



**HAL**  
open science

# La télédétection comme outil de cartographie des sols : Enjeux, succès et limites

Cécile Gomez, Emmanuelle Vaudour, Anne C Richer-De-Forges

## ► To cite this version:

Cécile Gomez, Emmanuelle Vaudour, Anne C Richer-De-Forges. La télédétection comme outil de cartographie des sols : Enjeux, succès et limites. Webinaire du réseau télédétection INRAE, Réseau Télédétection INRAE, Nov 2023, événement en ligne - Webinaire, France. hal-04313476

**HAL Id: hal-04313476**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04313476>**

Submitted on 29 Nov 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.



# La télédétection comme outil de cartographie des sols: Enjeux, succès et limites

Gomez C., Vaudour E., Richer-de-Forges A.C.



- **Introduction**
- **Présentation du Centre d'Expertise Scientifique Theia « Cartographie Numérique des Sols »**
- **La télédétection pour cartographier les sols**
  - Rétrospective historique et principes généraux
  - Les programmes existants : Copernicus, Theia
  - Exemples de réalisations
  - Les facteurs de perturbation
- **Vers l'intégration de données de télédétection dans les approches de cartographie des sols par modélisation statistique (DSM)**
  - Rétrospective historique et principes généraux
  - Les programmes existants : *GlobalSoilMap*
  - Exemples de réalisations
- **Conclusion**



# Introduction

# Les services rendus par les sols

Pour les protéger et pérenniser les services qu'ils nous rendent  $\Rightarrow$  besoin de cartographier les sols et leur propriétés



Source : FAO, 2015

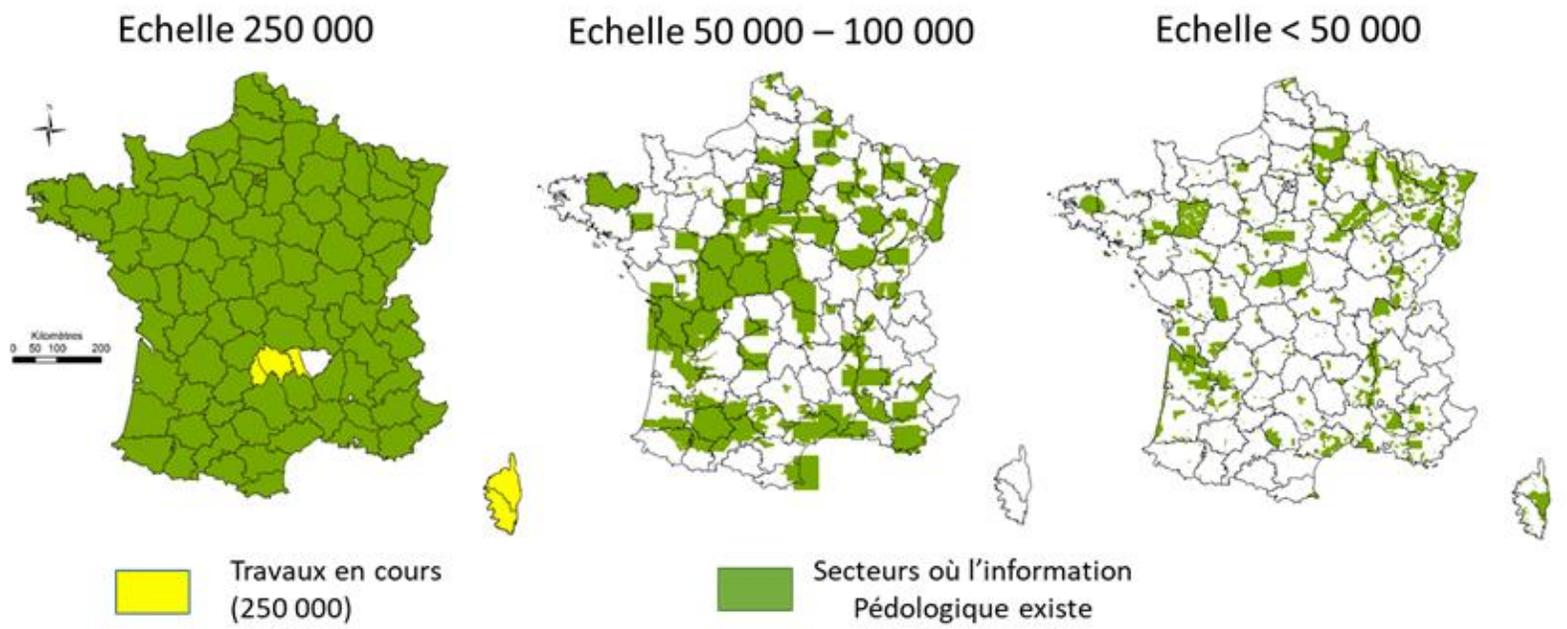
# Les données sur les sols

Des descriptions de sols :



Un profil de sol tiré du calendrier sol. Source: Gabriela Brändle, Urs Zihlmann, Andreas Chevet.

Programmes nationaux de cartographies des sols :



<https://www.afes.fr/ressources/le-programme-inventaire-gestion-conservation-des-sols-de-france-volet-referentiel-regional-pedologique/>

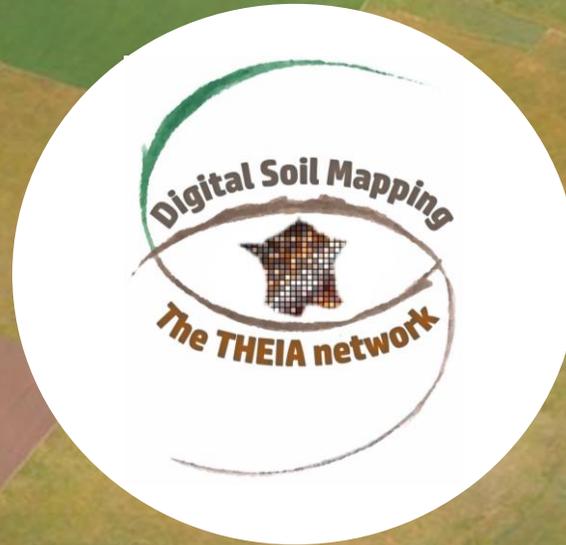
<https://www.afes.fr/ressources/la-cartographie-des-sols-a-moyennes-echelles-en-france-metropolitaine/>

→ Données ponctuelles

→ Cartes statiques sans quantification de l'incertitude

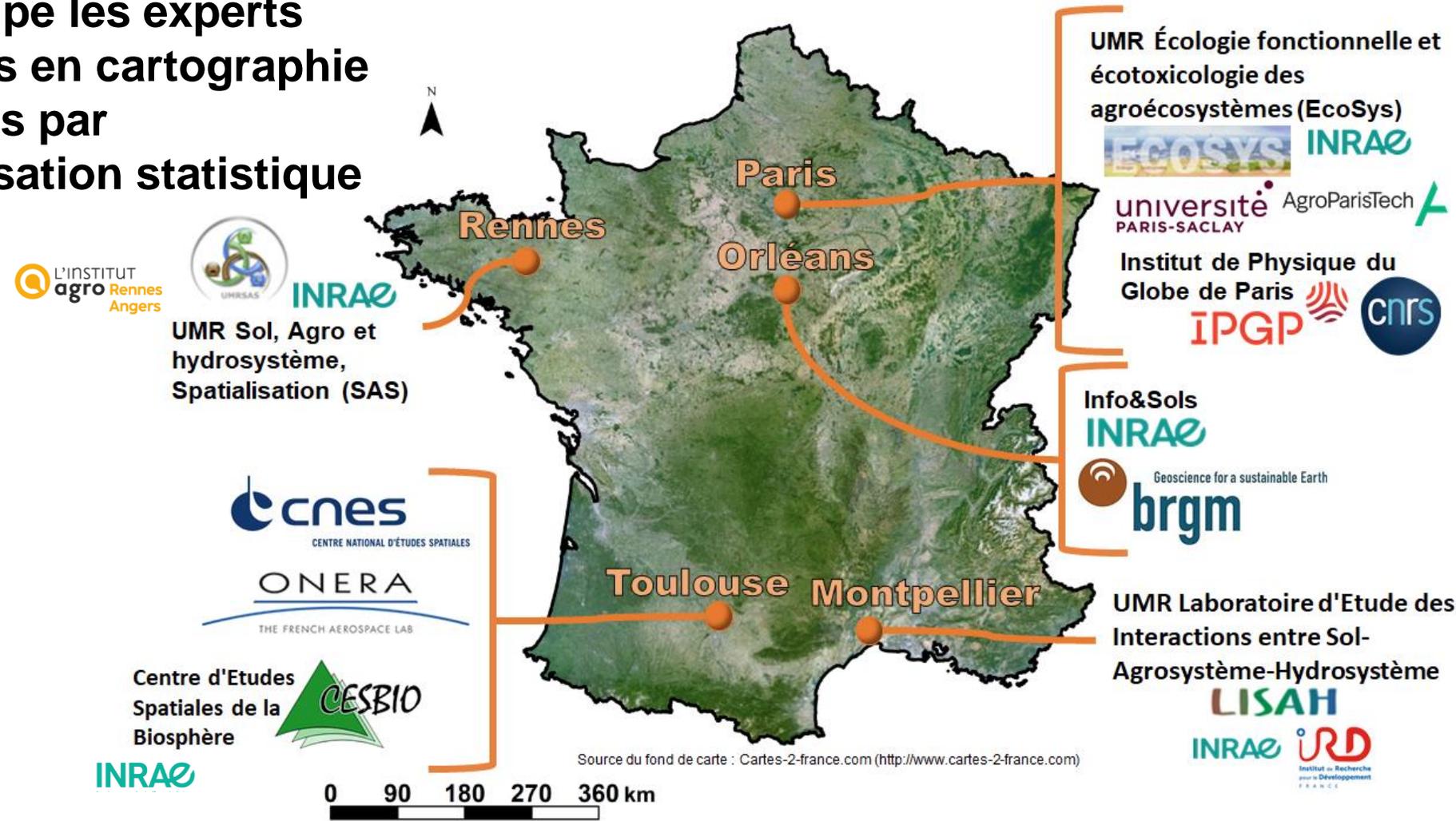


# Le Centre d'Expertise Scientifique « Cartographie Numérique des Sols » Theia



# Le Centre d'Expertise Scientifique « Cartographie Numérique des Sols » Theia

Regroupe les experts français en cartographie des sols par modélisation statistique



<https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-cartographie-numerique-des-sols/>

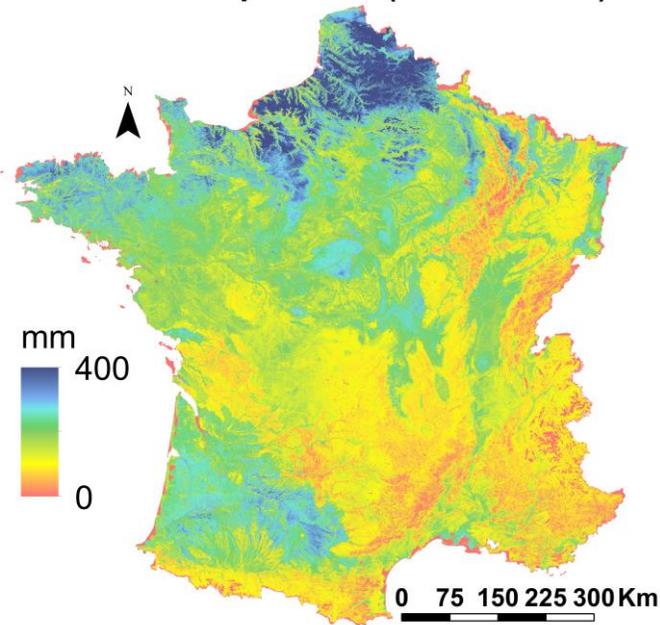


# Le Centre d'Expertise Scientifique « Cartographie Numérique des Sols » Theia



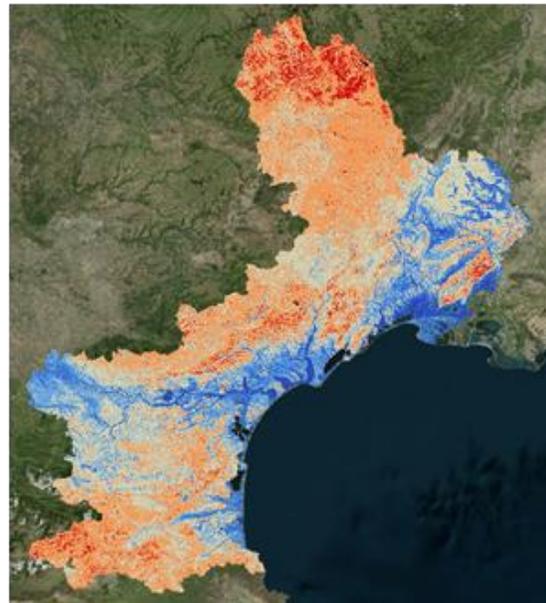
**Objectif 1 :** Produire des estimations spatialisées de propriétés de sol

Réservoir en eau utile (RU) des sols de France métropolitaine (en mm d'eau)



d'après Roman Dobarco *et al.*, 2021  
<https://doi.org/10.15454/9IRARJ>

Réservoir en eau utile (RU) des sols en Languedoc-Roussillon

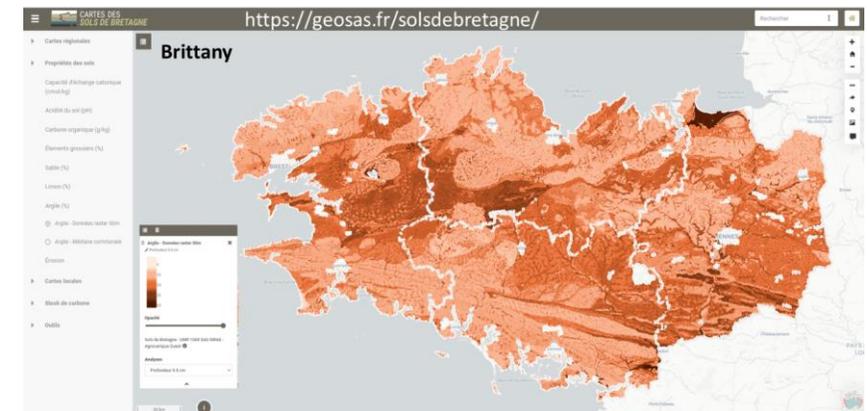


<https://ckan.openig.org/dataset/cartes-numeriques-de-proprietes-des-sols-en-languedoc-roussillon>



Cartographie interactive de propriétés de sols en Bretagne

<https://geosas.fr/solsdebretagne/>



# Le Centre d'Expertise Scientifique « Cartographie Numérique des Sols » Theia

## Objectif 2 : Fédérer et capitaliser les efforts en méthodologies et sur les algorithmes

→ faire progresser les méthodes de cartographie numérique, depuis l'échantillonnage, le choix des covariables (dont celles issues de la télédétection), la modélisation, et jusqu'aux méthodes de validation.

