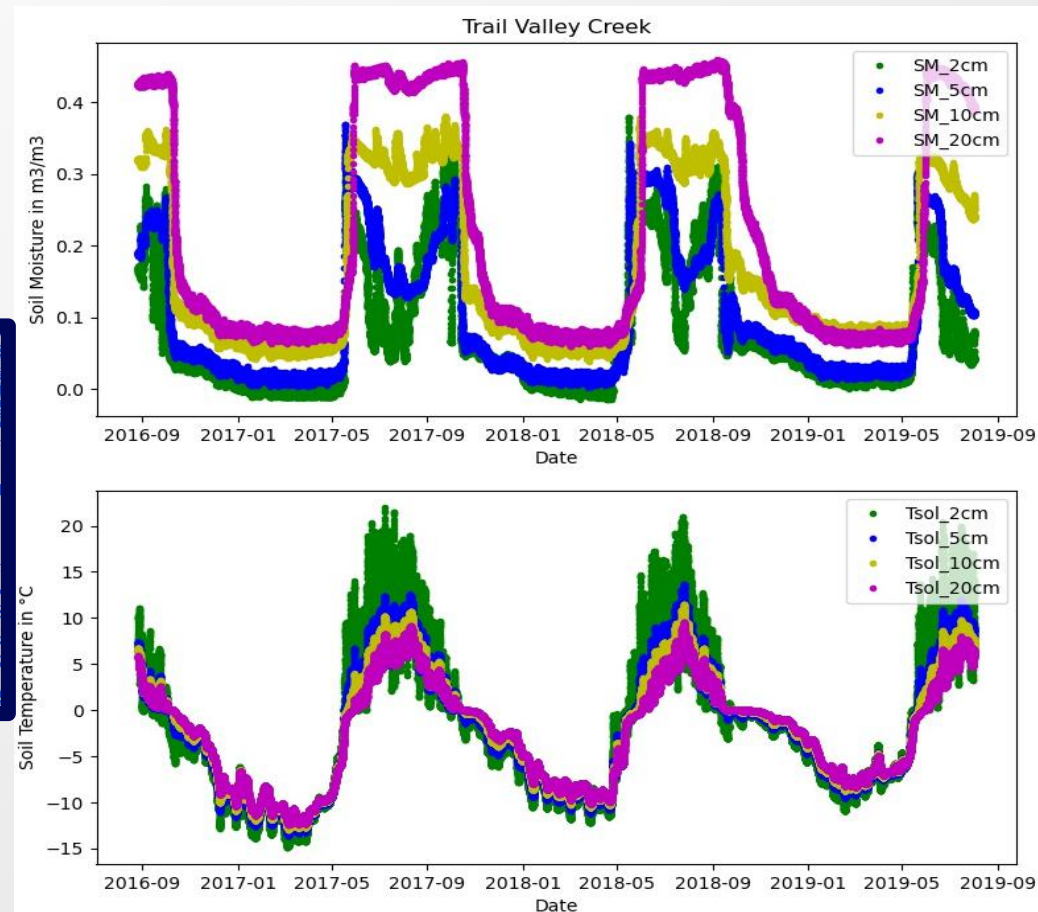
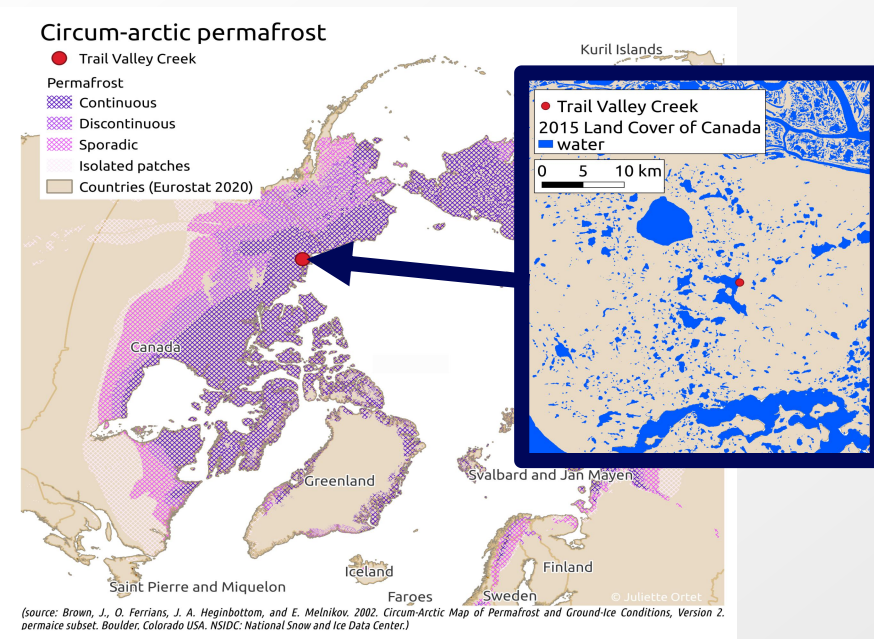
Participations : Arnaud Mialon\*, Alain Royer, Simone Bircher, Sylvain Mangiarotti, Mike Schwank, Christian Mätzler

Cotutelle : UQTR Univ. Trois Rivières à Québec  
Université de Toulouse

## 2/ Température sous la neige et lien avec le pergélisol

### Site d'étude : Trail Valley Creek, Territoires du Nord Ouest (Canada)

Données in-situ : **Boike, Julia, Cable, William L, Bornemann, Niko & Lange, Stephan. Trail Valley Creek, NWT, Canada Soil Moisture and Temperature 2016 - 2019. 4 datasets (2020)**

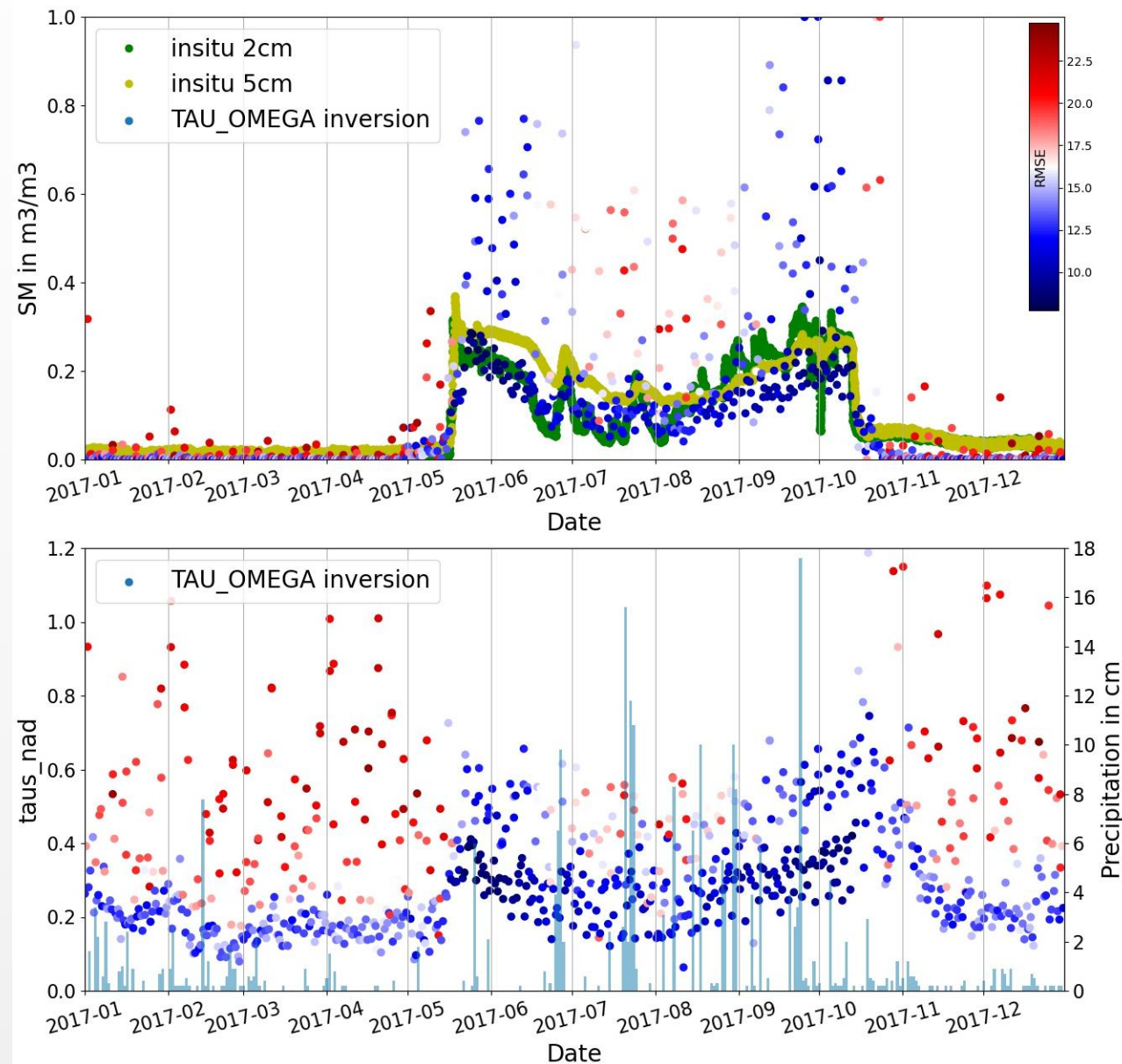




## 2/ Température sous la neige

*Humidité et VOD inversés dans un contexte de sol arctique*

*1ere estimations en zone arctique*



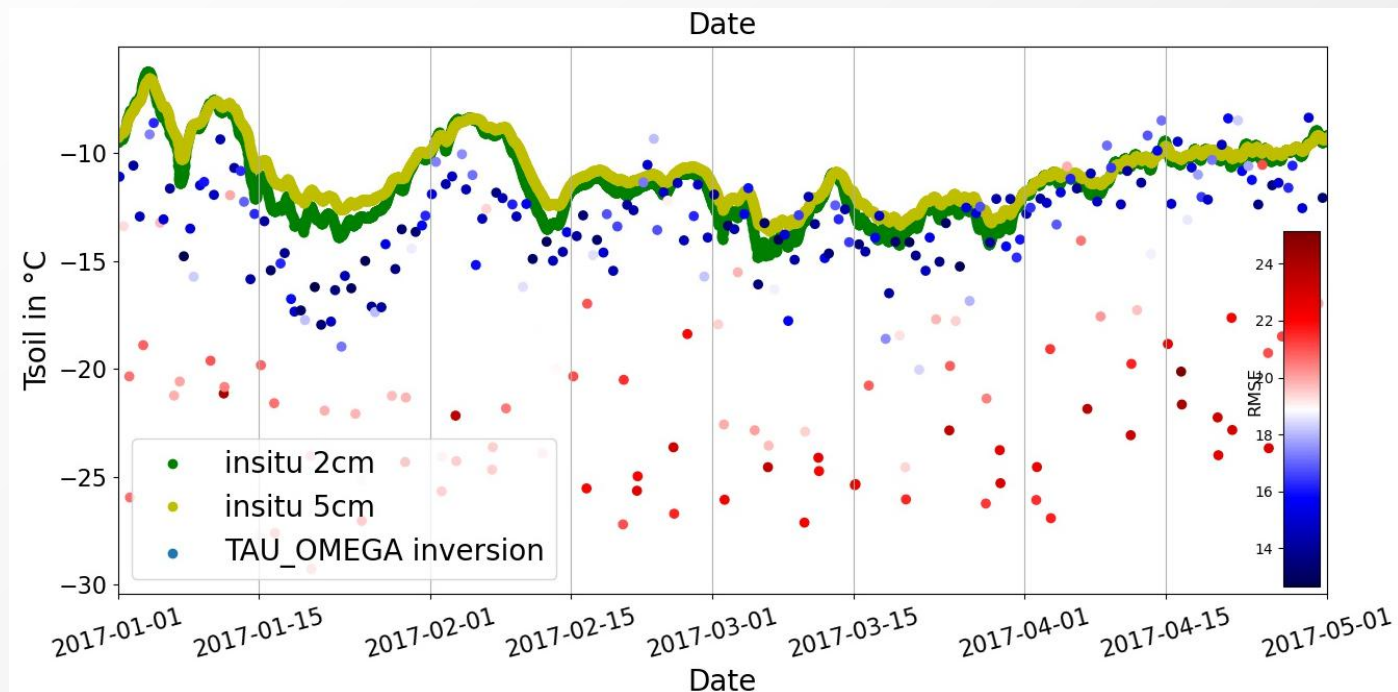
- Ortet et al., CNFRAA Toulouse 2022
- Ortet et al., Journée des jeunes chercheurs CNES Oct. 2022

- Ortet et al. 2023, en préparation

## 2/ Température sous la neige durant l'hiver

- Intérêt majeur : Impossible avec les fréquences plus grandes
- En bande L, la neige sèche a peu d'effets
- Utilisation du modèle de transfert radiatif « Two Stream 2S »

