



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-04313476v1>

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.



LISAH

ECOSYS

INRAE

Theia
Pôle Thématique
Surfaces Continentales

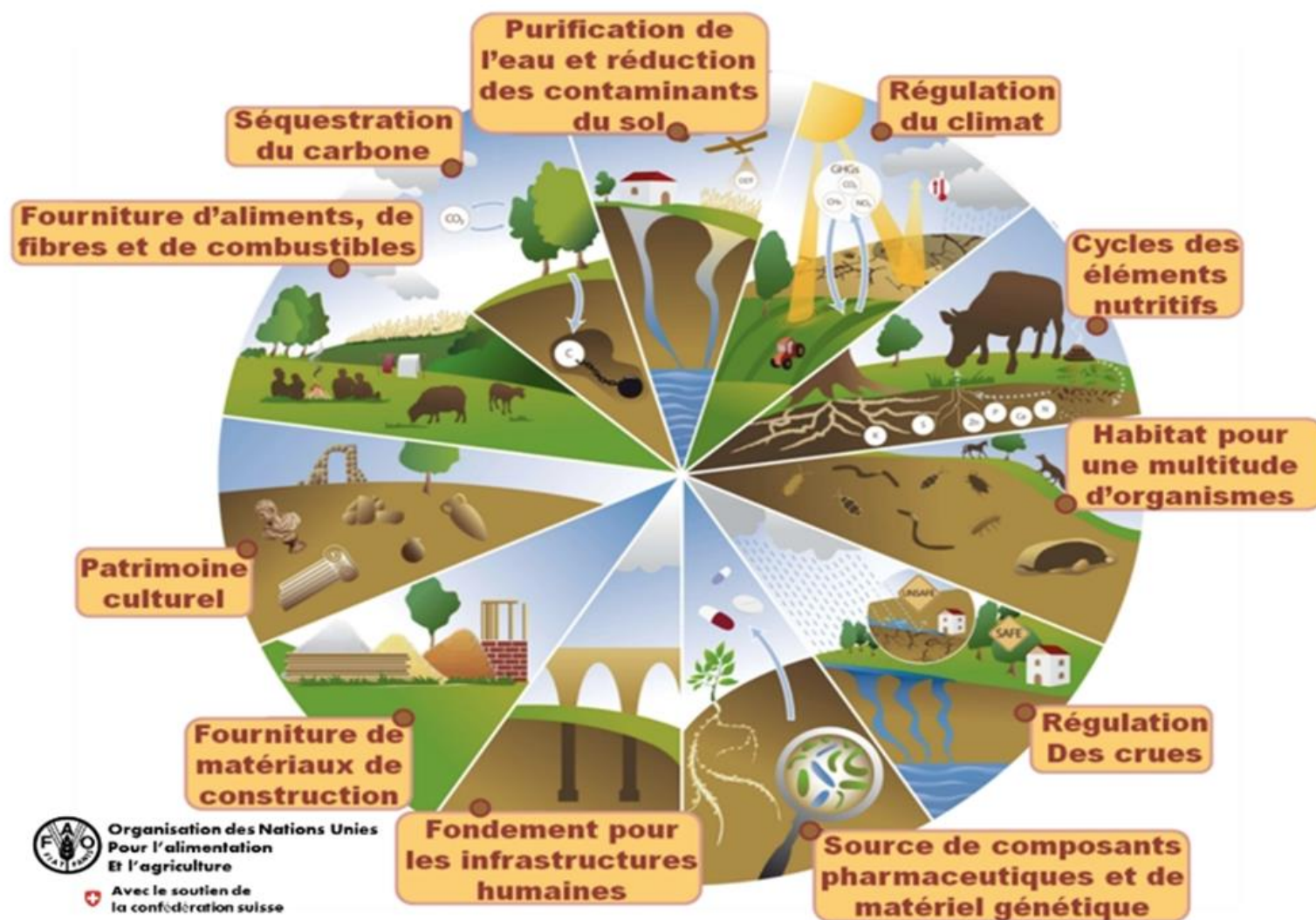
- **Introduction**
- **Présentation du Centre d'Expertise Scientifique Theia « Cartographie Numérique des Sols »**
- **La télédétection pour cartographier les sols**
 - Rétrospective historique et principes généraux
 - Les programmes existants : Copernicus, Theia
 - Exemples de réalisations
 - Les facteurs 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