## Objectif 3 : Transférer le savoir-faire vers l'opérationnel

Site de vulgarisation :

<https://cartograph-e.hub.inrae.fr/>

Formation francophone en projet pour 2025





# La télédétection pour cartographier les sols

# Rétrospective historique & principes généraux

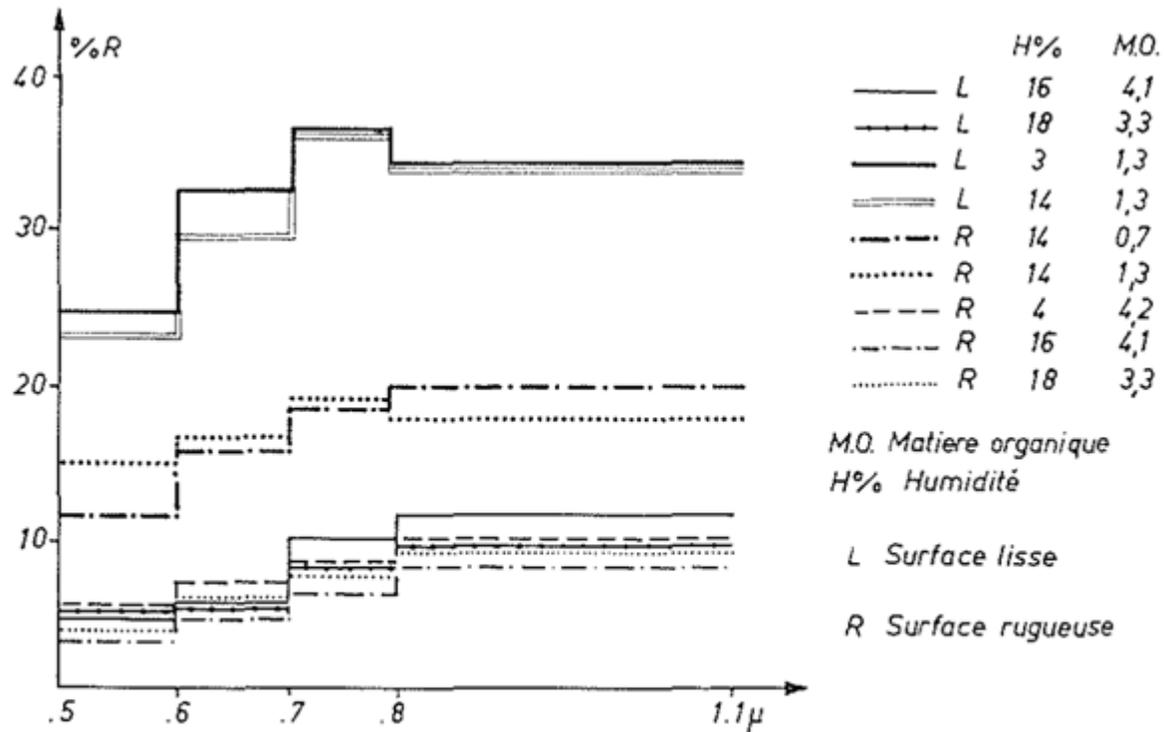


Figure 1 – Courbes de réflectance de sols peu ou pas organiques

Girard, 1978. Emploi de la télédétection pour l'étude de l'humidité des Sols. *Houille Blanche*, 64, 533–539, doi:[10.1051/lhb/1978044](https://doi.org/10.1051/lhb/1978044)

# Notion d'état de surface de sol

« composition et organisation de la surface  
du sol à un instant donné »

R. ESCADAFAL, 1989



©UMR EGC-Equipe Sol, March 2012

VAUDOUR E., GIRARD MC., 2010, *Pédologie*, chapitre 23. In Girard MC et Girard CM, *Traitement des images de télédétection*, Dunod, Paris.

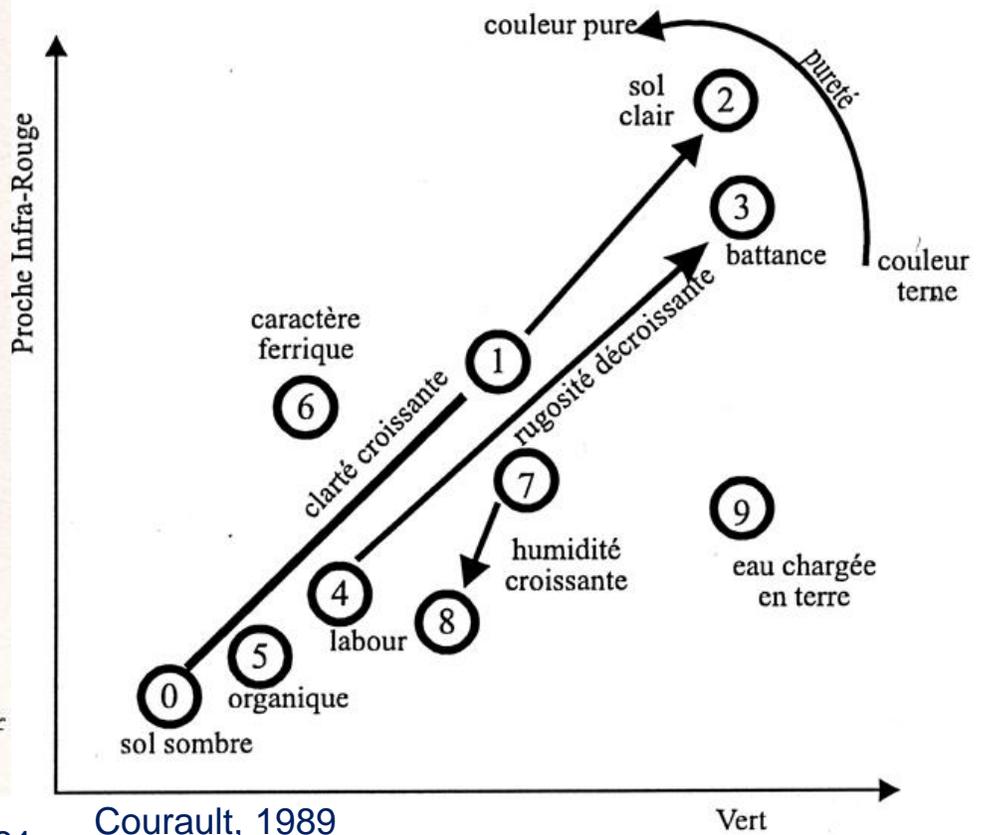


# Comportements et indices spectraux des sols



noir : végétation - blanc : eau

Figure IX - Index de brillance sur sols nus



Courault, 1989

Vert

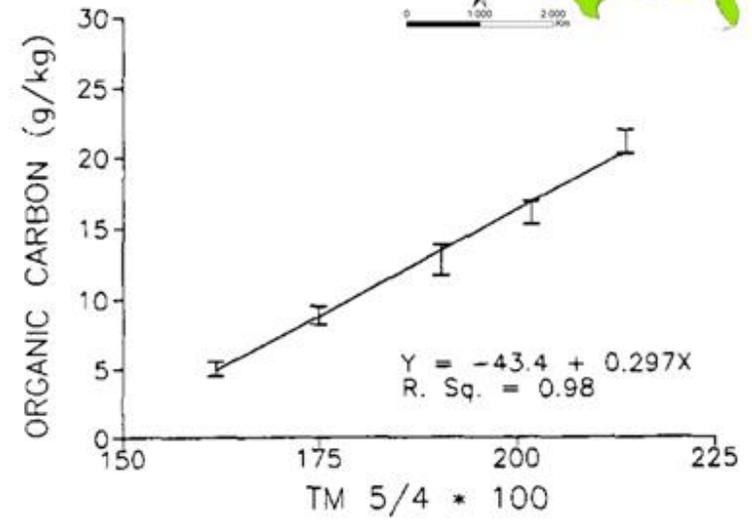


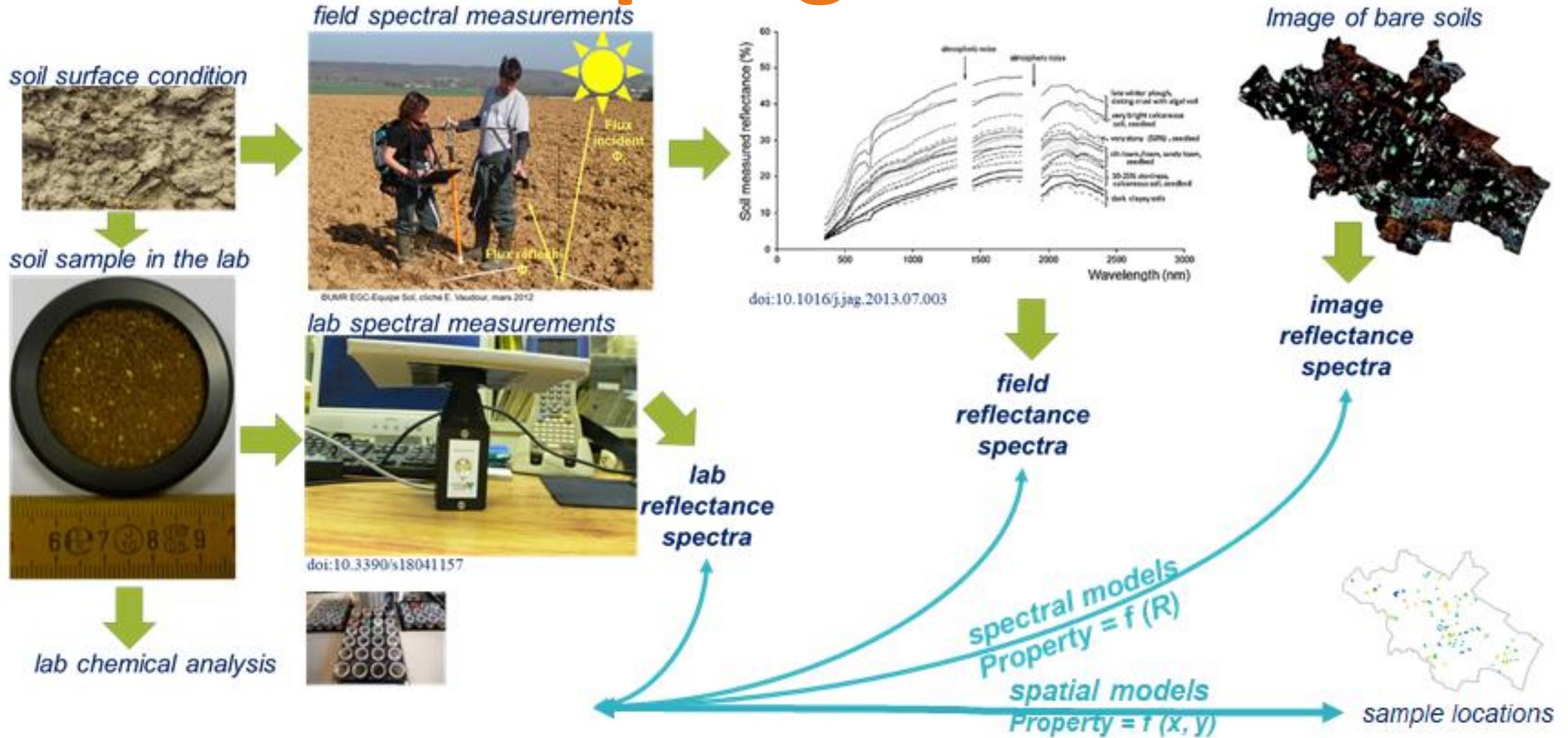
Figure 3. Regression line for organic carbon with TM 5/4. Error bars are standard error of the mean of soil samples.

Frazier et Cheng, 1989 Remote Sensing of Environment  
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90123-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90123-5)