Collaborations M. Schwank, C. Mätzler



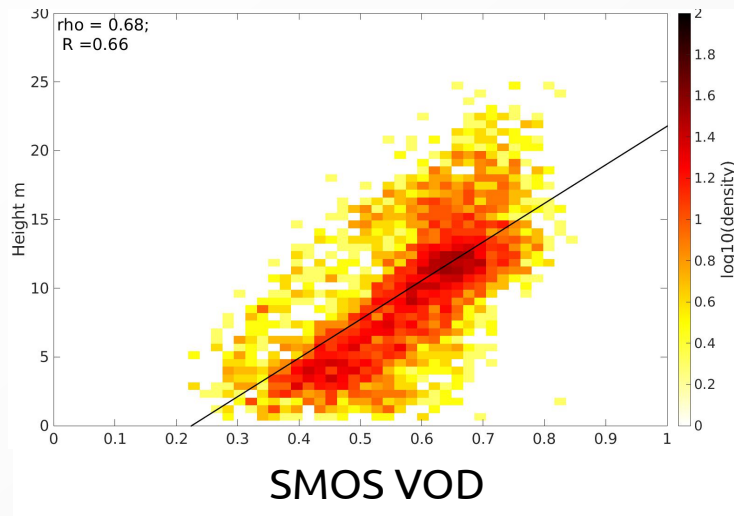
**1<sup>ere</sup> estimations des températures sous la neige !**

- Ortet et al., CNFRAA Toulouse 2022
- Ortet et al., Journée des jeunes chercheurs CNES Oct. 2022
- Ortet et al. 2023, en préparation

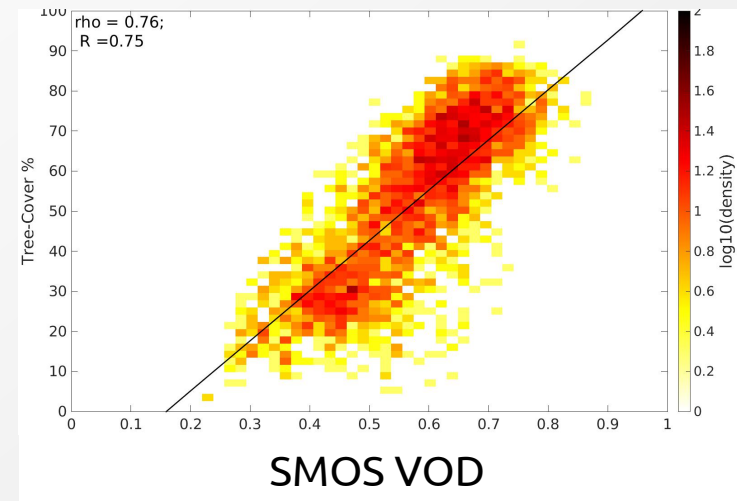
## 3/ VOD aux hautes latitudes

- Estimations de la biomasse au Canada (*Boitard in prep.*)

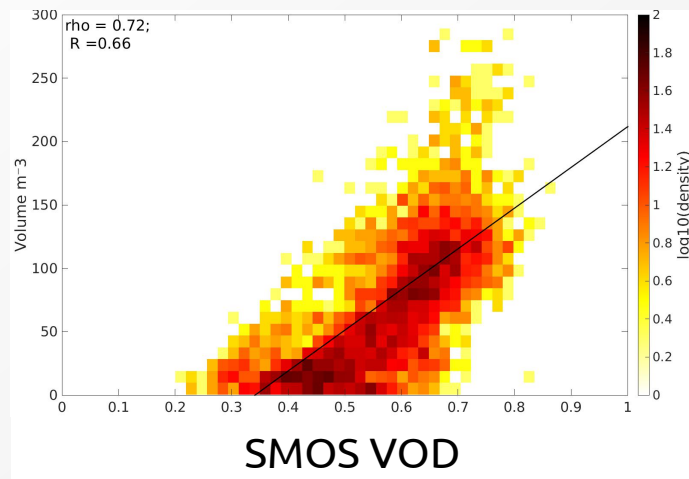
Tree Height



Tree Cover



Tree Cover x Tree Height



- Tree cover x Tree height : proxy à la quantité de biomasse
- Collaborations : A. Beaudoin

## Résumé des hautes latitudes

- Evaluer les qualités des données SM en milieu riche en sol organique
  - Obtenir une température sous la neige
  - VOD pour représenter les forêts boréales
- Travaux futurs sur le VOD en hiver et la présence de neige

### Personnes encadrées

*J. Ortet (Thèse)*

*F. Gibon (Post-Doc)*

*S. Boitard (CDD)*

### Collaborations

*A. Roy UQTR (Québec)*

*M. Schwank WSL (Suisse)*

*K. Rautiainen FMI (Finlande)*

*S. Bircher Meteo Suisse (Suisse)*

*H. Genet Université Alaska*

- *Ortet et al., CNFRAA Toulouse 2022*
- *Ortet et al., Journée des jeunes chercheurs CNES Oct. 2022*
- *Ortet et al. 2023, en préparation*

## Perspectives et travaux futurs

### Axe 1 : Pergélisol aux latitudes

- Estimation de la température de sous la neige  
⇒ Thèse de J. Ortet
- Lien avec le pergélisol et son état
- Lien avec les flux de carbone

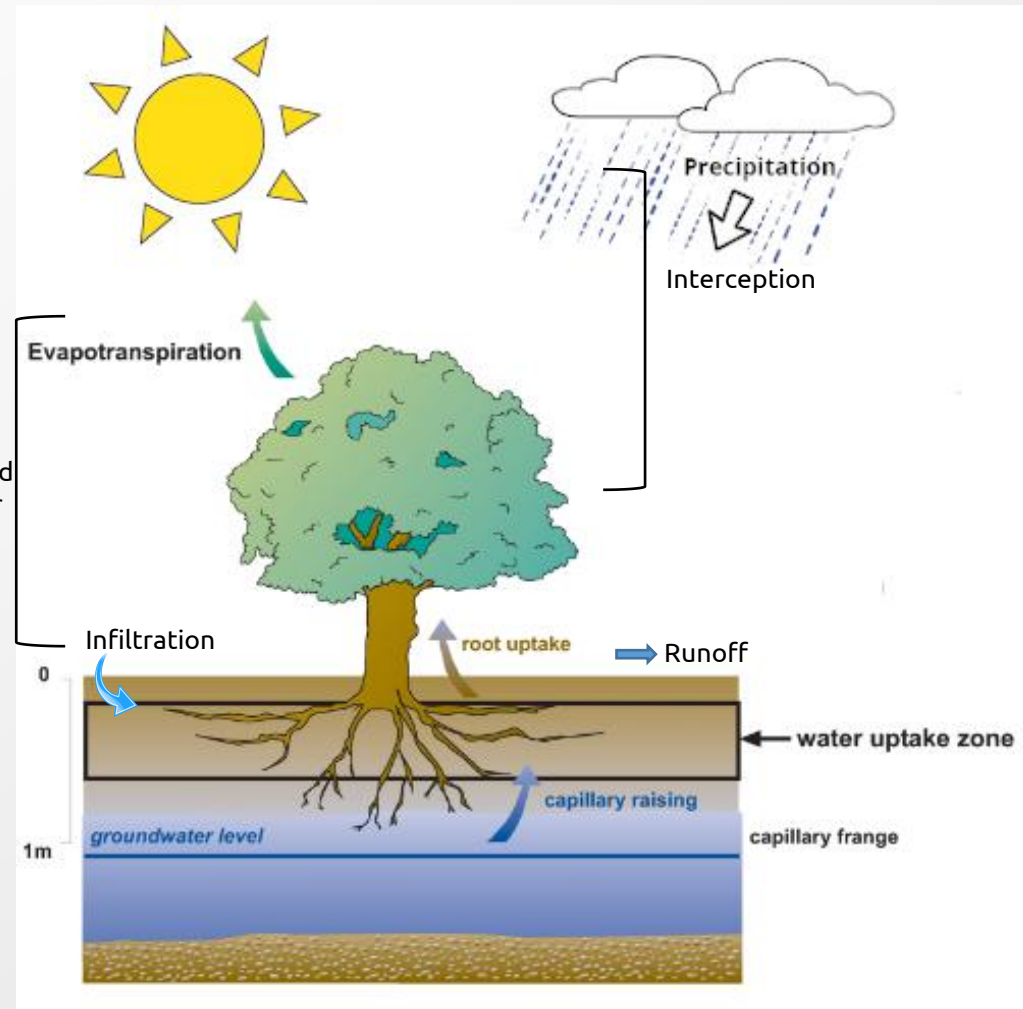
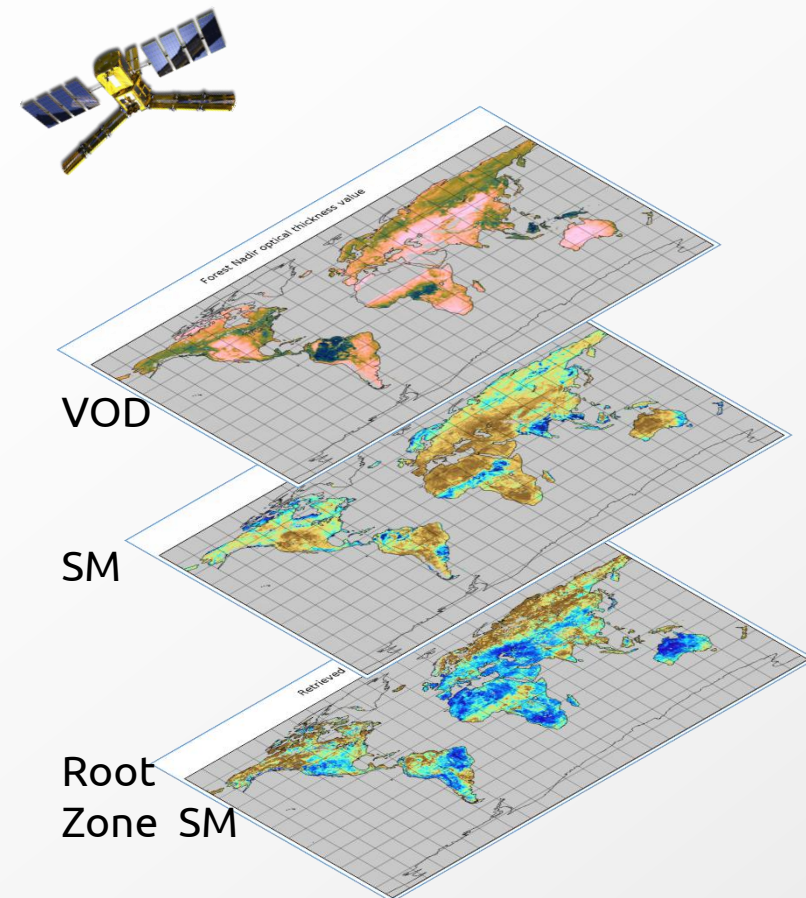
### Axe 2 : Suivi de la biomasse/Contenu en eau de la végétation

- Estimation de la biomasse sèche  
⇒ Thèse C. Salazar, Projet OSMOSE, S. Boitard
- Synergie VOD multi-fréquence et indices optiques  
instruments SMOS, AMSRE, AMSR2 : bande L -1.4 GHz, C -6/7 GHz, X -10 GHz et K -18 GHz  
⇒ Projet OSMOSE
- Contenu en eau de la végétation  
⇒ Campagnes «SMAPVEX» aux USA, site de «TropiRAD» en Guyane



## Axe 3 : Etudes des cycles de l'eau, de la végétation et du carbone

- Lien entre ces variables
- Evolution et tendance de ces paramètres et lien avec le climat

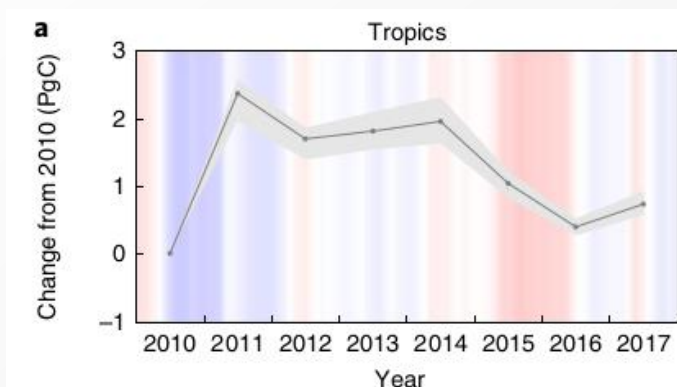


adapted from Illustration by MWMO and Sanchez Perez, 2008, hydrological process

## Axe 3 : Etudes des cycles de l'eau, de la végétation et du carbone

- Lien entre ces variables
- Evolution et tendance de ces paramètres et lien avec le climat