SAINT et al., symp int Avignon 1981

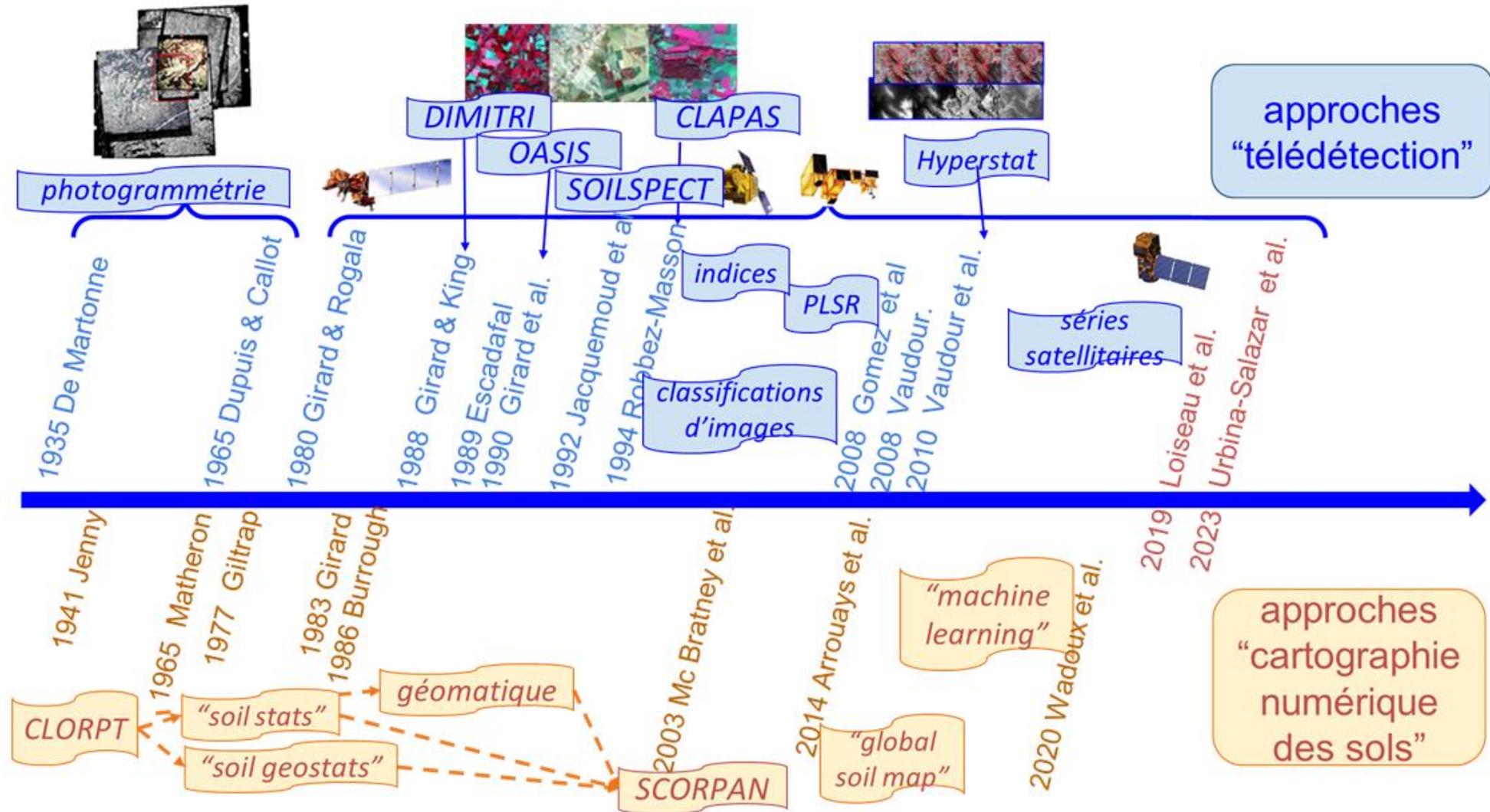


# Principes généraux

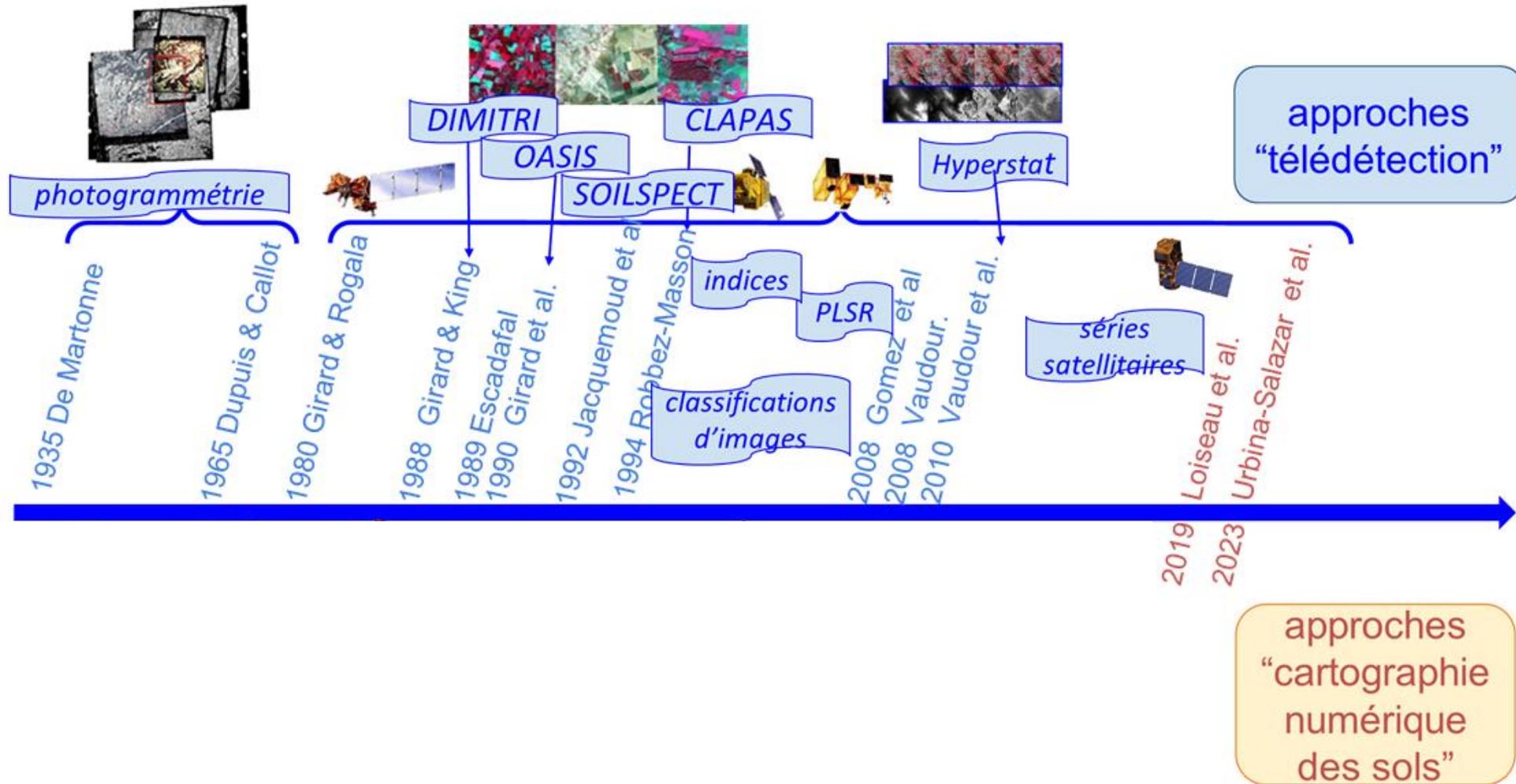


Vaudour et Wetterlind, 2021. *EJPSOIL Newsletter*

# Rétrospective historique



# Rétrospective historique





# COPERNICUS

#EUSpace

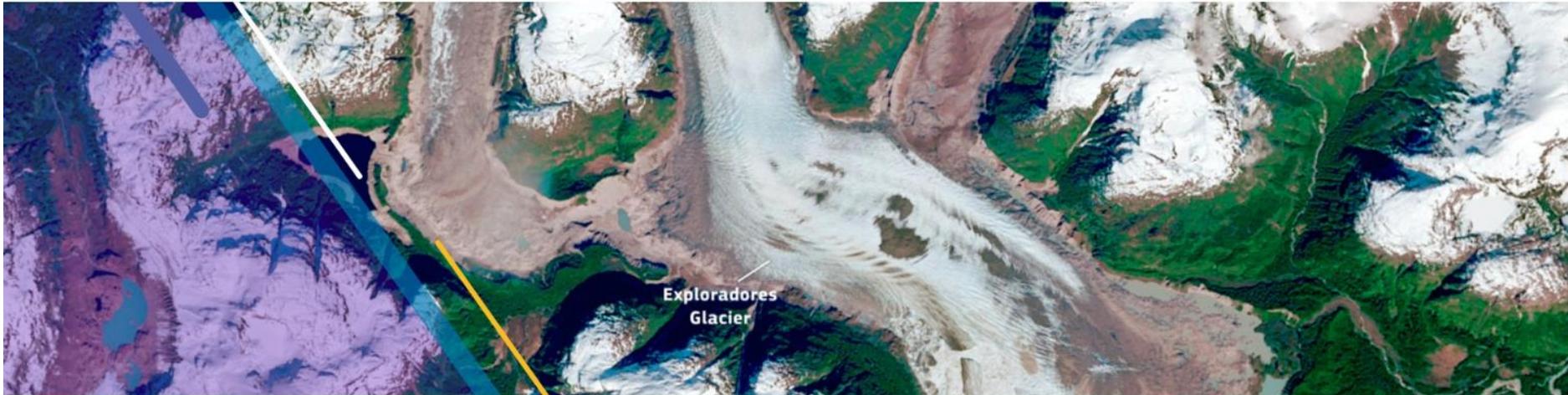
Médiathèque Agenda Actus Contact FAQ | Se connecter

Rechercher

Français



À propos Services Opportunités Accès aux données Library Cas d'utilisation

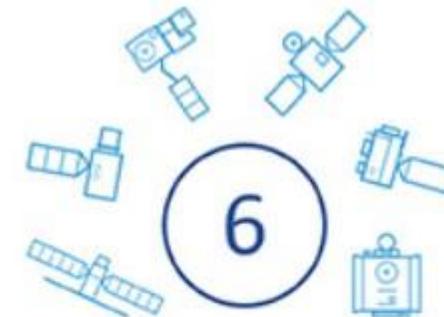


Accueil

View image information & credits

## Accès aux données

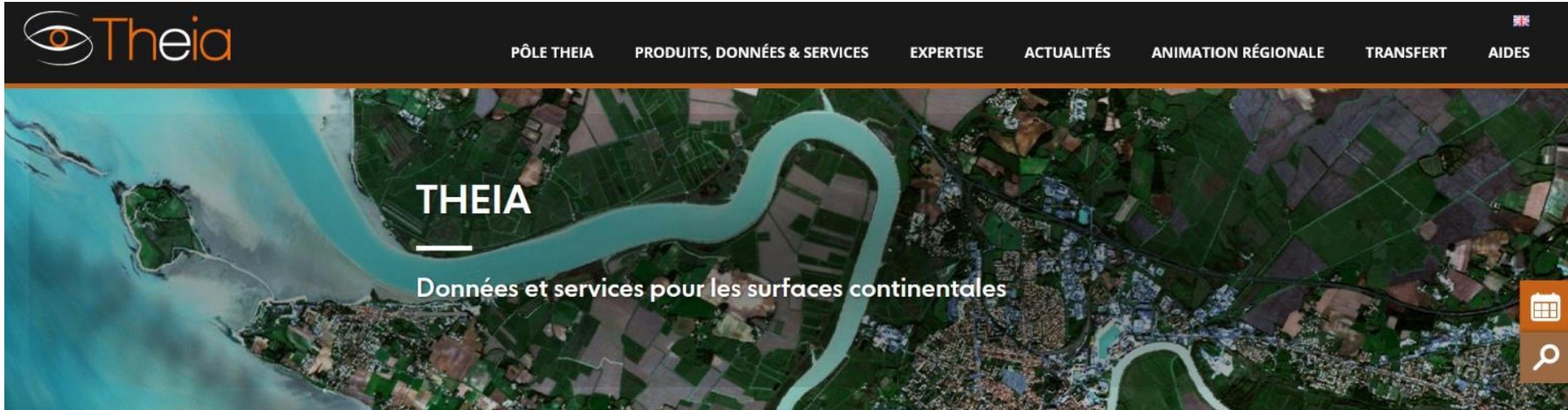
<http://www.copernicus.eu>



~30

Contributing missions from National, European or International organisations

# Theia



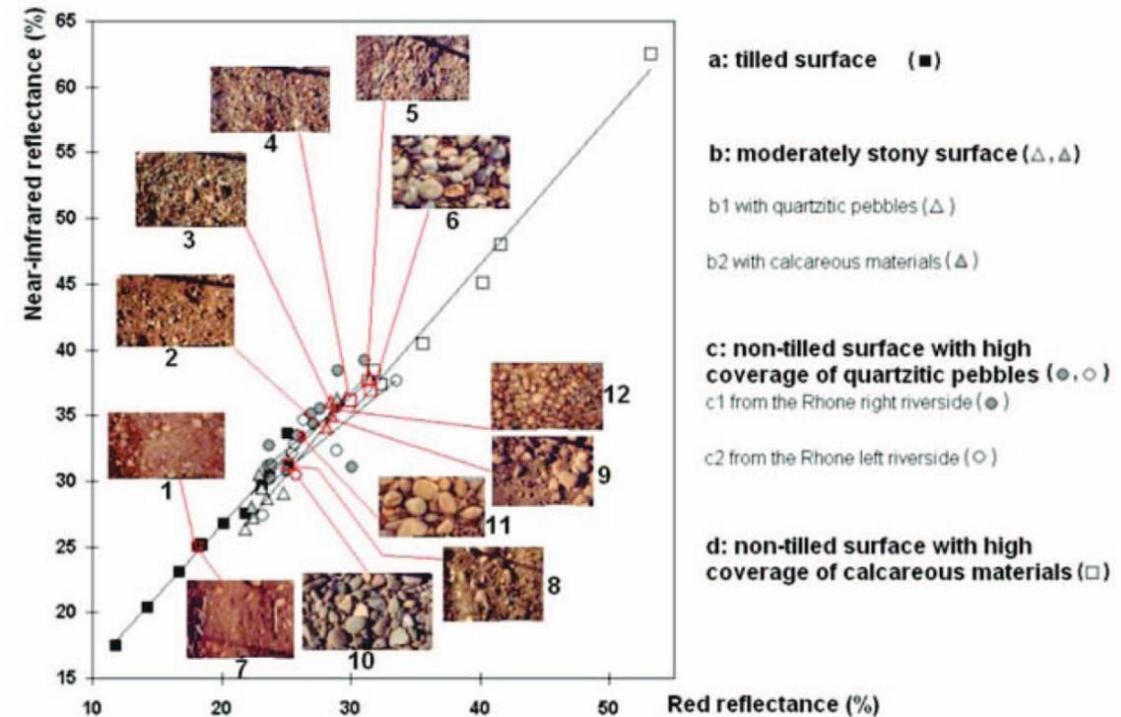
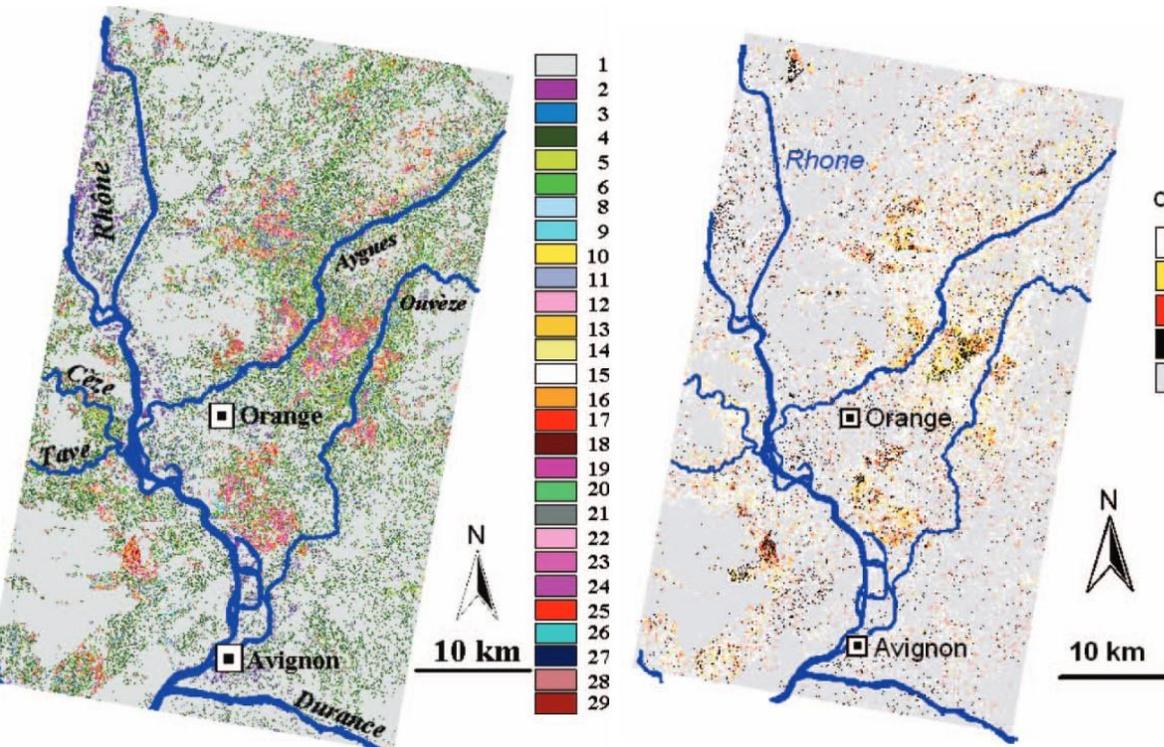
Theia en un schéma

A la une

<https://www.theia-land.fr>

# Les réalisations : types de sols

classification bayésienne par maximum de vraisemblance des sols viticoles rhodaniens