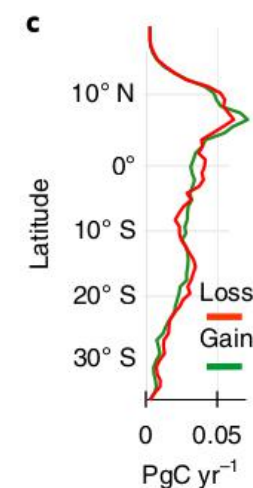
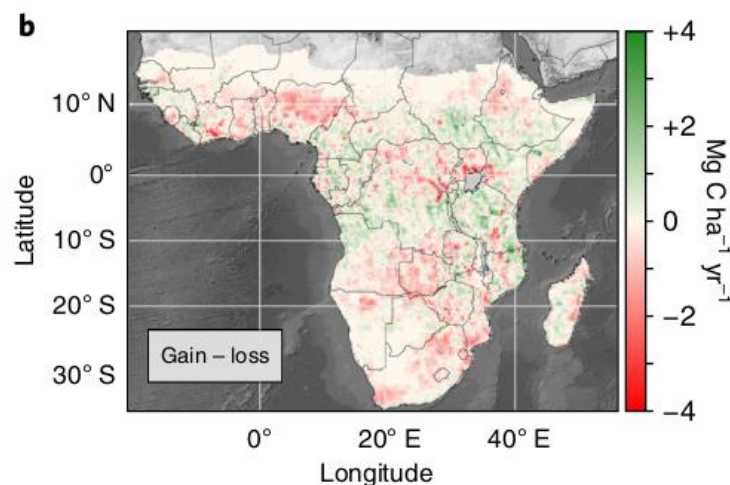
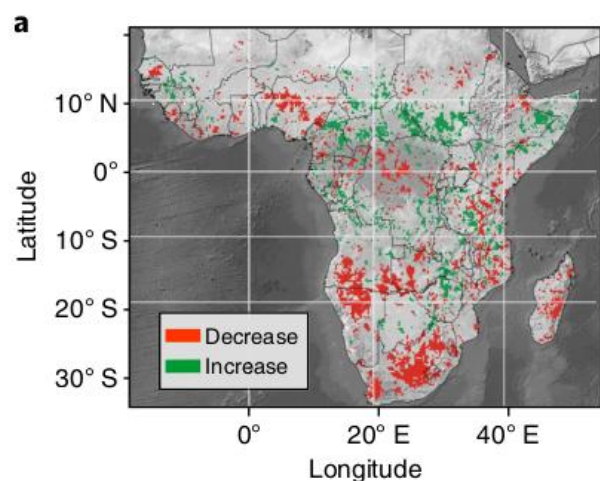
- Fan et al. 2019 : Satellite-observed pantropical carbon dynamics



- Brandt et al 2018 : Tendence du stock de Carbone (2010–2016) en Afrique.

a/ augmentation (vert) diminution (rouge) du L-VOD, proxy de l'AGB

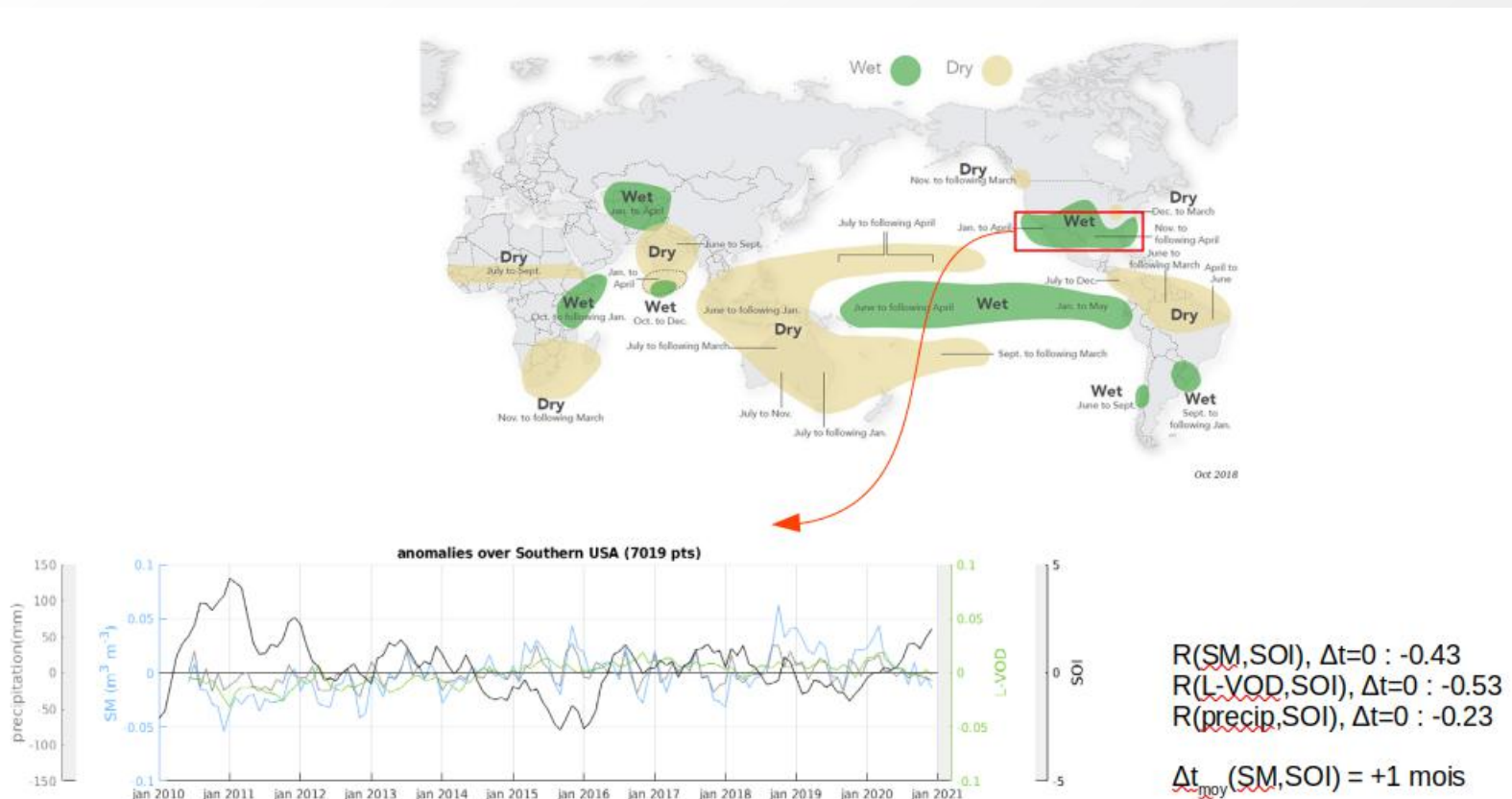
b/ Bilan net de changement de carbone



## Axe 3 : Etudes des cycles de l'eau, de la végétation et du carbone

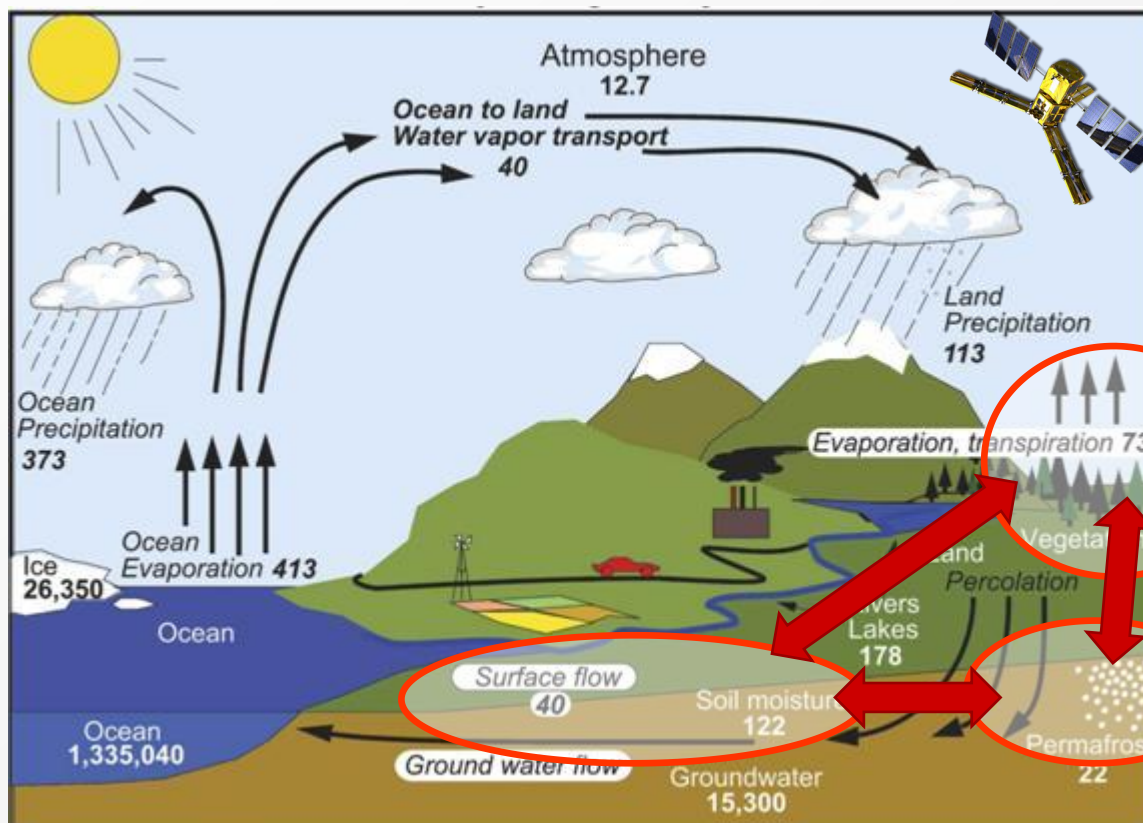
- Lien entre ces variables
- Evolution et tendance de ces paramètres et lien avec le climat
- Travaux entamés: B. Cluzet (stage), N. Rodriguez, E. Bouquet, N. Ojha

### Evolution de SM et VOD, Effets des évènements El Nino



- Mission SMOS
  - 2010 - 2022 : 13 années de données.
  - Jeux de données **unique** pour le cycle de l'eau et de la végétation
  - Exploiter ces données, leurs évolutions temporelles et les liens

figure © 2007 American Meteorological Society (AMS)



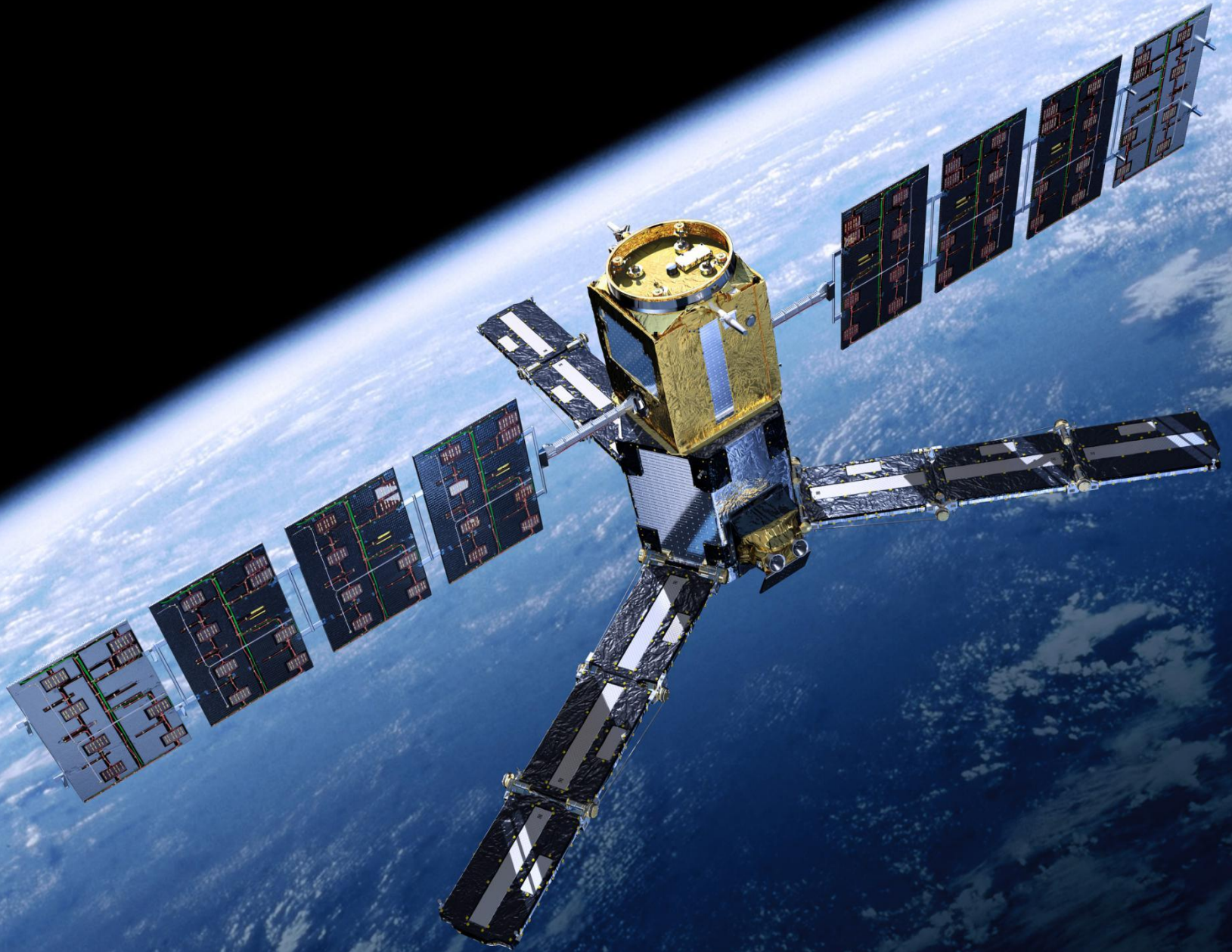
Biomasse

Région de pergélisol

Eau dans le sol



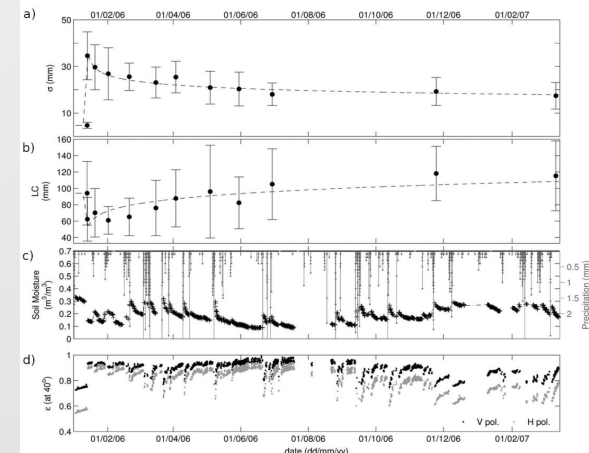
Merci pour votre attention





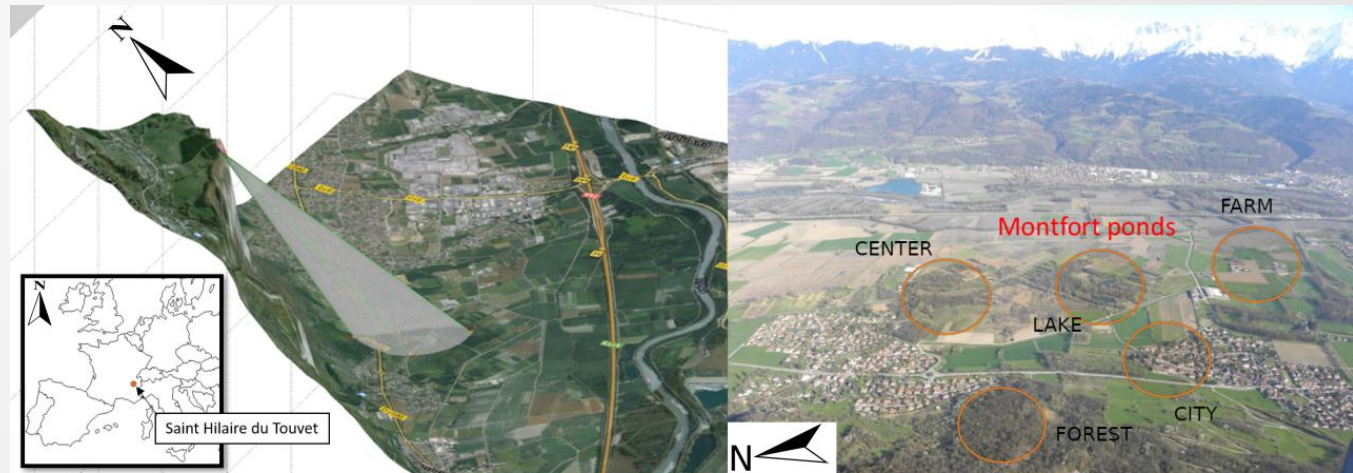
## Validation des données SMOS SM

- Nécessite une bonne connaissance des données de terrain
- Importance de participer à des campagnes
  - *SMOSREX, en charge du site entre 2007 et 2012*
  - *Radiomètre Lewis au plateau des petites roches 2014-2020*
  - *AACES Australian Airborne Cal/Val experiments for SMOS, Janvier 2010*
  - *Campagne aéroportée CAROLS mesure au sol avec météo france*
  - *Antarctique Dome Concordia*
    - Nov. 2012 - Janv. 2013
    - Nov. 2018 - Janv. 2019



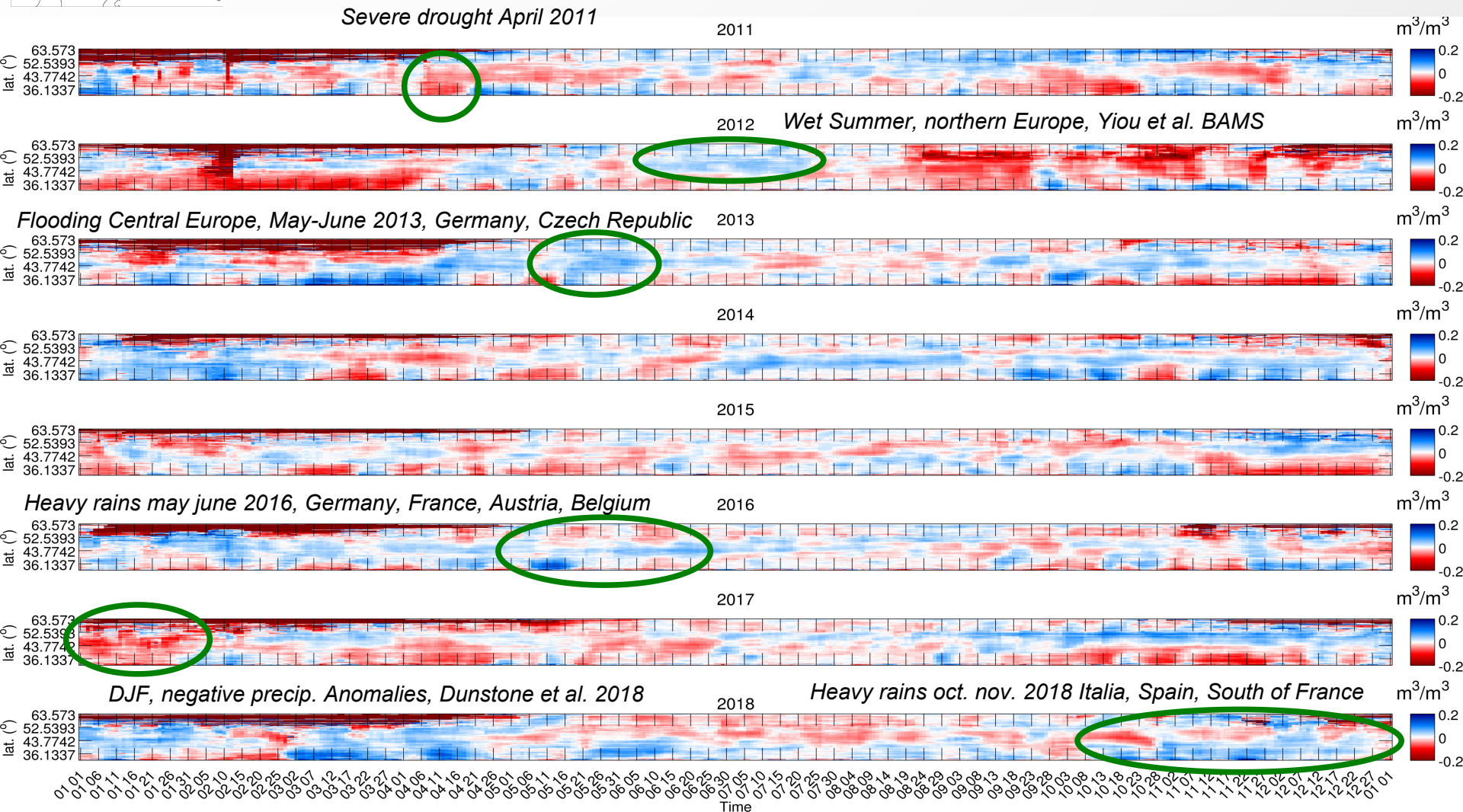
- *Mialon et al. 2012*
- *Barrée et al. 2021*
- *Pardé et al 2011, Vols Carols*
- *Stages de Renan Toullec, Romain Berthelot, Mathilde Barrée*

- LEWIS radiomètre en bord de falaise à 1030m d'altitude à St Hilaire du Touvet (Isère)
- Observe la vallée du Grésivaudan



- Stage M. Barré
- Barré et al. 2021





## Axe 3 : Etudes des cycles de l'eau, de la végétation et du carbone

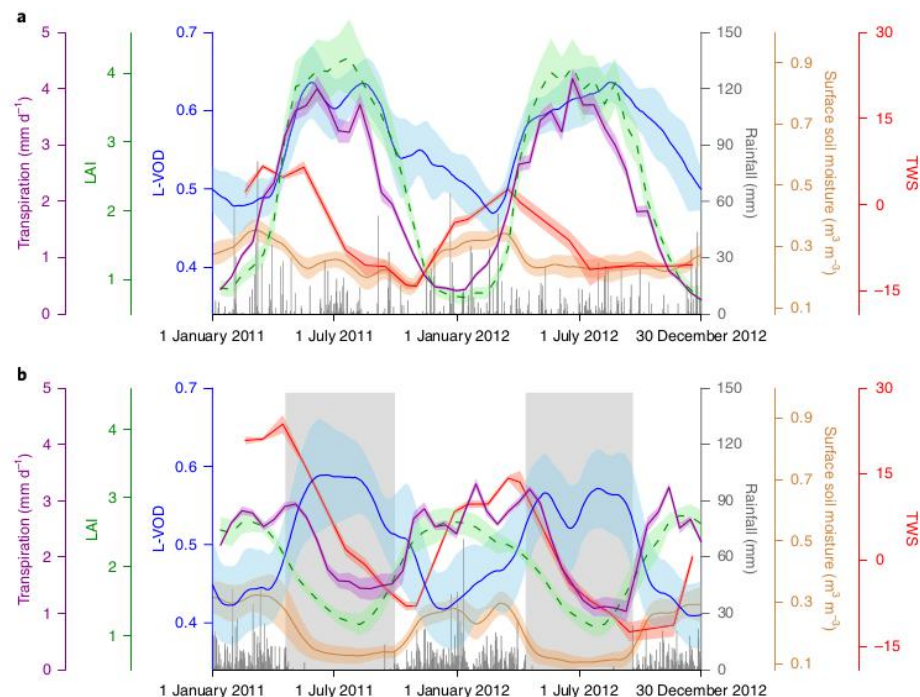
- Lien entre ces variables
- Evolution et tendance de ces paramètres et lien avec le climat

ARTICLES <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0630-3> nature ecology & evolution

### Coupling of ecosystem-scale plant water storage and leaf phenology observed by satellite

Feng Tian<sup>1,2\*</sup>, Jean-Pierre Wigneron<sup>3\*</sup>, Philippe Ciais<sup>4</sup>, Jérôme Chave<sup>5</sup>, Jérôme Ogée<sup>3</sup>, Josep Peñuelas<sup>6,7</sup>, Anders Ræbild<sup>2</sup>, Jean-Christophe Domec<sup>8</sup>, Xiaoye Tong<sup>2</sup>, Martin Brandt<sup>2</sup>, Arnaud Mialon<sup>9</sup>, Nemesio Rodriguez-Fernandez<sup>9</sup>, Torbern Tagesson<sup>1,2</sup>, Amen Al-Yaari<sup>3</sup>, Yann Kerr<sup>9</sup>, Chi Chen<sup>10</sup>, Ranga B. Myneni<sup>10</sup>, Wenmin Zhang<sup>2</sup>, Jonas Ardö<sup>1</sup> and Rasmus Fensholt<sup>2</sup>

RAJOUTER  
UN BARATIN



**Fig. 5 | Seasonal water balance in two contrasting ecosystems. a, b.** Time series (2011–2012) of plant water storage (L-VOD), TWS, surface soil moisture, rainfall, transpiration, and leaf phenology (LAI) for a 1° × 1° area of southeastern US temperate forest (centred at 33.5°N, 85.5°W) (**a**) and African Miombo woodland (centred at 11.5°S, 18.5°E) (**b**). Shading represents s.d. (n=16 for all except TWS, where n=3). The grey shaded rectangles in **b** indicate the dry seasons.