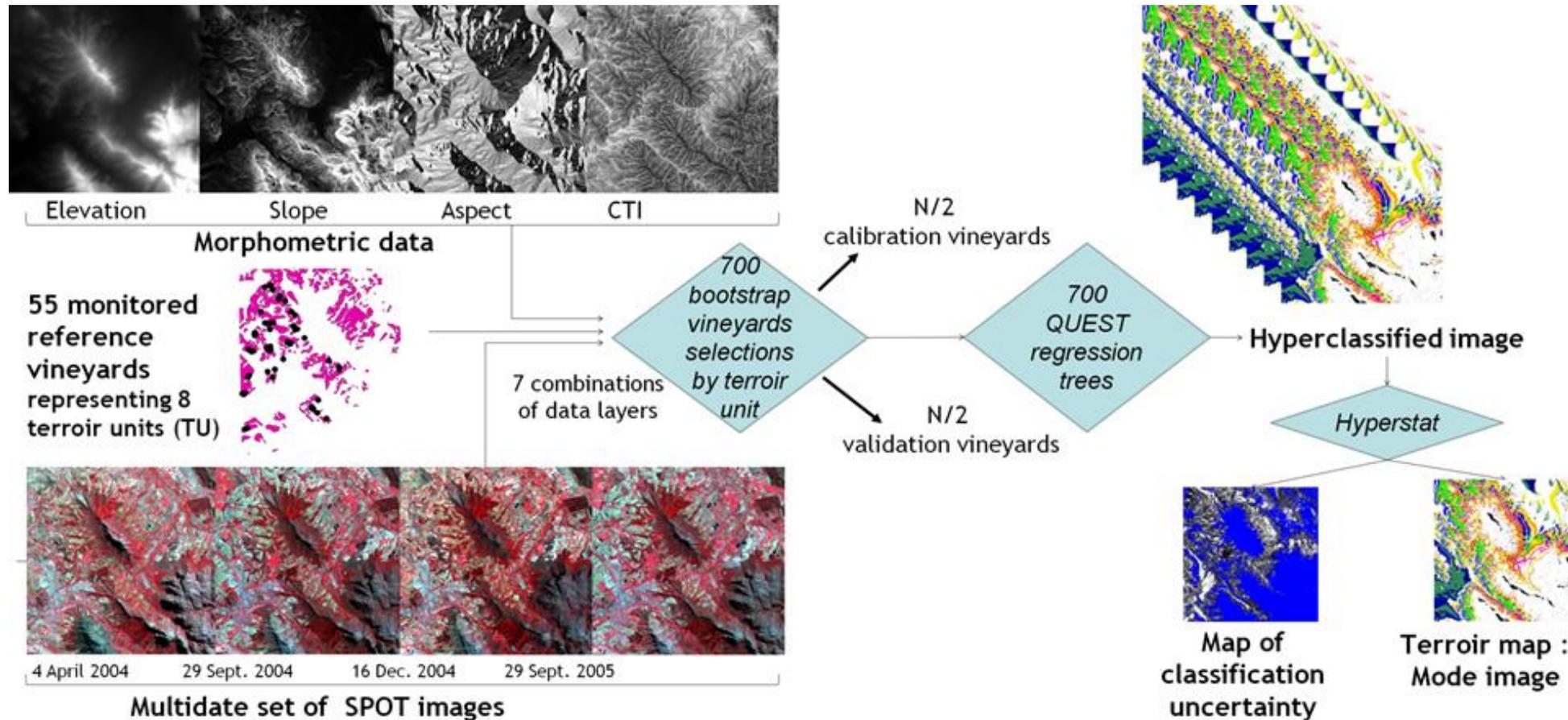


Vaudour, 2008

<https://doi.org/10.1080/10106040701207555>

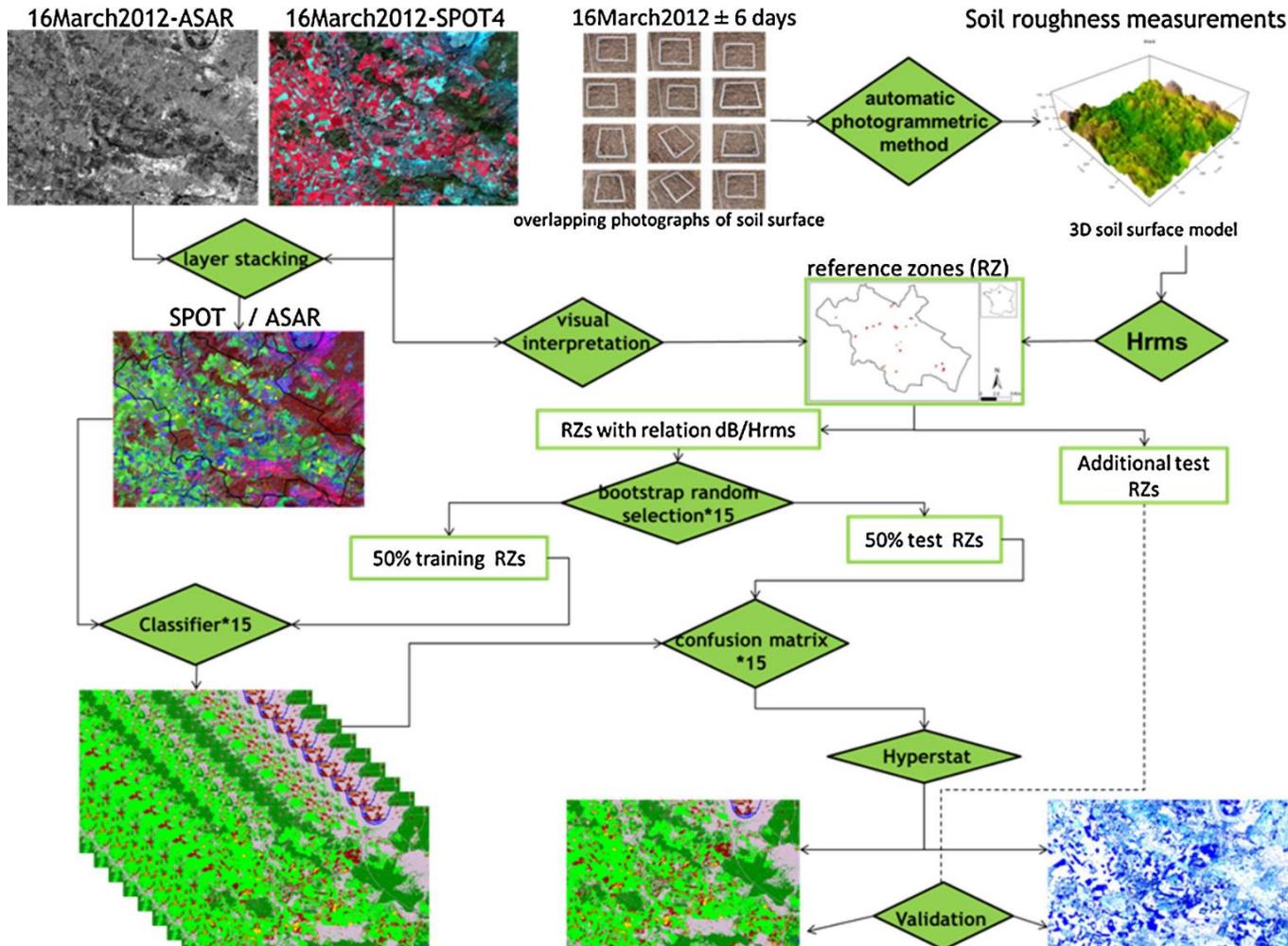
# Les réalisations : zones de gestion homogène de sols

## exemple de zonage viticole numérique par arbres de régression

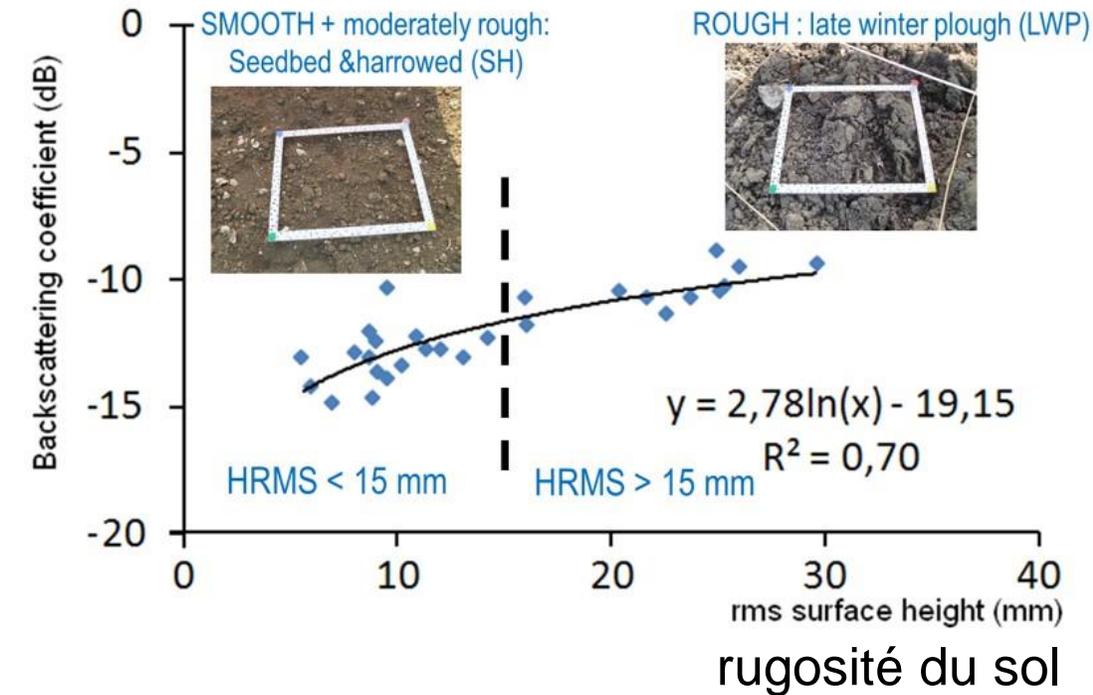


Vaudour *et al.*, 2010  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.001>

# Les réalisations : identification de la rugosité du sol en vue d'une cartographie des opérations de travail du sol



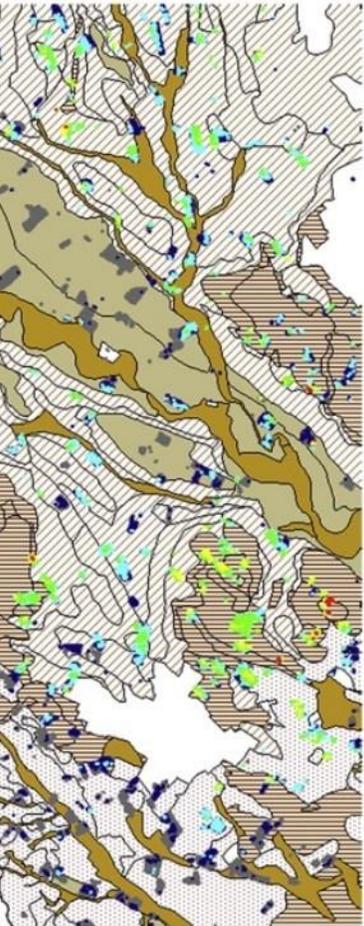
signal radar (bande C, 5,6 Ghz, polarisation HH)



Vaudour *et al.*, 2014  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.005>

# Les réalisations : propriétés de sols via imagerie aéroportée hyperspectrale

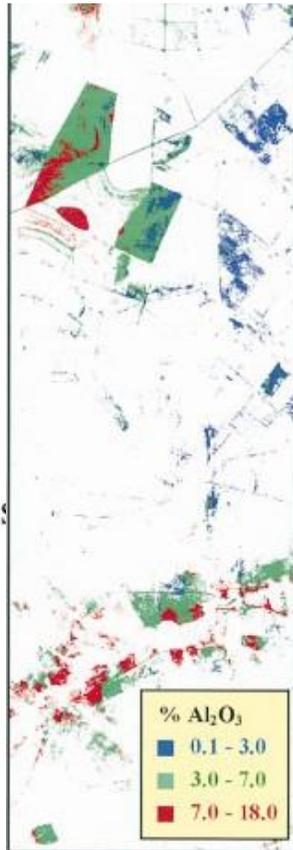
CaCO<sub>3</sub>  
(g/kg)



Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)

Galvao et al., 2001

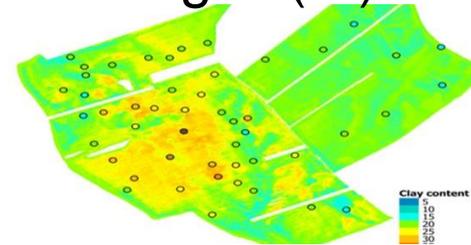
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00170-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00170-X)



TiO<sub>2</sub> (%)



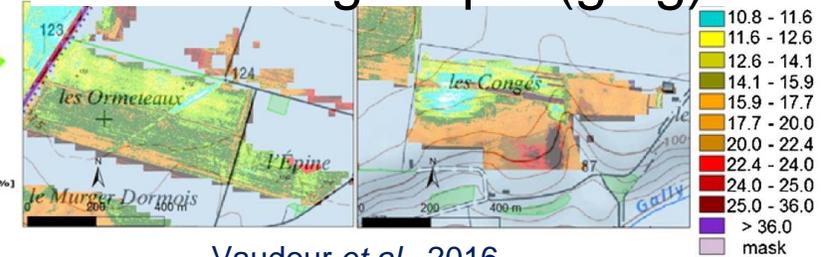
argile (%)



Gholizadeh et al., 2018

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.015>

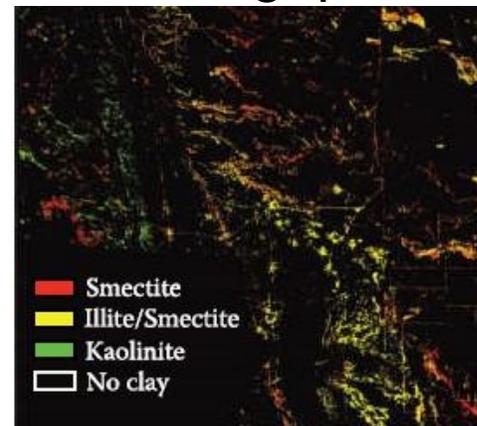
carbone organique (g/kg)



Vaudour et al., 2016

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.01.005>

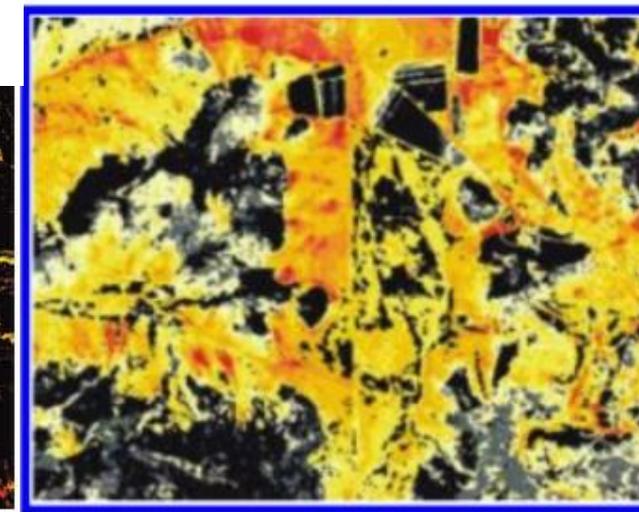
argiles  
minéralogiques



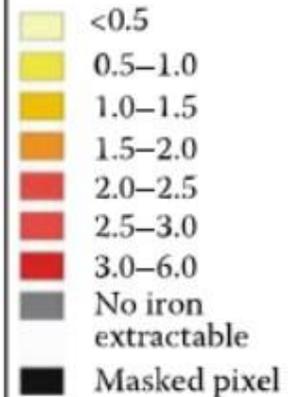
Chabrilat et al., 2002

[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00060-3)

fer (%)



fer (%)



Richter et al., 2007

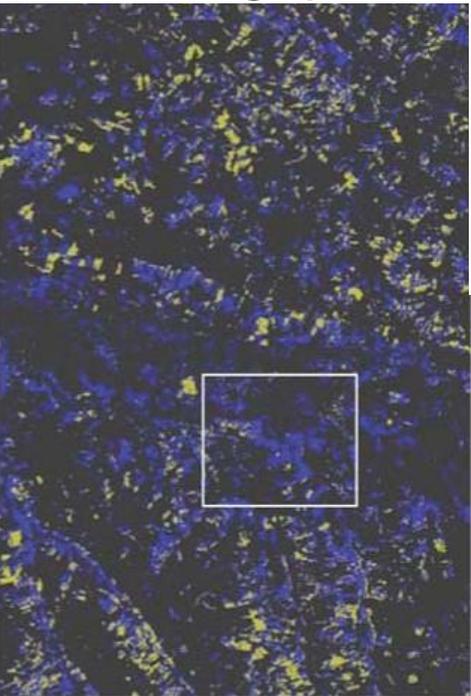
<https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0025>

Gomez et al., 2012

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.023>

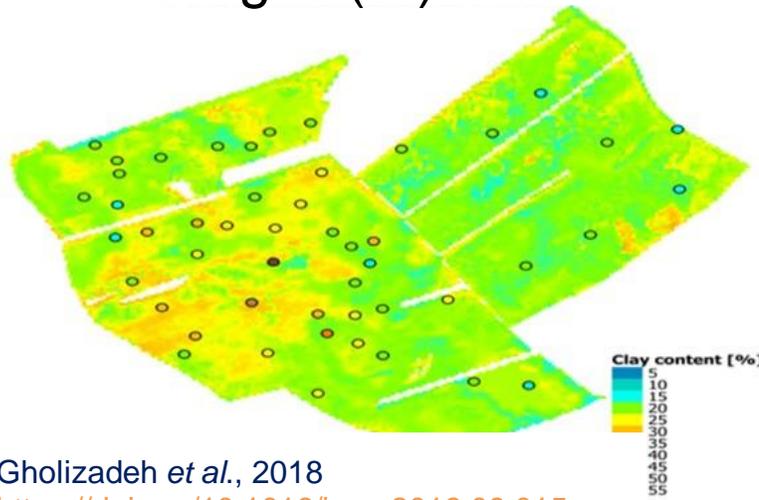
# Les réalisations : propriétés de sols via imagerie multispectrale mono-date

argiles minéralogiques



Bourguignon *et al.*, 2007  
<https://doi.org/10.1144/SP283.10>

argile (%)