# Centre de traitement et de diffusion des Données



- DPGS Data Processing Ground Segment

<http://smos-diss.eo.esa.int/>

- CATDS (Centre Aval du Traitement des Données SMOS)

[www.catds.fr/Products/Available-products-from-CPDC](http://www.catds.fr/Products/Available-products-from-CPDC)

[www.catds.fr](http://www.catds.fr)

- BEC : Barcelona Expert Center



*L'équipe du CESBIO*

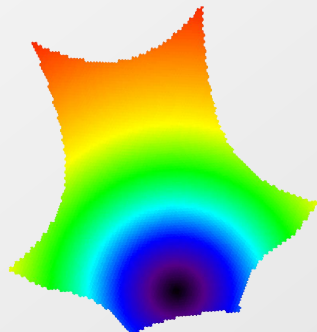
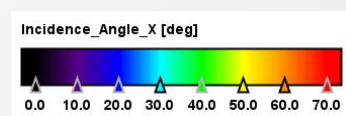
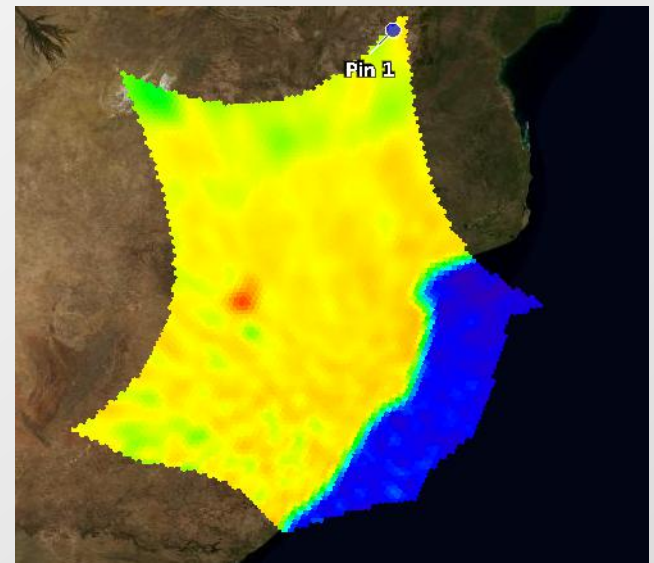
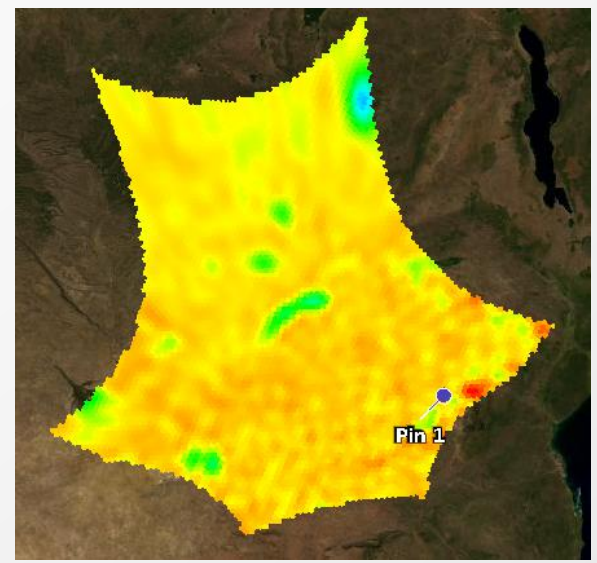
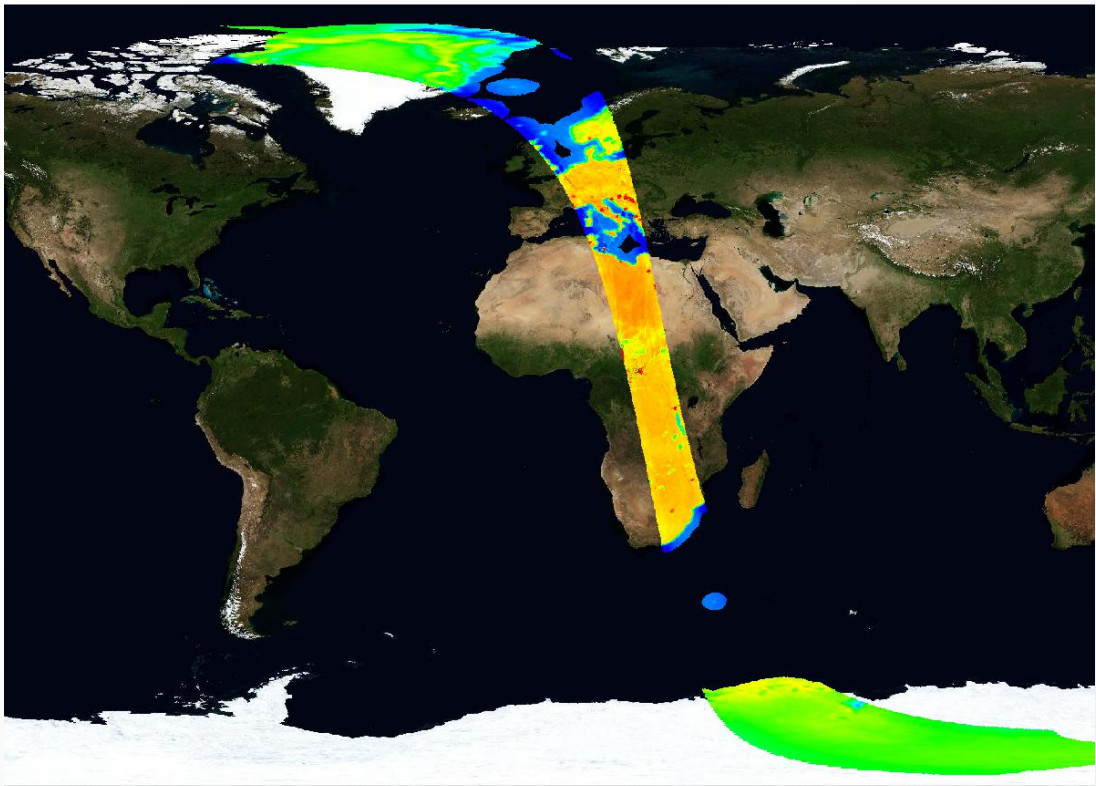
*- Yann est PI de la mission*

*- Expert Support Laboratory pour l'ESA (humidité du sol)*

*- DPGS et CATDS*

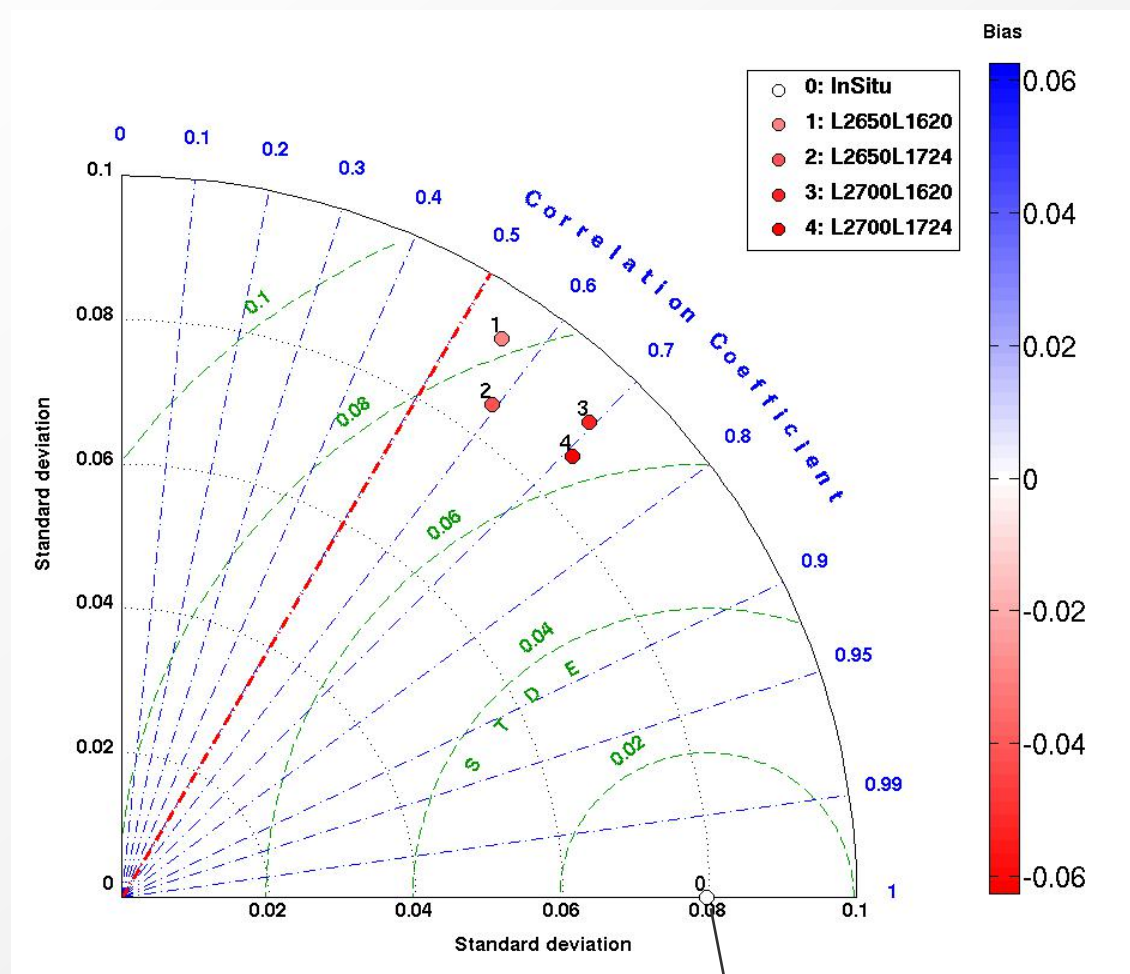


## SMOS Températures de brillance multi angulaires



## Calibration et Validation

## Evaluation des modifications

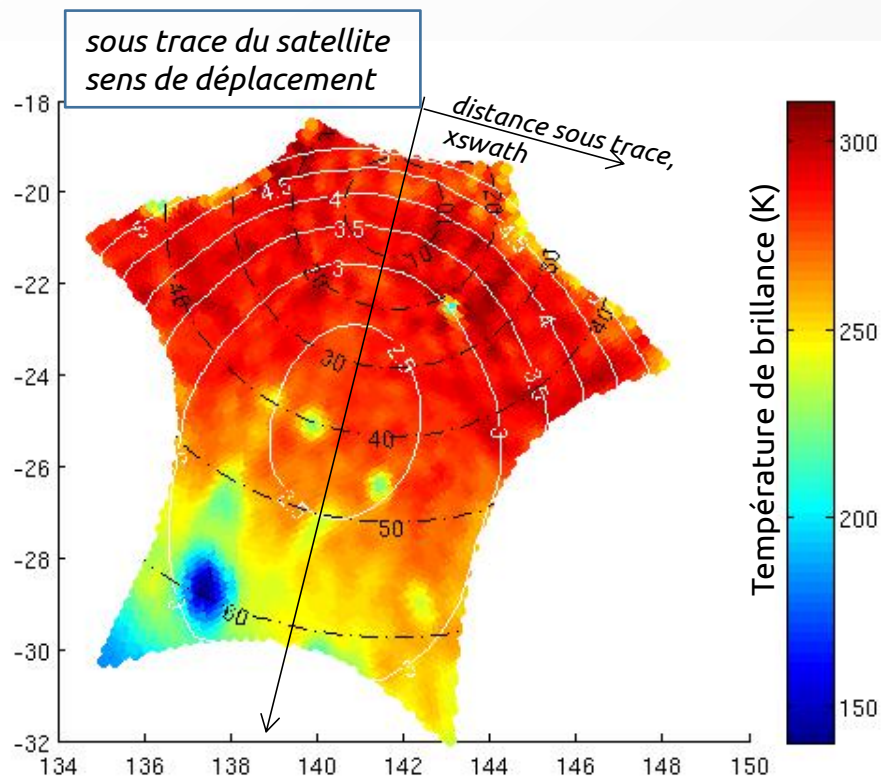


Référence : in situ

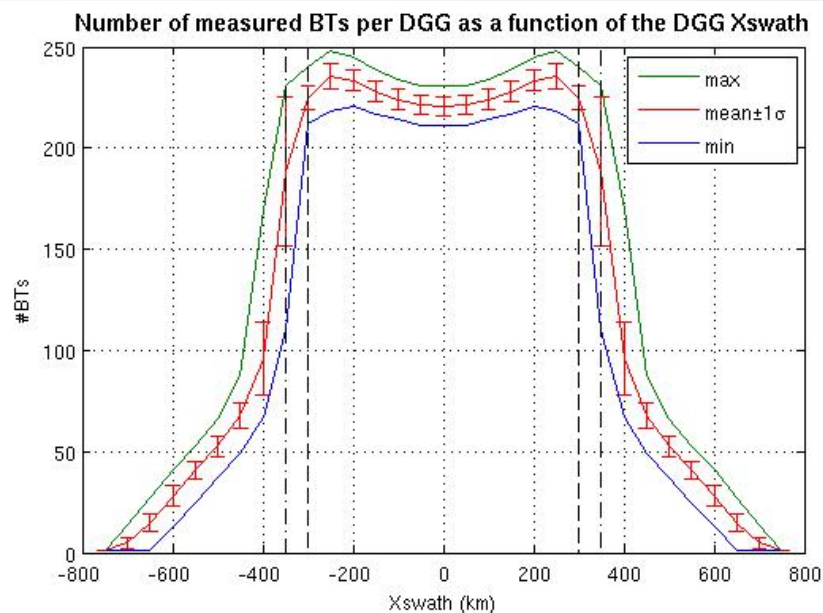
## Travail sur le niveau 3

## Motivations pour une chaîne de traitement

- Changer de grille, vers une grille plus orientée utilisateurs
- Format binX => netcdf
- Utilisation des orbites/passages précédents



Températures de brillance (K) pour 1 snapshot  
Angle d'incidence



- Sous l'instrument beaucoup de mesures > 200 TB
- Plus on s'écarte de la sous-trace plus on perd en TB

## Contrainte temporelle sur le Tau

- Version 300
- Version 339

$$\rho_{\text{VOD}}(t_1, t_2) = \rho_{\text{max}}(t_1, t_2) \cdot \exp\left(-\frac{(t_1 - t_2)^2}{T_c^2}\right)$$

$$a = \frac{\text{var}(\text{Tau}_{1,2,3})}{\text{var}_{\text{vod}_{ref}}}$$

where  $\text{var}_{\text{vod}_{ref}}$  being a constant (0.05) and the variance defined as

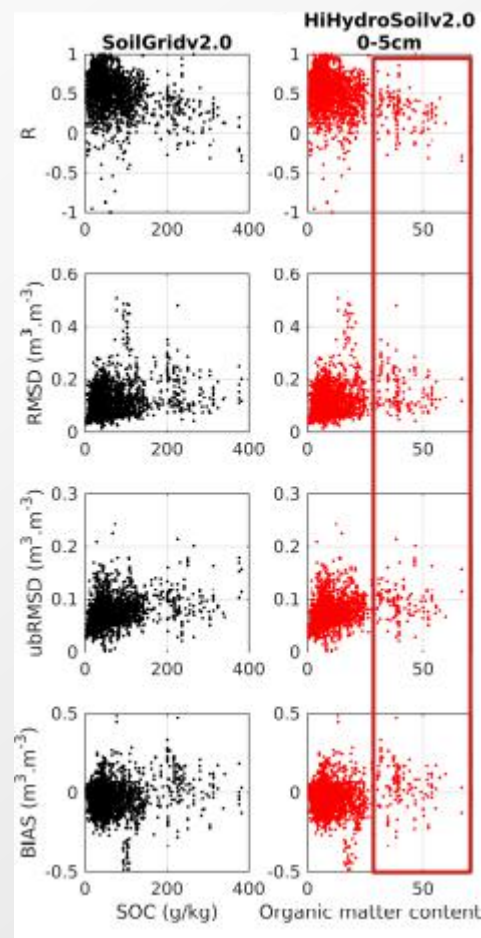
L3 v339

- Série temporelle de SM (haut), VOD (bas) pour le site «Phillipsburg» USA
- Comparaison entre les produits SMOS niveau 2 version 650, niveau 3 version 300, niveau 3 version 339, IC version 1



	ALL	SOM<30%	SOM>30%
R	$\mu=0.60$ $\sigma=0.21$	$\mu=0.61$ $\sigma=0.20$	$\mu=0.34$ $\sigma=0.19$
RMSD $m^3.m^{-3}$	$\mu=0.11$ $\sigma=0.052$	$\mu=0.11$ $\sigma=0.050$	$\mu=0.16$ $\sigma=0.063$
ubRMSD $m^3.m^{-3}$	$\mu=0.073$ $\sigma=0.024$	$\mu=0.072$ $\sigma=0.023$	$\mu=0.095$ $\sigma=0.022$
Bias $m^3.m^{-3}$	$\mu=-0.034$ $\sigma=0.090$	$\mu=-0.040$ $\sigma=0.084$	$\mu=0.068$ $\sigma=0.12$

*Gibon et al. in prep.*

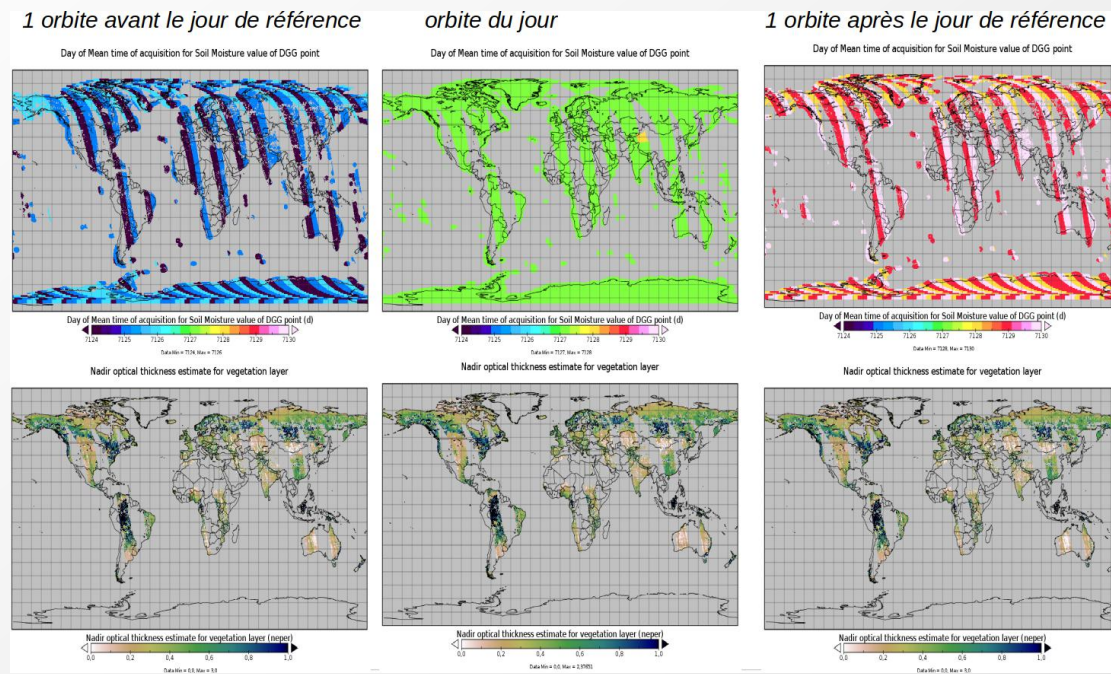




## Modifications du processeur L3SMOPT: PRINCIPES



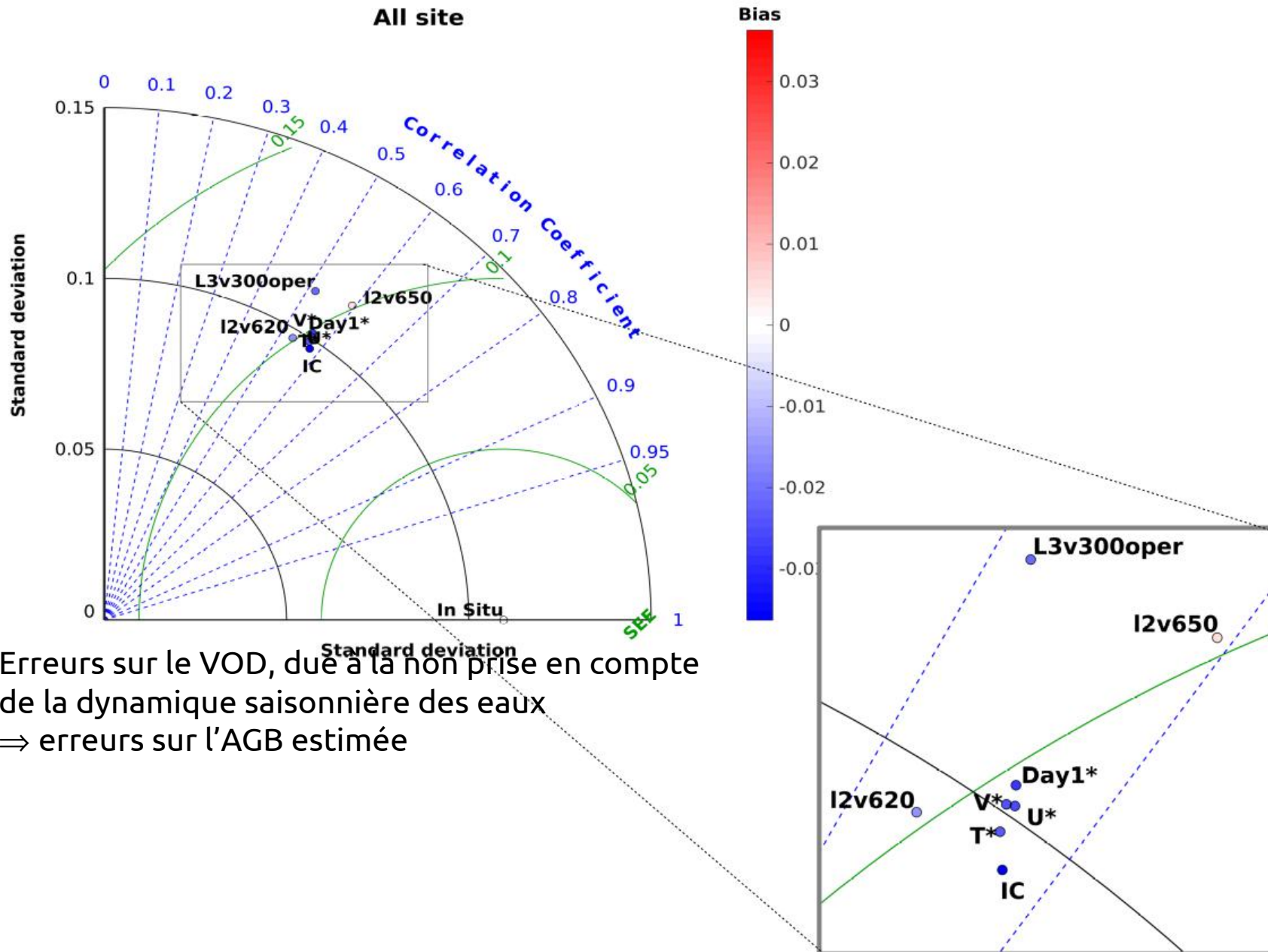
- 3 passages de SMOS successifs par pixels
- 1 inversion qui aboutit à 3 SM et 3 VOD
- Contrainte temporelle sur les 3 VOD



- Equilibre Thermodynamique: loi Kirchhoff (valide en MWs):  $e(\lambda) = a(\lambda)$
- $\omega$  scattering loss
  - Fixe dans l'algorithme SMOS
  - Hypothèse : ne dépend pas de l'angle d'incidence
  - ni de la polarisation i.e.  $\omega_V = \omega_H$
  - Forest = 0.06 (*Parrens et al., Rahmoune et al.*)
  - $(1 - \omega)$  not scattered/lost = absorbed radiation
- $\gamma$  transmissivity :  $(1 - \gamma)$  = not transmitted, fraction of vegetation that is non-transparent, i.e. part of vegetation layer that emits at L-band

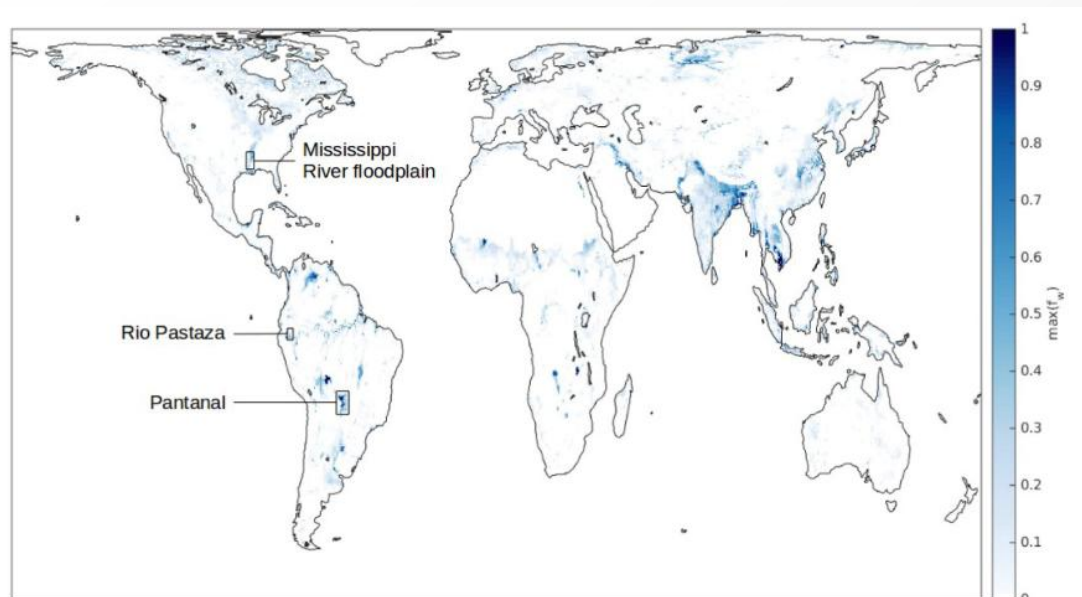
Contributions de la végétation :