Gholizadeh *et al.*, 2018  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.015>

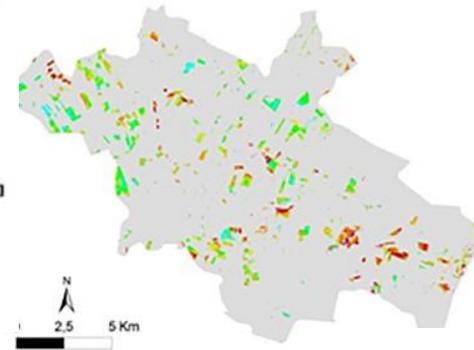
- Illite
- Chlorite

SOC (g/Kg)



Castaldi *et al.*, 2019  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026>

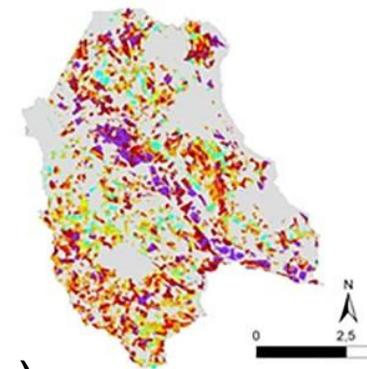
Versailles Plain



argile (g/Kg)

- [75-175[
- [175-220[
- [220-247[
- [247-275[
- [275-284[
- [284-311[
- [311-329[
- [329-347[
- [347-375[
- [375-411[
- [411-750[

La Peyne valley



argile (g/Kg)

- [0-220[
- [220-247[
- [247-275[
- [275-284[
- [284-311[
- [311-329[
- [329-347[
- [347-375[
- [375-411[
- [411-750[

SOC (g/Kg)

- [9-10.6[
- [10.6-11.9[
- [11.9-13.1[
- [13.1-14.4[
- [14.4-15.7[
- [15.7-17.0[
- [17.0-19.5[
- [19.5-23.2[
- [23.2-45[

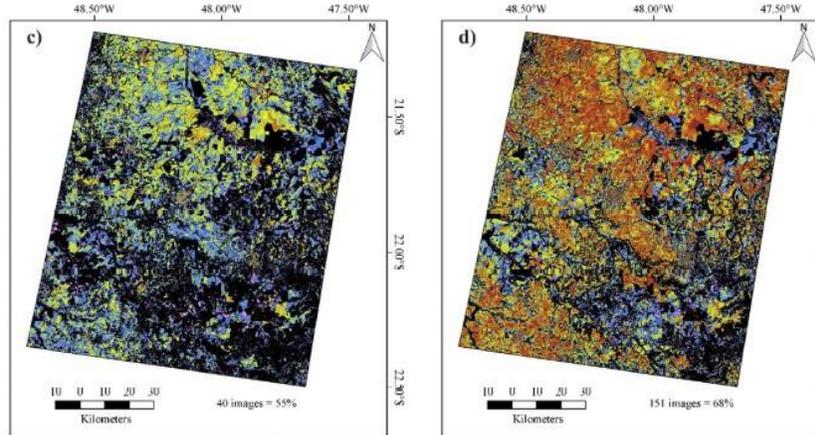
fer (%)

- [0-0.53[
- [0.53-0.79[
- [0.79-1.06[
- [1.06-1.32[
- [1.32-1.58[
- [1.58-2[
- [2-3.4[

Vaudour *et al.*, 2019  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.006>

# Les réalisations : réflectance du sol nu

## Dimension temporelle : mosaïque temporelle de sols nus

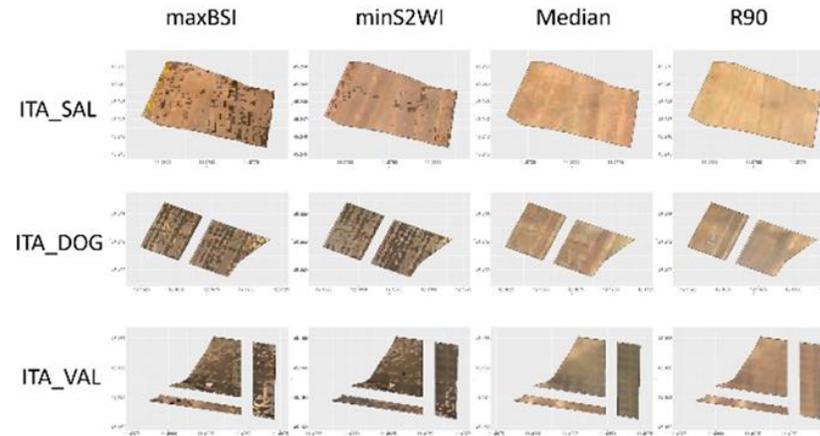


Number of overlapped pixels of bare soil during the time series



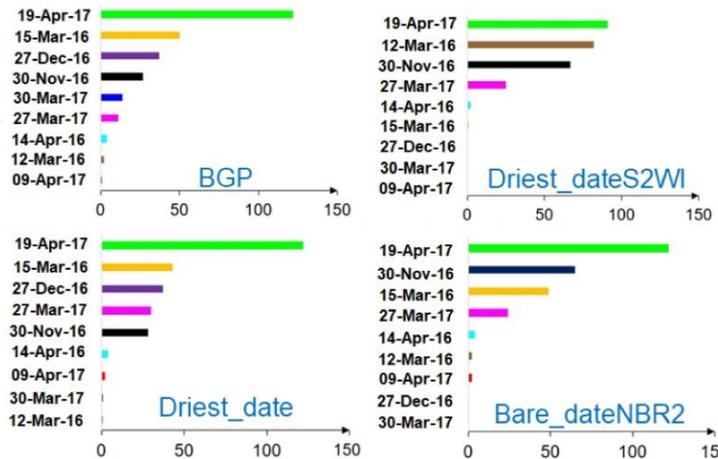
Dematté *et al.*, 2018

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.047>



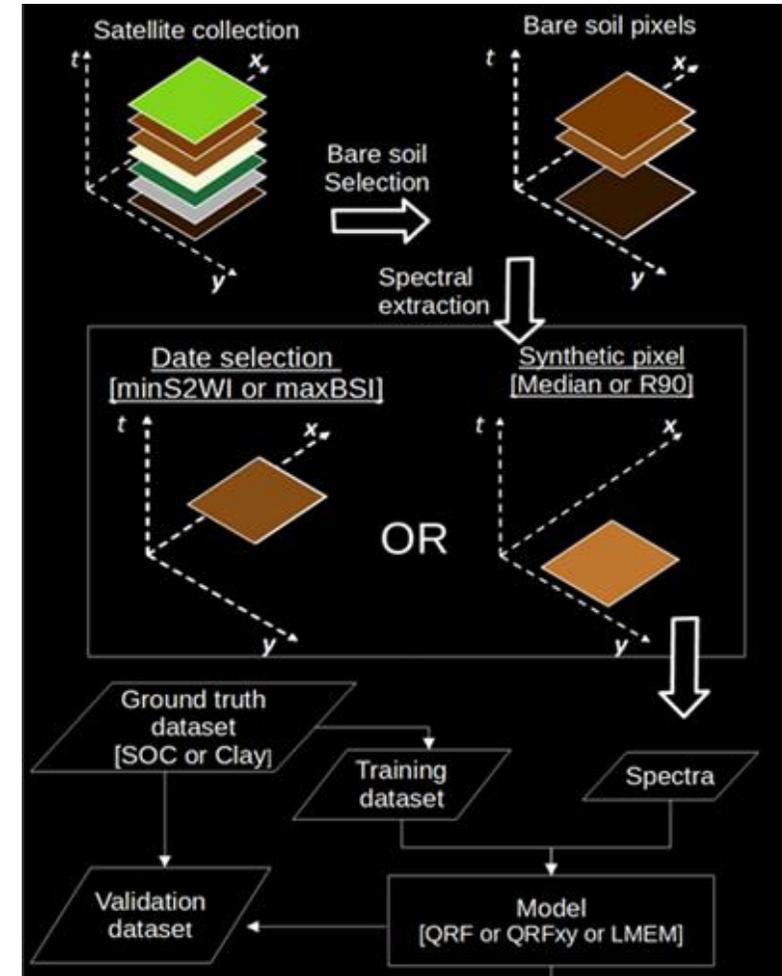
Castaldi *et al.*, 2023

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026>



Vaudour *et al.*, 2021

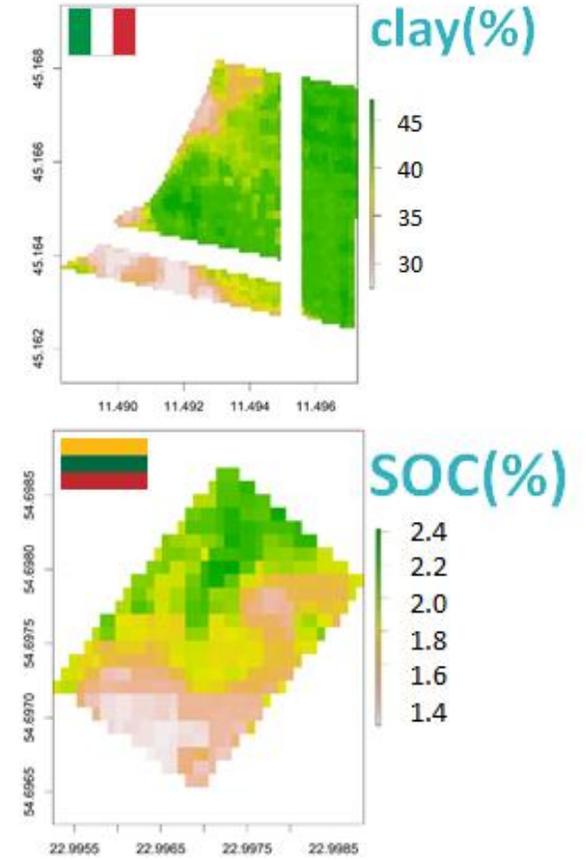
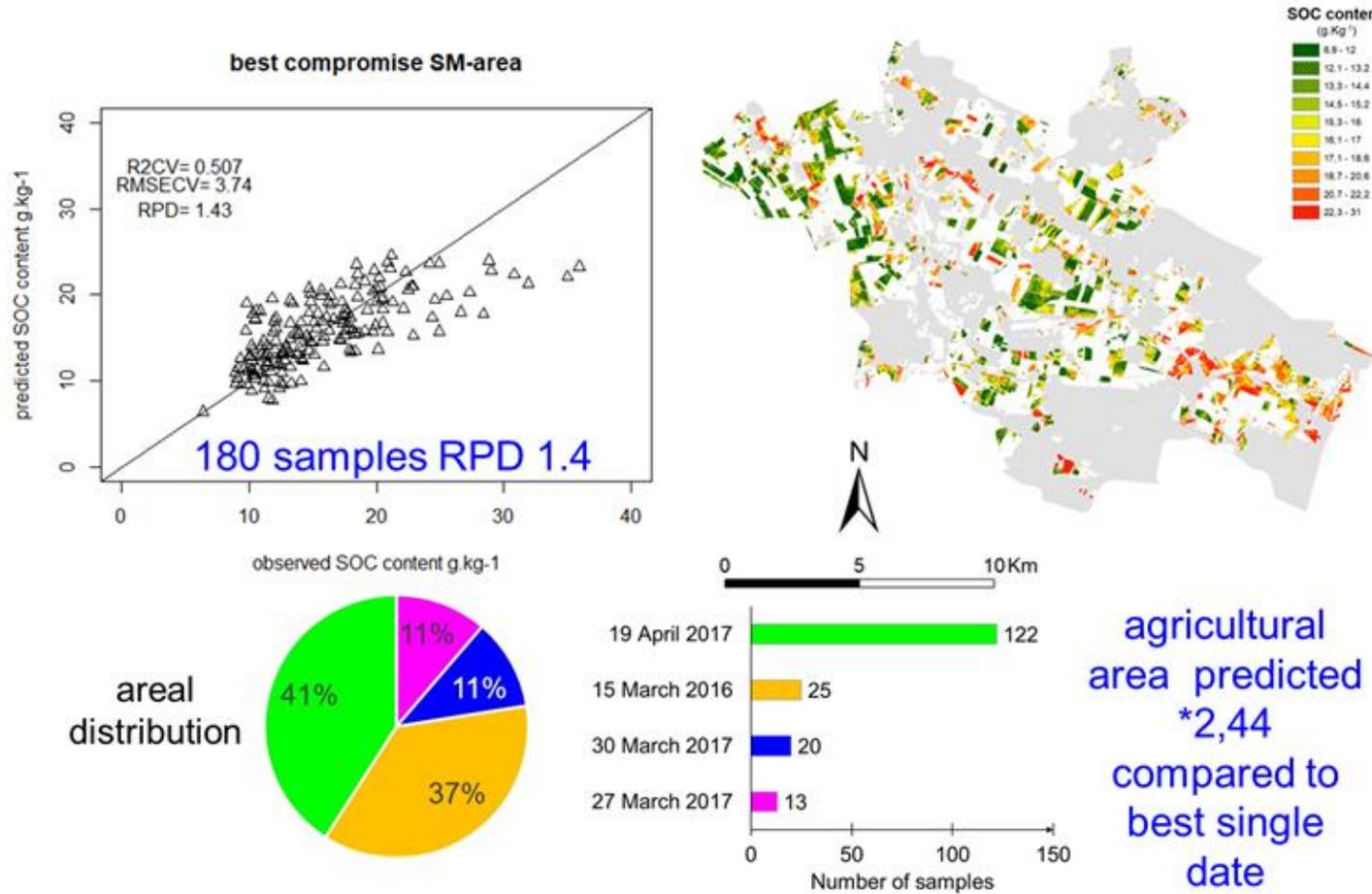
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102277>



Castaldi *et al.*, 2023

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026>

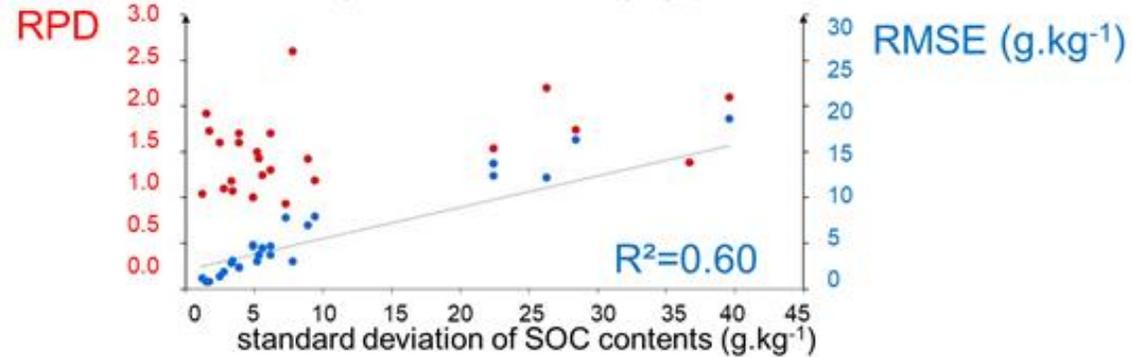
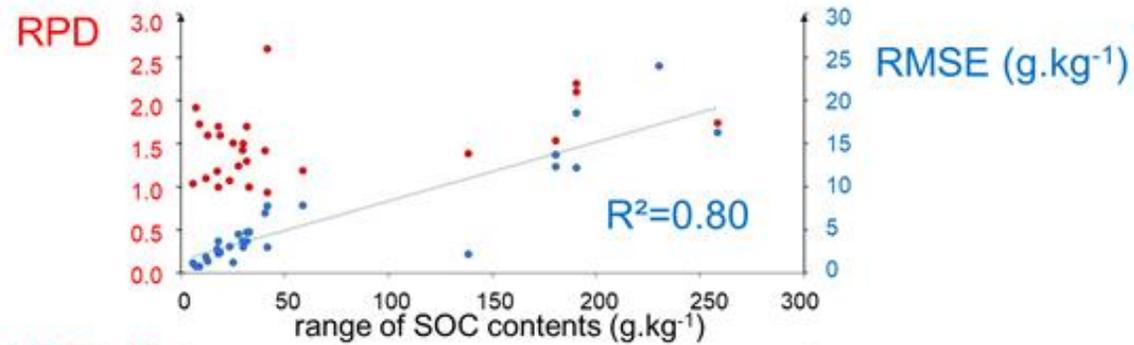
# Dimension temporelle : mosaïque temporelle de sols nus