- Veg. emission direct =  $(1 - \omega) \cdot (1 - \gamma) \cdot T_{veg}$
- Veg. emission reflected by soil  $(1 - e_{soil})$  and transmitted  $(\gamma)$  back up through canopy  
=  $(1 - \omega) \cdot (1 - \gamma) \cdot T_{veg} \cdot (1 - e_{soil}) \cdot \gamma$

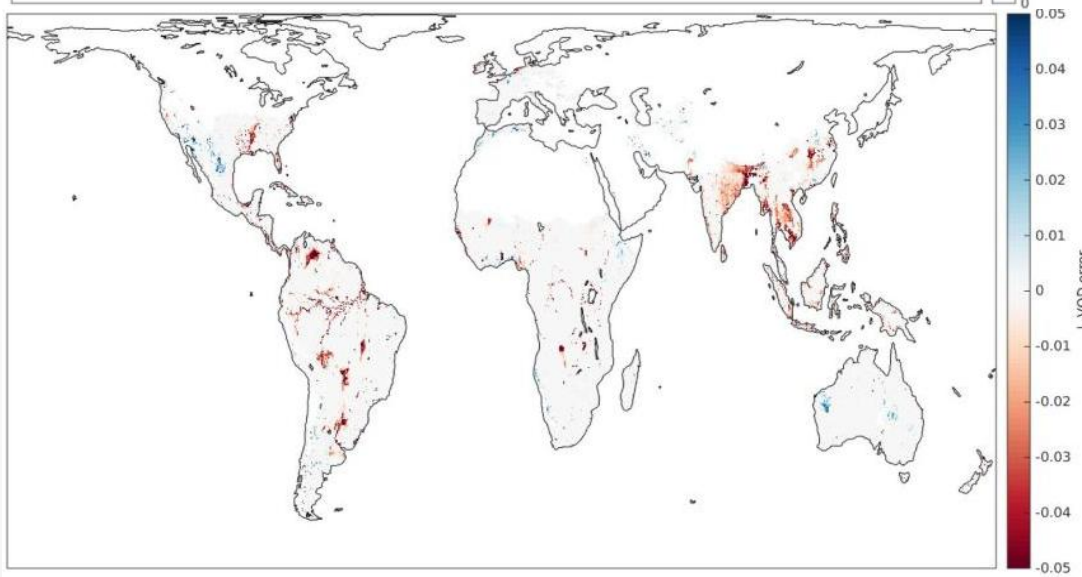


Erreurs sur le VOD, due à la non prise en compte de la dynamique saisonnière des eaux  
 ⇒ erreurs sur l'AGB estimée

- Erreurs sur le VOD dues à la dynamique saisonnière des zones humides-inondées



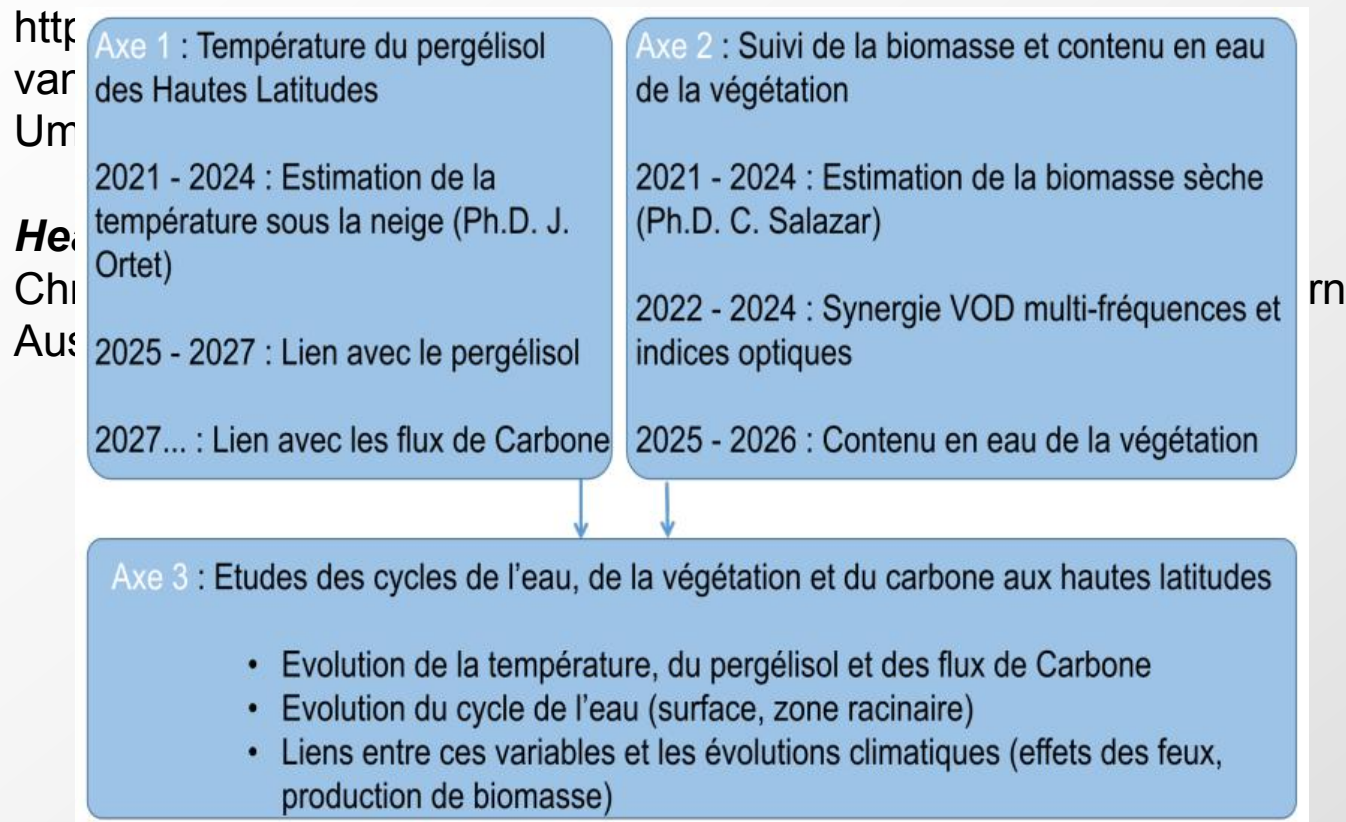
Régions à fortes dynamiques des eaux libres, selon Prigent et al.



Erreurs sur le VOD, due à la non prise en compte de la dynamique saisonnière des eaux  
 ⇒ erreurs sur l'AGB estimée

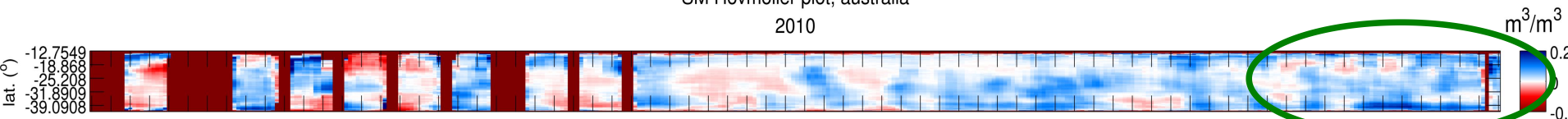
# Australia

## *Flood January 2011*

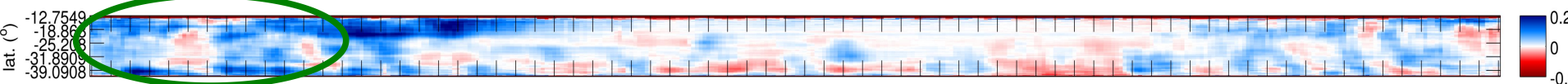




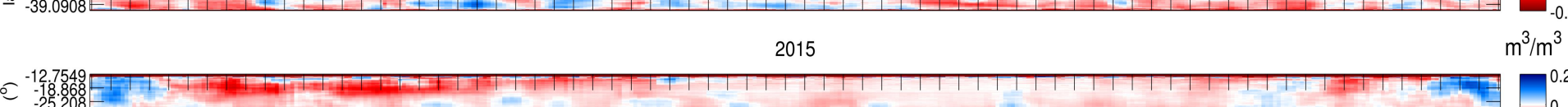
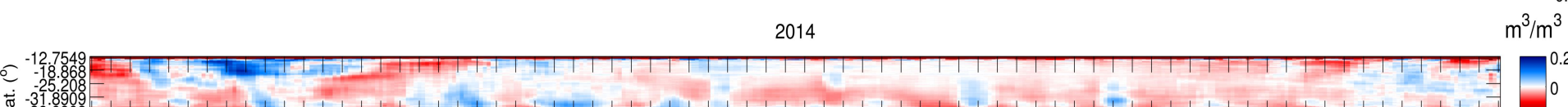
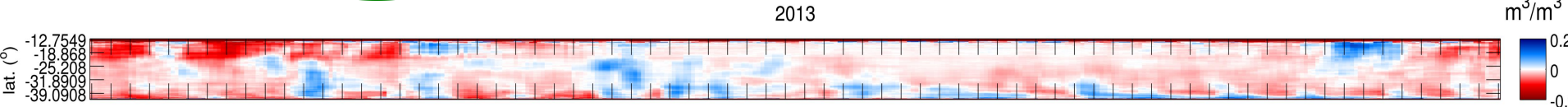
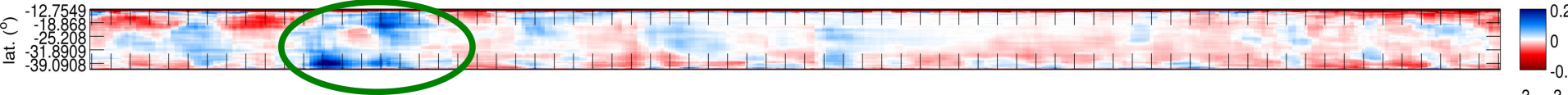
SM Hovmoller plot, australia  
2010



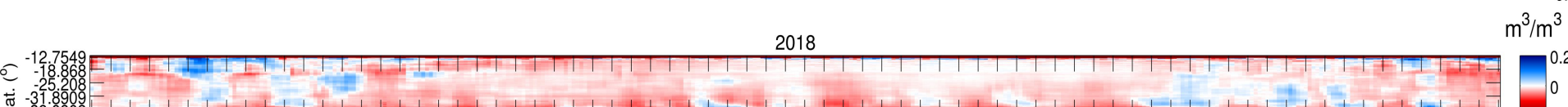
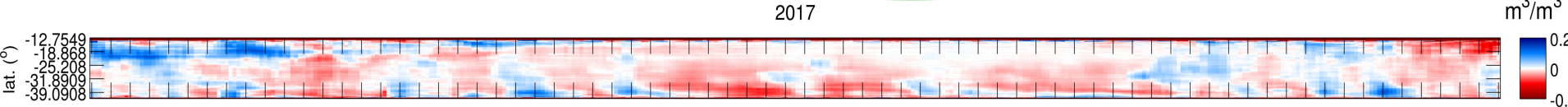
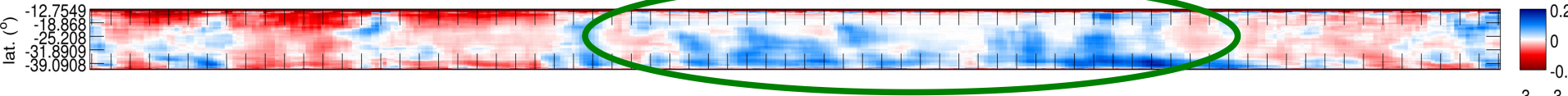
*Extreme Flood in Queensland Dec. 2010-Jan.2011==> El Nina*



*Heavy Rain march 2012,*



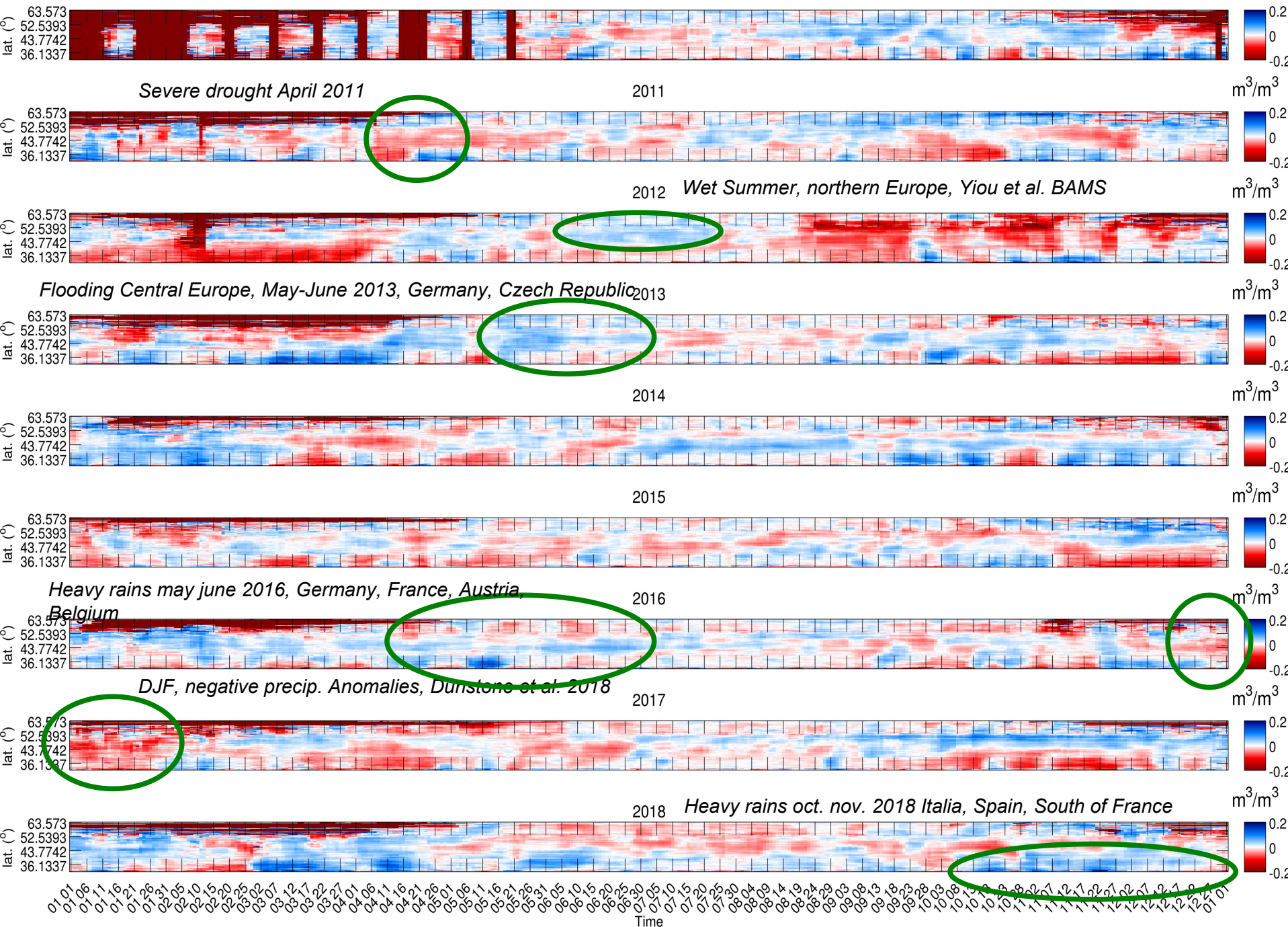
*May to August 2016 : 2nd wettest winter*



Time

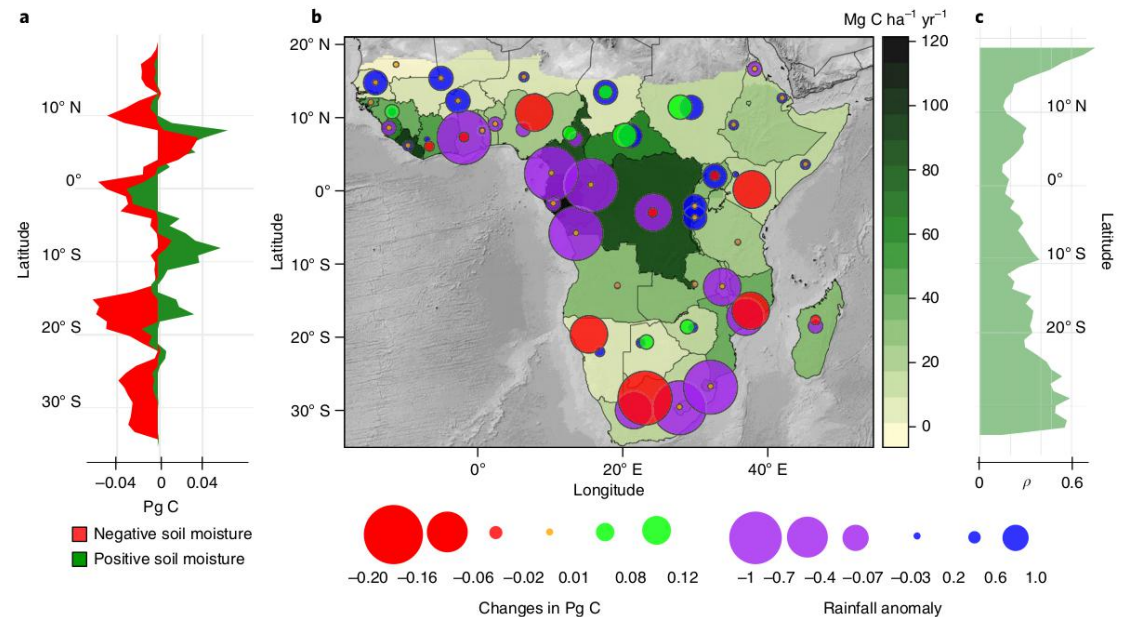


SM Hovmoller plot, europe  
2010



## Satellite passive microwaves reveal recent climate-induced carbon losses in African drylands

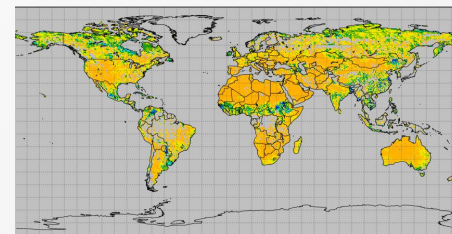
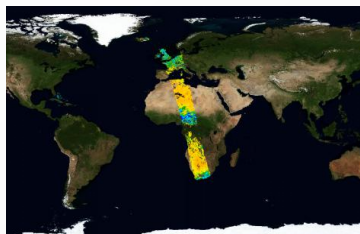
Martin Brandt <sup>1\*</sup>, Jean-Pierre Wigneron <sup>2\*</sup>, Jerome Chave<sup>3</sup>, Torbern Tagesson<sup>1</sup>, Josep Penuelas <sup>4,5</sup>, Philippe Ciais<sup>6</sup>, Kjeld Rasmussen<sup>1</sup>, Feng Tian <sup>1</sup>, Cheikh Mbow<sup>7</sup>, Amen Al-Yaari <sup>2</sup>, Nemesio Rodriguez-Fernandez<sup>8</sup>, Guy Schurgers <sup>1</sup>, Wenmin Zhang<sup>1,9</sup>, Jinfeng Chang<sup>6</sup>, Yann Kerr <sup>8</sup>, Aleixandre Verger<sup>4,5</sup>, Compton Tucker<sup>10</sup>, Arnaud Mialon<sup>8</sup>, Laura Vang Rasmussen<sup>1</sup>, Lei Fan<sup>2</sup> and Rasmus Fensholt<sup>1</sup>



**Fig. 6 | Climate as a driver of carbon stock dynamics.** **a**, Direction and magnitude of net carbon change for 2010–2016 (summed per latitude) are shown for areas with positive (green) and negative (red) linear trends in soil moisture (2010–2016). **b**, Average carbon density (in Mg C ha<sup>-1</sup>) and net carbon change for 2010–2016 summed for each country (in Pg C). Anomalies in annual rainfall (2010–2016 compared to 1981–2016) averaged for each country are shown as purple (negative anomaly) and blue (positive anomaly) circles. **c**, Correlations between annual carbon stocks and annual soil moisture (shown as Spearman's  $\rho$ ,  $n = 26,711$ ) averaged along the latitudes.

# SMOS : Soil Moisture and Ocean Salinity

L'équipe du CESBIO  
 - Yann est PI de la mission  
 - Expert Sc. Laboratory SM



<i>Segment sol</i>	DPGS niveaux 1 et 2	CATDS niveaux 3 et 4
<i>Algorithme</i>	1 passage orbite	Multi-orbite
<i>Produit</i>	1/2 orbite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Synthèses temporelles <sup>*(1, 2)</sup></li> <li>• 1 jour, 3 jours, 10 jours, mensuel</li> </ul>
<i>Format</i>	BinX, Netcdf	Netcdf
<i>Grille</i>	Isea4h9 ~15 km	EASE Grid ~25x25km at 30° of latitude
	<p><b>Niveau 1</b> : Températures de Brillance TB, polarisations X/Y</p> <p><b>Niveau 2</b> : SM et OS</p>	<p><b>Niveau 3</b> : SM et OS SM, TB en pol. H/V polarisation, projection polaire</p> <p><b>Niveau 4</b> : Applications</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• SM désaggrégés</li> <li>• Root Zone Soil Moisture</li> <li>• Drought Index</li> <li>• Precipitations</li> <li>• Température en Antarctique</li> <li>• Estimations de biomasse (soon ...)</li> </ul>

\* Isea : Icosahedral Snyder Equal Area

\* EASE : Equal Area Scalable of the Earth

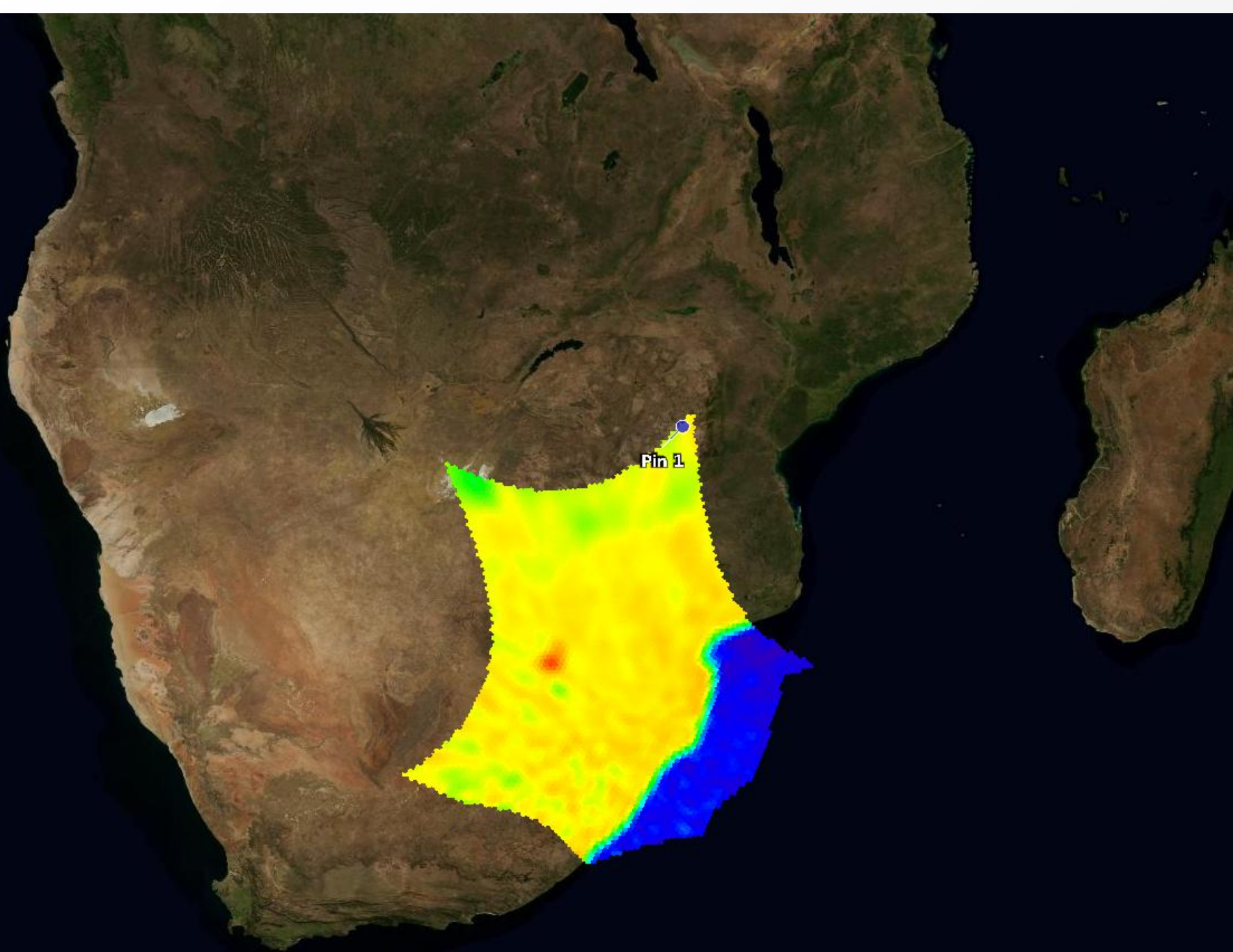
\* ESA : European Space Agency

\* CATDS : Centre Aval de Traitement des Données SMOS

(1) Al Bitar et al. 2017

(2) Jacquette, E. Et al. 2010, Proc. SPIE





Pin 1