Vaudour *et al.*, 2021  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102277>

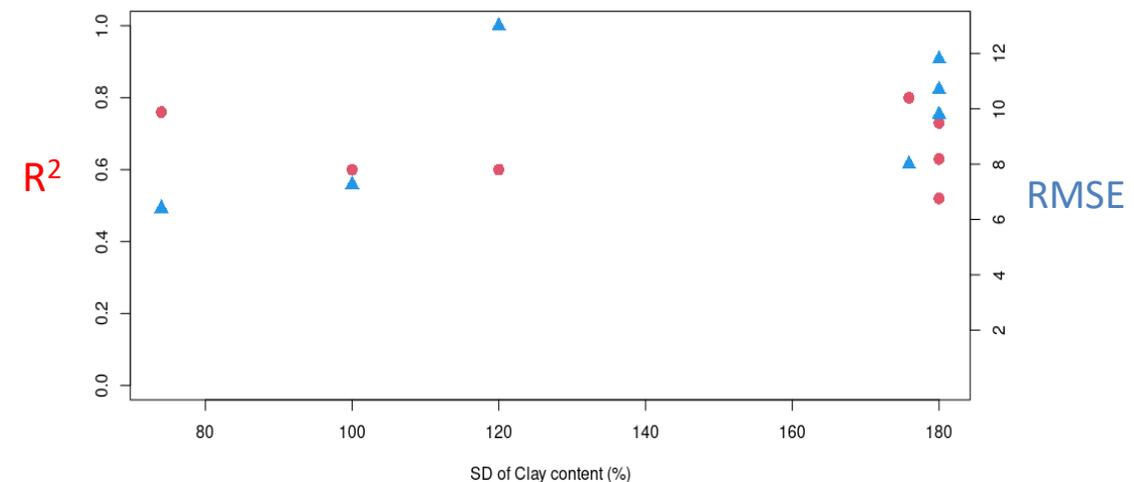
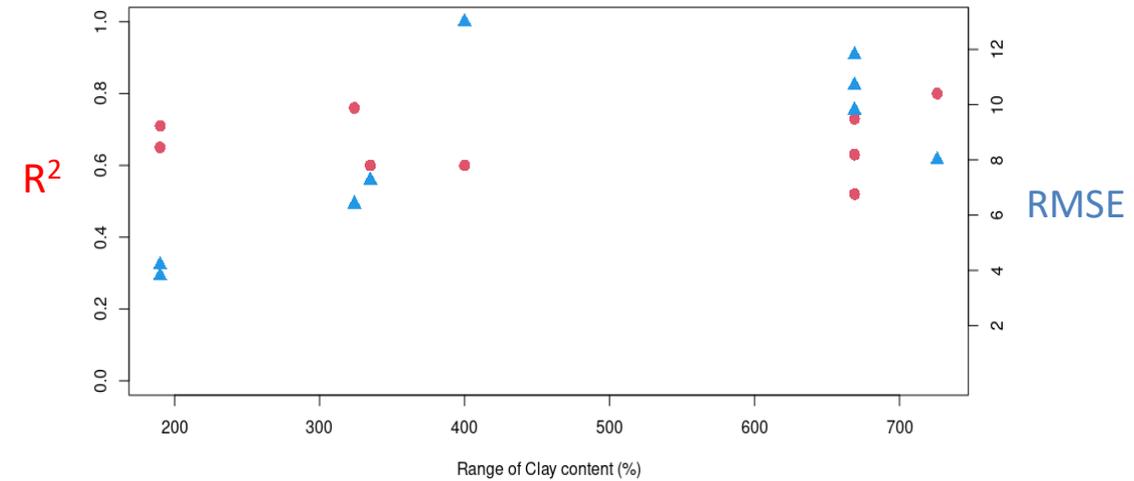
Castaldi *et al.*, 2023  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026>

# Une large gamme de performance de ces estimations quantitatives de propriétés de sols



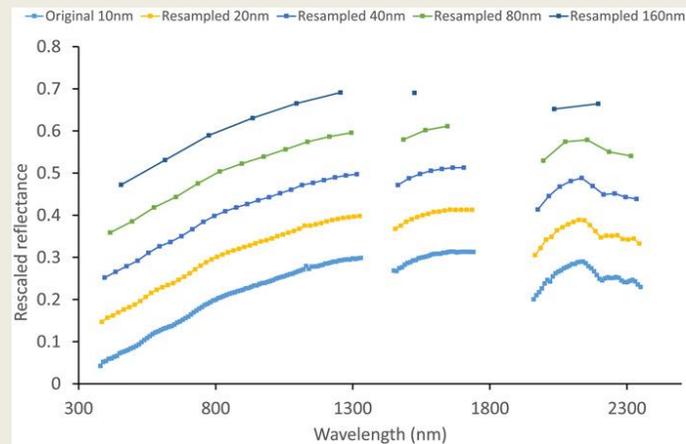
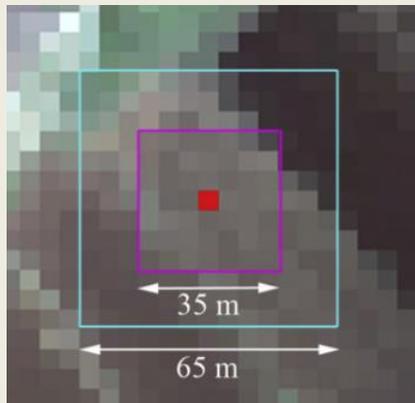
Vaudour *et al.*, 2022

<https://doi.org/10.3390/rs14122917>



# Des performances dépendantes de caractéristiques instrumentales & facteurs environnementaux

## Caractéristiques Instrumentales



Castaldi *et al.*, 2016

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.025>

## Facteurs Environnementaux

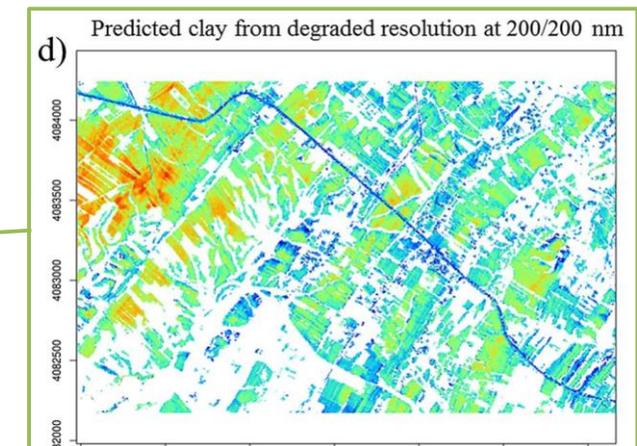
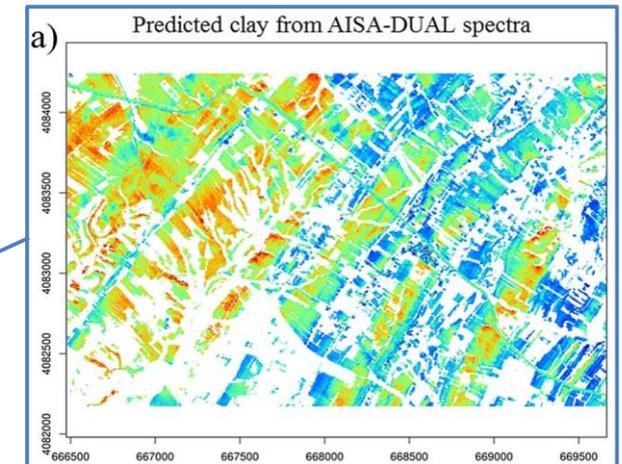


# Caractéristiques instrumentales :

## La résolution spectrale

Tests réalisés sur la prédiction du taux d'argile

Configuration name	$R_{cal}^2$	RMSEC (g/kg)	$R_{val}^2$	RMSEP (g/kg)
AISA-DUAL	0.77	82	0.77	82
~5/10 (EnMAP)	0.73	90	0.78	81
~10/10 (HYPXIM/HyspIRI/HYPERION)	0.75	88	0.73	90
~37/37	0.74	88	0.74	90
~60/60	0.75	85	0.71	93
~100/100	0.75	87	0.71	94
~200/200	0.35	139	0.01	173



Adeline *et al.*, 2018

<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.010>

Gomez *et al.*, 2018

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.047>

# Facteurs environnementaux

## Conditions atmosphériques et impact des modèles de corrections

Tests réalisés sur la prédiction du taux d'argile



		S2 acquisition date (DD-MM-YYYY)			
		03-02- 2017	16-02- 2017	23-02- 2017	26-02- 2017
MAJA	$R_{CV}^2$	0.62	0.63	0.62	0.61
Sen2Cor	$R_{CV}^2$	0.62	0.63	0.62	0.60
LaSRC	$R_{CV}^2$	0.63	0.62	0.62	0.59

# Facteurs environnementaux

## Conditions de surface (rugosité, humidité, végétation)

Tests réalisés sur la prédiction du taux d'argile

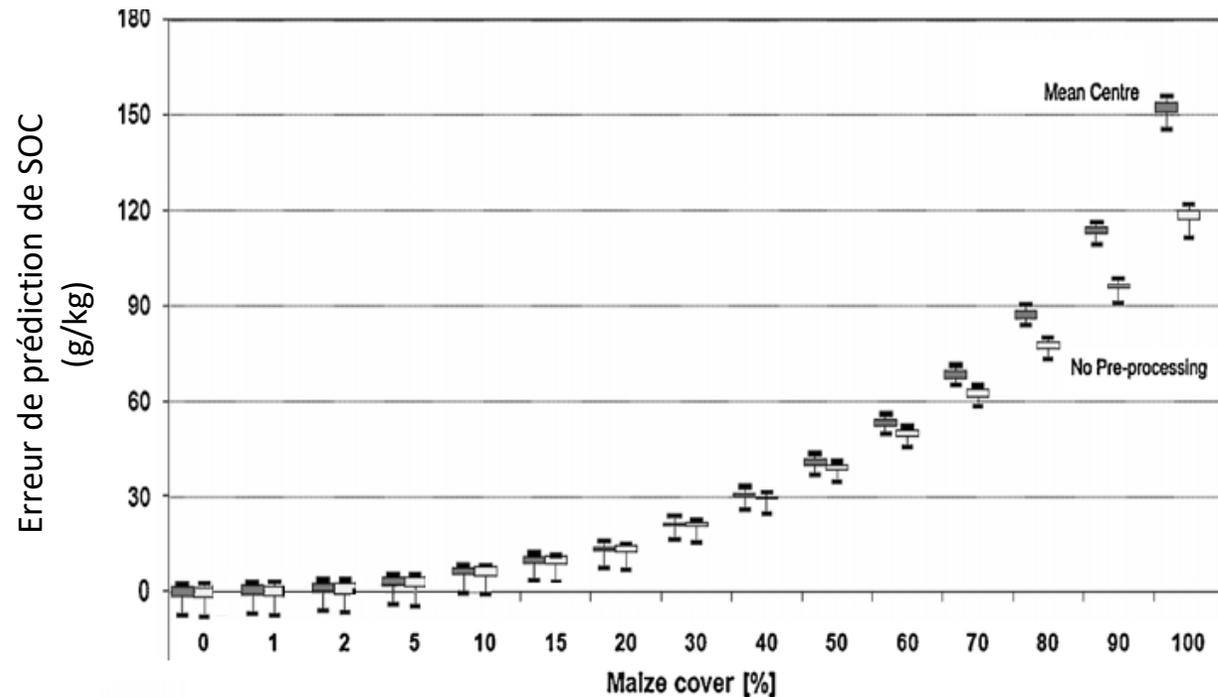
		S2 acquisition date (DD-MM-YYYY)										
		03-02-2017	16-02-2017	23-02-2017	26-02-2017	08-03-2017	25-03-2017	28-03-2017	04-04-2017	24-04-2017	27-04-2017	07-05-2017
MAJA	$R_{CV}^2$	0.62	0.63	0.62	0.61	0.52	0.74	0.71	0.62	<b>0.80</b>	0.73	0.72
Sen2Cor	$R_{CV}^2$	0.62	0.63	0.62	0.60	0.50	0.76	0.72	0.62	<b>0.80</b>	0.74	0.72
LaSRC	$R_{CV}^2$	0.63	0.62	0.62	0.59	0.50	0.75	0.72	0.63	<b>0.77</b>	0.72	0.68



Gomez *et al.*, 2021  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115959>

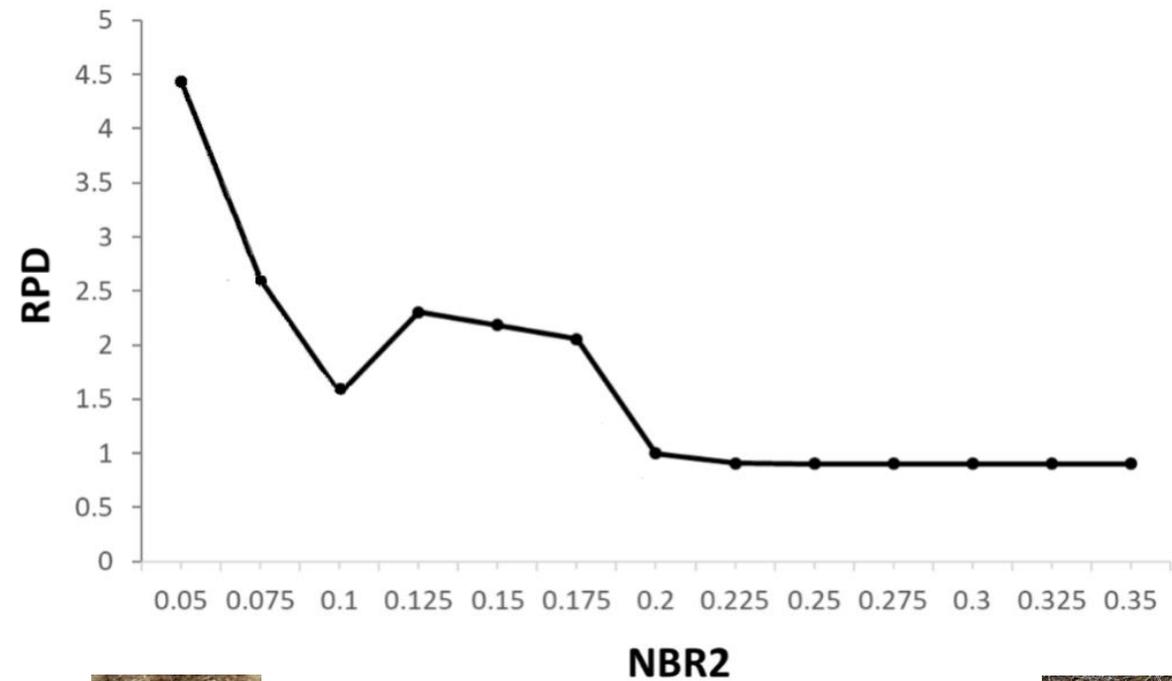
# Focus sur la végétation

Verte



Bartholomeus *et al.*, 2011  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.06.009>

Sèche



Castaldi *et al.*, 2019  
<https://www.mdpi.com/2072-4292/11/18/2121>



# Vers l'intégration de données de télédétection dans les approches de cartographie des sols par modélisation statistique (= DSM "Digital Soil Mapping")



photogrammétrie

1935 De Martonne

1965 Dupuis & Callot

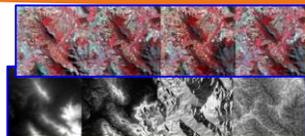


DIMITRI

OASIS

SOILSPECT

CLAPAS



Hyperstat

1980 Girard & Rogala

1988 Girard & King

1989 Escadafal

1990 Girard et al.

1992 Jacquemoud et al.

1994 Robbez-Masson

indices

PLSR

classifications d'images

2008 Gomez et al

2008 Vaudour.

2010 Vaudour et al.

séries satellitaires



2019 Loiseau et al.

2023 Urbina-Salazar et al.

approches "télédétection"

1941 Jenny

1965 Matheron

1977 Giltrap

1983 Girard

1986 Burrough

géomatique

"soil stats"

"soil geostats"

2003 Mc Bratney et al.

SCORPAN

2014 Arrouays et al.

GlobalSoilMap

2019

2023

approches "cartographie des sols par modélisation statistique"

## La cartographie numérique des sols = cartographie des sols par modélisation statistique

$$\text{Sol} = f(S, C, O, R, P, A, N) + \epsilon$$

d'après McBratney *et al.*, 2003  
Geoderma

Fonction de  
prédiction  
(modèles...)

Sol

Climat

Êtres  
vivants

Relief

Géologie/  
Lithologie

Temps  

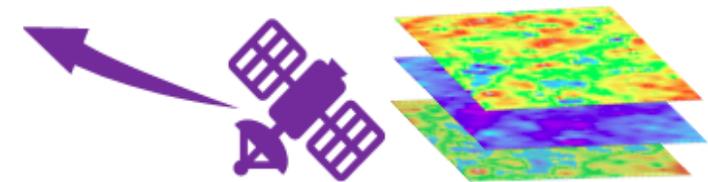

Localisation  
XY

Erreur  
estimée

Données spatiales sur les sols :  
sites observés/mesurés, cartes  
pédologiques

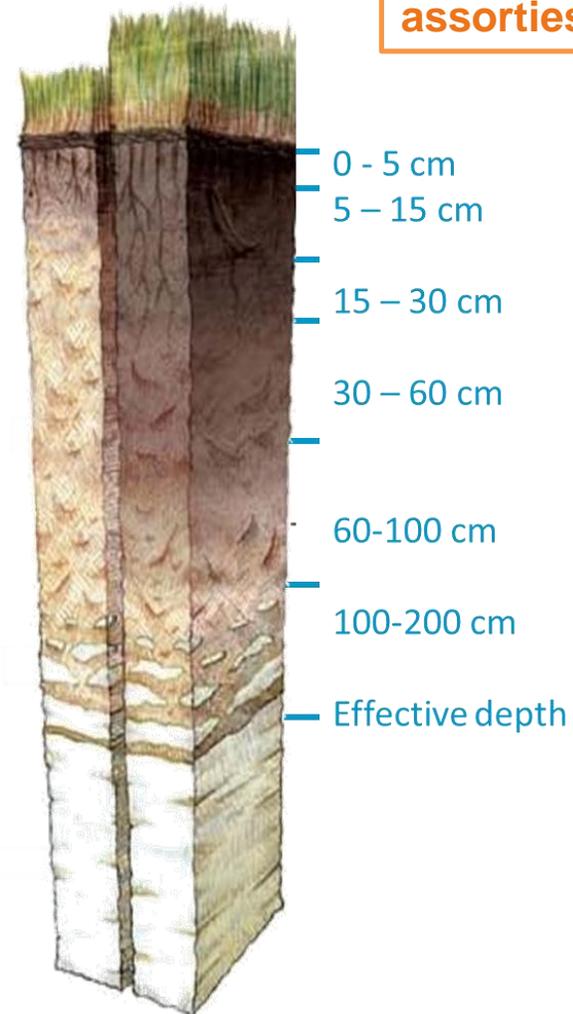
Données spatiales sur les déterminants  
de la variabilité des sols ou corrélées à  
cette variabilité (covariables)

**Cartes de prédiction de propriétés de sols (France entière ou  
régionales) + quantification de l'incertitude**

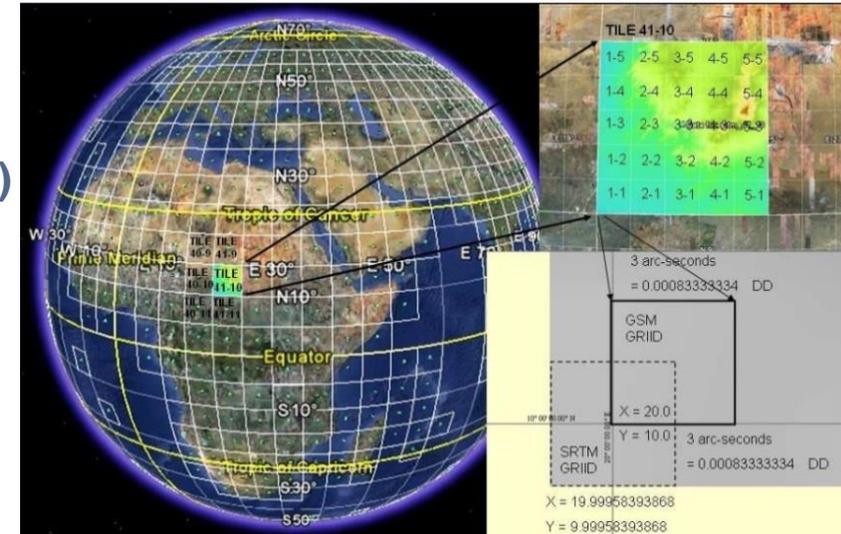


# GlobalSoilMap

Délivrer une base de données numériques de propriétés des sols du monde, au pas de 90x90m, assorties de leurs incertitudes, librement téléchargeable.



- Calé sur la grille SRTM -90-m
- Monde entier
- 18 milliards de points et de blocs (66,5 M en France)
- Prédiction ponctuelle et par cellule
- Des propriétés quantifiées
- Essentielles à la modélisation dans l'espace et le temps
- Evolutif avec l'intégration de nouvelles données ou de nouvelles méthodes
- Plus facile à harmoniser que les cartes conventionnelles
- Facile à croiser avec d'autres sources d'information spatiale



# Les spécifications du programme mondial *GlobalSoilMap*



Définir une zone d'intérêt

Assembler les covariables environnementales

Quelles sont les données pédologiques disponibles ?

Attribuer la qualité des données de sol et de la couverture dans l'espace covariable

Cartes des sols détaillées avec légendes et données ponctuelles de sol

Données ponctuelles de sol

Cartes des sols détaillées avec légendes

Pas de données sur les sols

Couverture complète ?

Oui

Non

SCORPAN  
Krigage

Couverture complète ?

Oui

Non

Cartes des sols :  
- Moyenne pondérée spatialement  
- Désagrégation spatiale  
Données de sol :  
- krigage SCORPAN

Extrapolation de domaines de référence :  
- Cartes des sols  
- Données ponctuelles de sol

- Moyenne pondérée spatialement  
- Désagrégation spatiale

Extrapolation de zones de référence  
Moyenne pondérée spatialement

Homosoil

Augmentation de l'incertitude dans les prévisions

(dépend de la qualité des données et de la complexité de la couverture du sol)

# La télédétection : des covariables dans le modèle SCORPAN

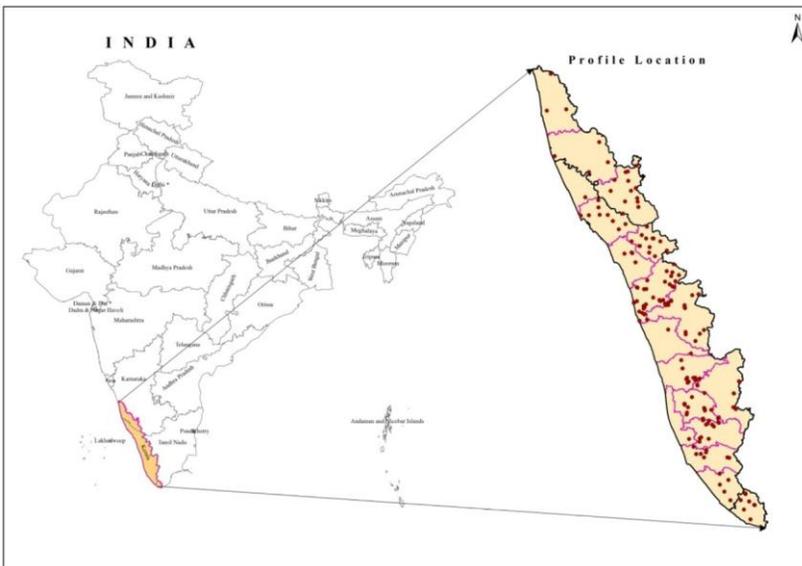
Table 3  
Summary, in chronological order, of previous quantitative scorpan-like studies in which soil classes and/or attributes were spatially predicted

Soil $S_{class}$	Predictive model ( $f$ )	Predictive factors						Study area spatial extent	No. of observations	Grid distance (m)		Location	Authors
		$S_{attribute}$	$s$	$c$	$o$	$r$	$p$			$a$	$n$		
Soil drainage classes	Linear regression							D3				USA	Troeh (1964)
	Linear regression	Soil horizon thickness, subsoil mottle, depth to mottle						D1	90		10	USA	Walker et al. (1968)
Soil classes	Discriminant analysis		×					D3	30	1000		USA	Pavlik and Hole (1977)
Soil classes	Modified principal component analysis (Escoufier, 1970)	Degree of podzolisation						D4	38		500	France	Legros and Bonneric (1979)
	Discriminant analysis, linear regression	Thickness of A horizon, depth to $CaCO_3$						D2	522	10, 50	10, 50	Canada	Pennock et al. (1987)
Soil classes	Clustering		×					D2				USA	Lee et al. (1988)
	Clustering and regression	Organic C, Fe/C						D2	32			USA	Frazier and Cheng (1989)
	Regression, kriging	Organic C, P						D2	172	15	15	USA	Bhatti et al. (1991)
	Ordination techniques	Soil morphological, physical and chemical properties	×					D2	194	2, 8	10	Australia	Odeh et al. (1991)
Soil classes			×					D2	194	2, 8	10	Australia	Odeh et al. (1992)
Soil drainage classes	Discriminant analysis							D3	305			USA	Bell et al. (1992, 1994)
	Ordination, GLM	Clay content, CEC, EC, pH, bulk density, COLE, $\theta$ at -10 and -1500 kPa						D3	224	300	100	Lower Macquarie Valley, Australia	McKenzie and Austin (1993)

McBratney *et al.*, 2003

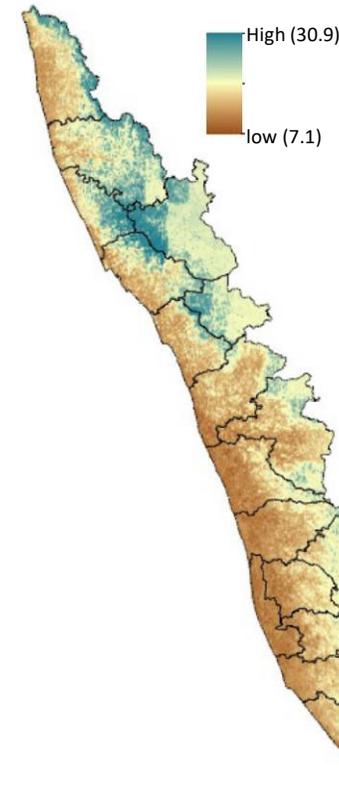
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)

# La télédétection : des covariables dans le modèle SCORPAN

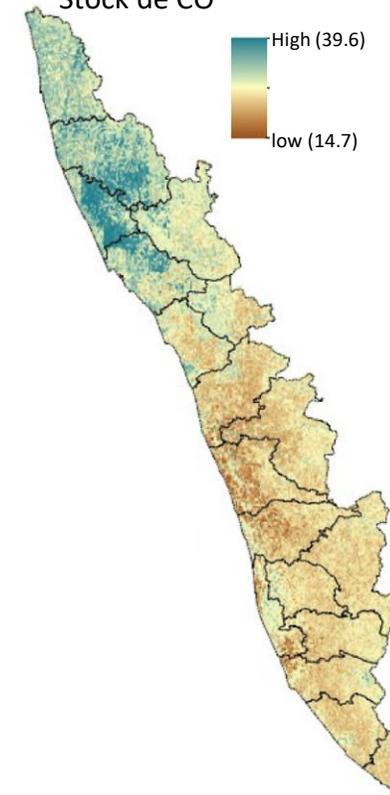


Cartographie du stock de CO

Carte de Stock de CO prédit



Carte des incertitudes de Stock de CO



## Covariables du modèle :

- Covariables “Classiques” dérivées d’un MNT SRTM, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

+

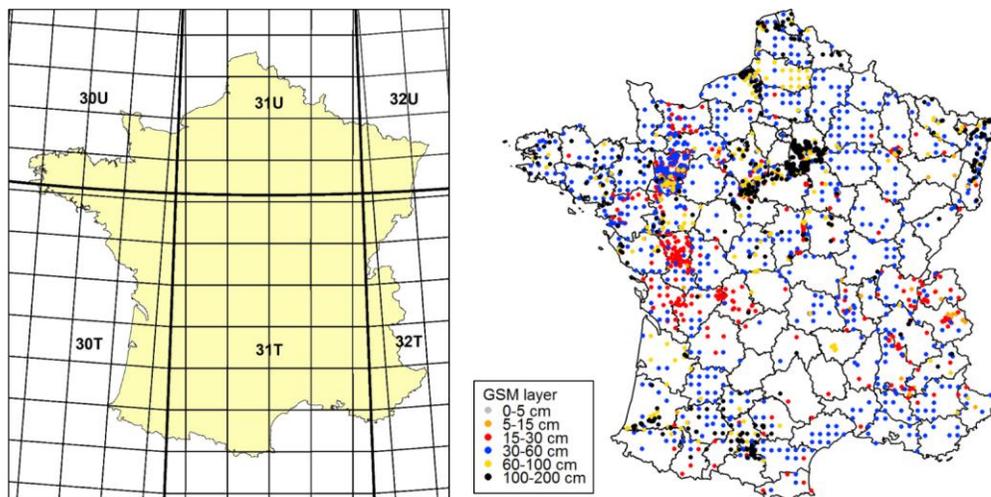
- Bandes spectrales LANDSAT

Dharumarajan *et al.*, 2021

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00387>

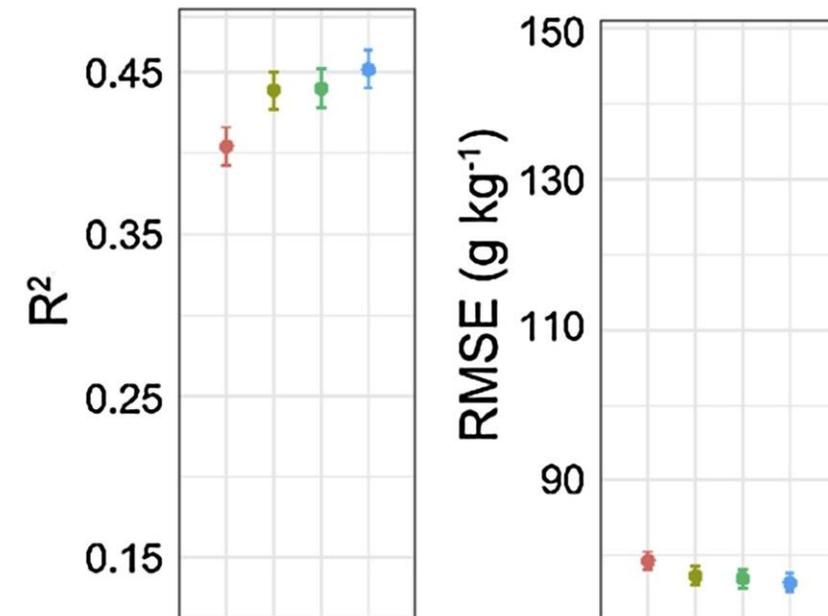
# La télédétection : des covariables dans le modèle SCORPAN

Cartographie de la teneur en Argile texturale



## Covariables du modèle :

- Covariables "Classiques" : dérivées d'un MNT IGN, OccSol, Climatique, géologie, ....
- +
- 11 indices spectraux issus de mosaïque de sol nu à partir d'images Sentinel-2 en période de semis (Mars & Dec) sur 2016-2017.



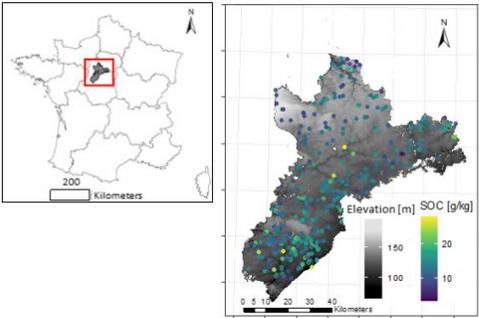
- Model 1: Without remote sensing data (22)
- Model 2: With BS mosaic data (56)
- Model 3: With FBS mosaic data (56)
- Model 4: With all co-variates (77)

Loiseau *et al.*, 2019

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101905>

# La télédétection : des covariables dans le modèle SCORPAN

Cartographie de la teneur en CO

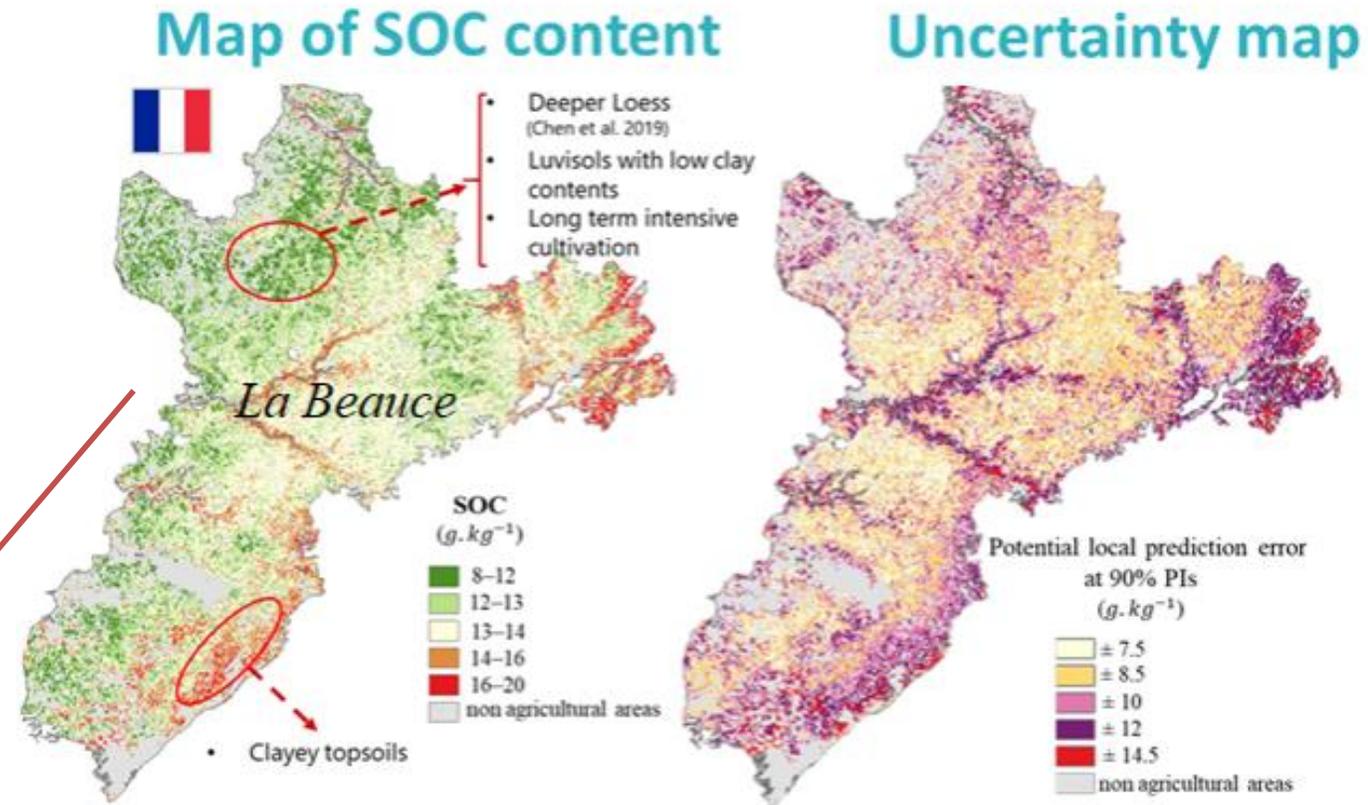


## Covariables du modèle :

- Test\_1 : Mosaïque de sol nu sur 2016-2021
- Test\_2 : Mosaïque de sol nu sur Fev-Mai 2016-2021
- Test\_3 : Mosaïque de sol nu sur Juil-Nov 2016-2021

+ Covariables "classiques"

Covariables dans les modèles		R <sup>2</sup>	Autres covariables dans les modèles	
Mosaïque de sol nu	sur 2016-2021	0.18	+ topo, position, matériel parental	0.26
	Fev-Mai 2016-2021	0.19		<b>0.33</b>
	Juil-Nov 2016-2021	0.11		0.27

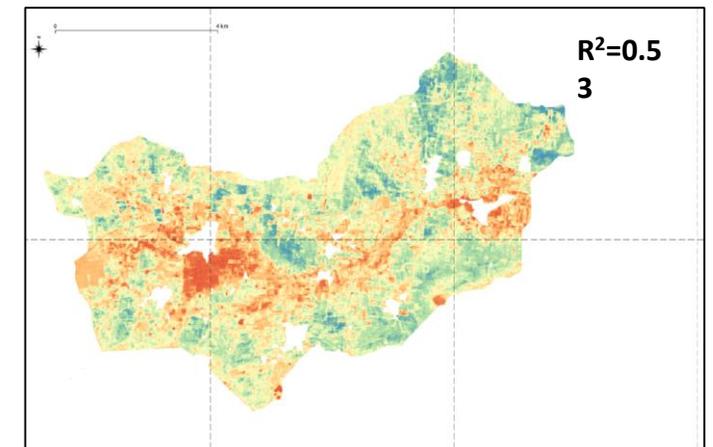
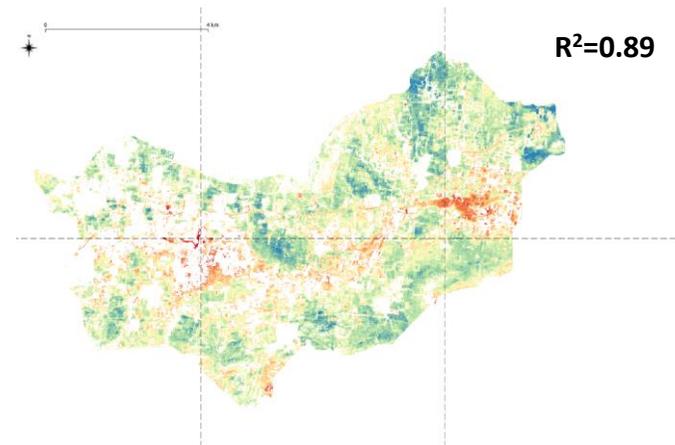
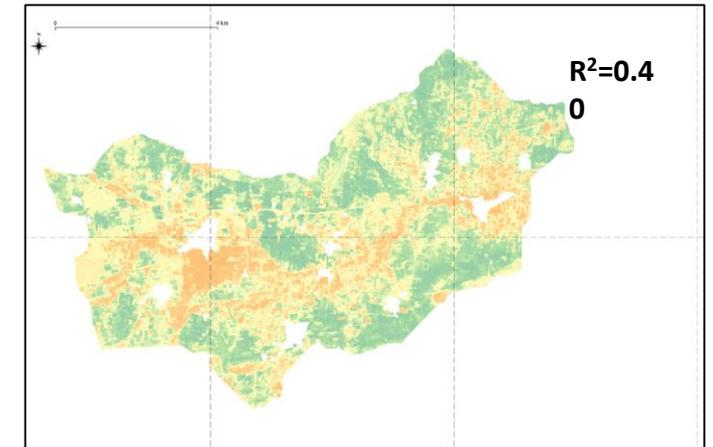
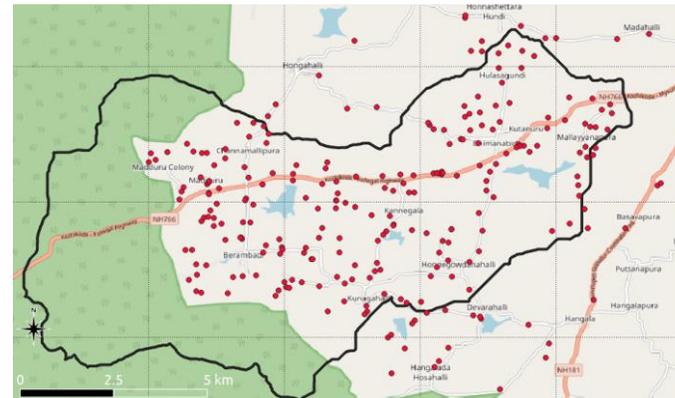


Urbina-Salazar et al., 2023  
<https://doi.org/10.3390/rs15092410>

# Prédictions par données de télédétection : des données de calage des modèles

## DSM

Cartographie de la teneur en Argile texturale

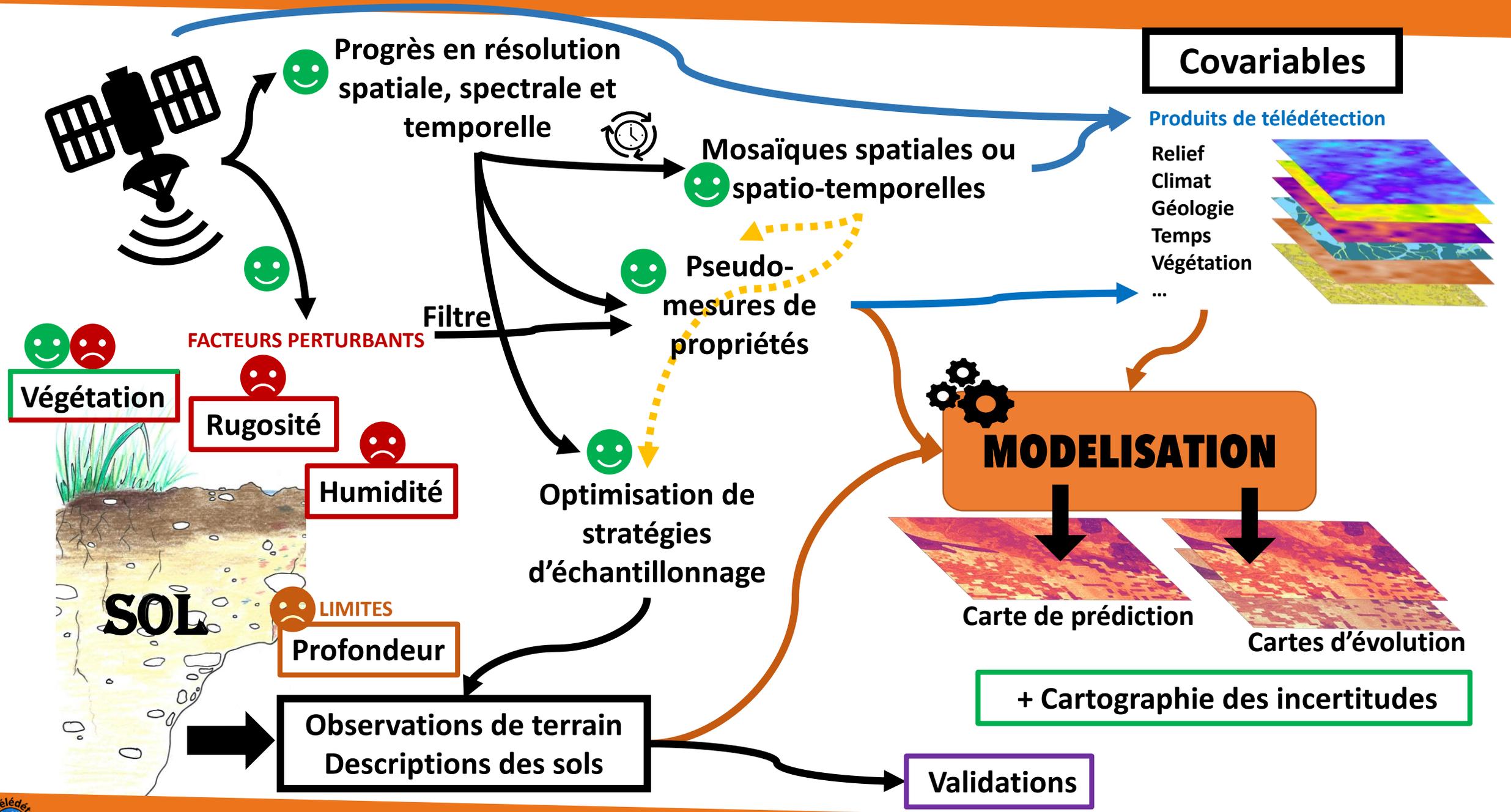


Covariables du modèle :

- Covariables “classiques” dérivé d’une MNT CartoSat & indice spectral NDVI
- + ● Bandes spectrales Sentinel 2

An aerial photograph of a rural landscape, likely agricultural fields, overlaid with a black grid representing soil classification. The grid cells vary in color, with shades of green, yellow, and brown, indicating different soil types or moisture levels. The word "Conclusion" is centered in large, bold, black font.

# Conclusion



# Merci pour votre attention

cecile.gomez@ird.fr

emmanuelle.vaudour@inrae.fr

anne.richer-de-forges@inrae.fr

Vidéo du webinaire sur : <https://reseau-teledetection.hub.inrae.fr/ressources/webinaires>

Plus d'informations :

Richer-de-Forges A.C., Chen Q., Baghdadi N., Chen S., Gomez C., Jacquemoud S., Martelet G., Mulder V.L., Urbina-Salazar D., Vaudour E., Weiss M., Wigneron J.-P., Arrouays D. (2023). **Remote Sensing Data for Digital Soil Mapping in French Research - A review.** Remote Sensing. 15, 3070. Special Issue Remote Sensing for Soil Mapping and Monitoring <https://doi.org/10.3390/rs15123070>