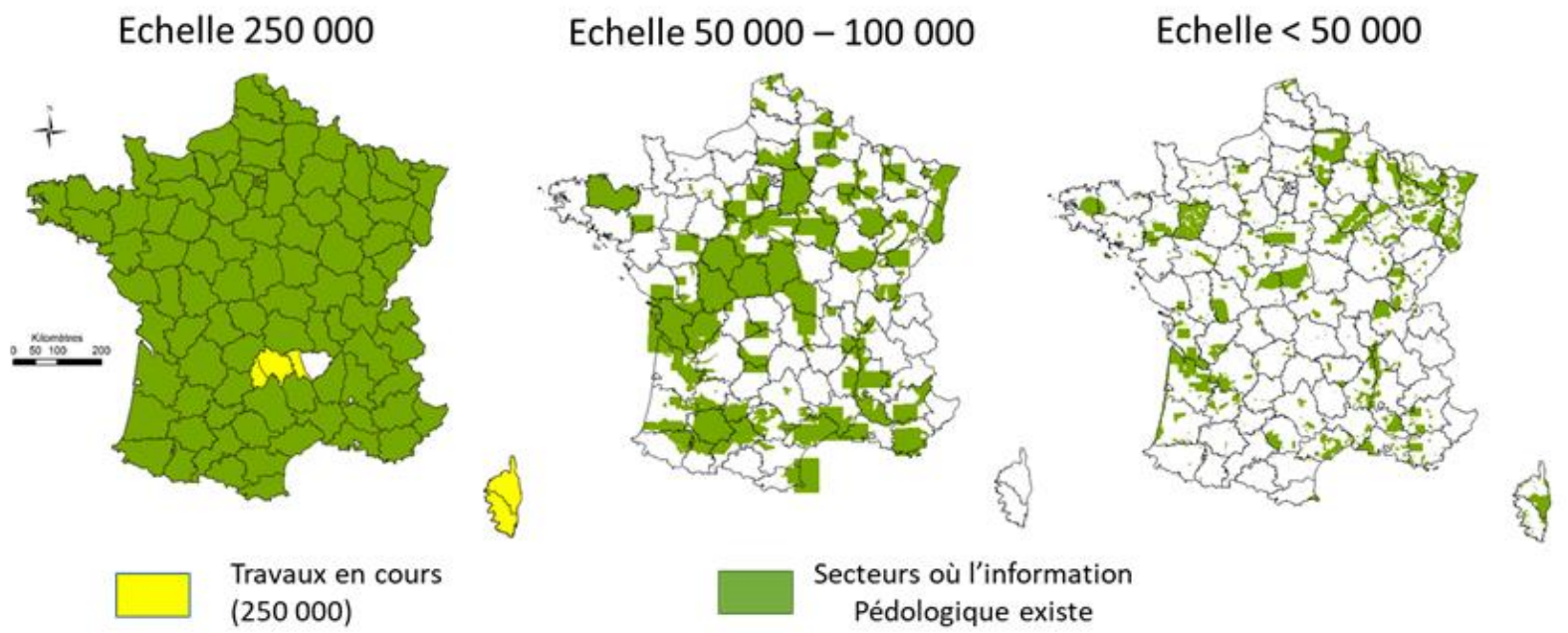
Les données sur les sols

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/>

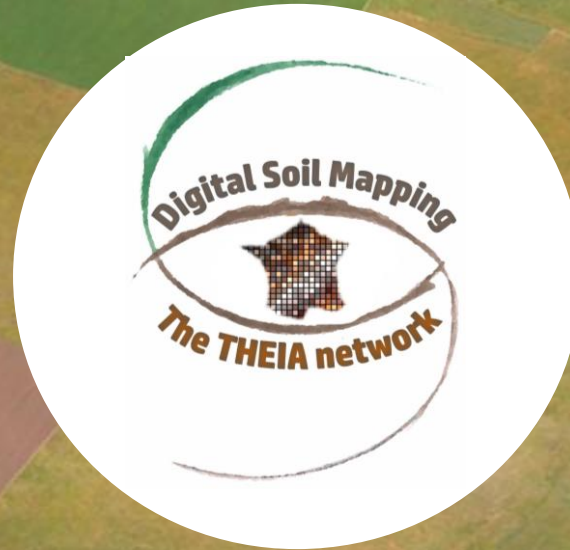
<https://www.afes.fr/ressources/la-cartographie-des-sols-a-moyennes-echelles-en-france-metropolitaine/>

→ Données ponctuelles

→ Cartes statiques sans quantification de l'incertitude

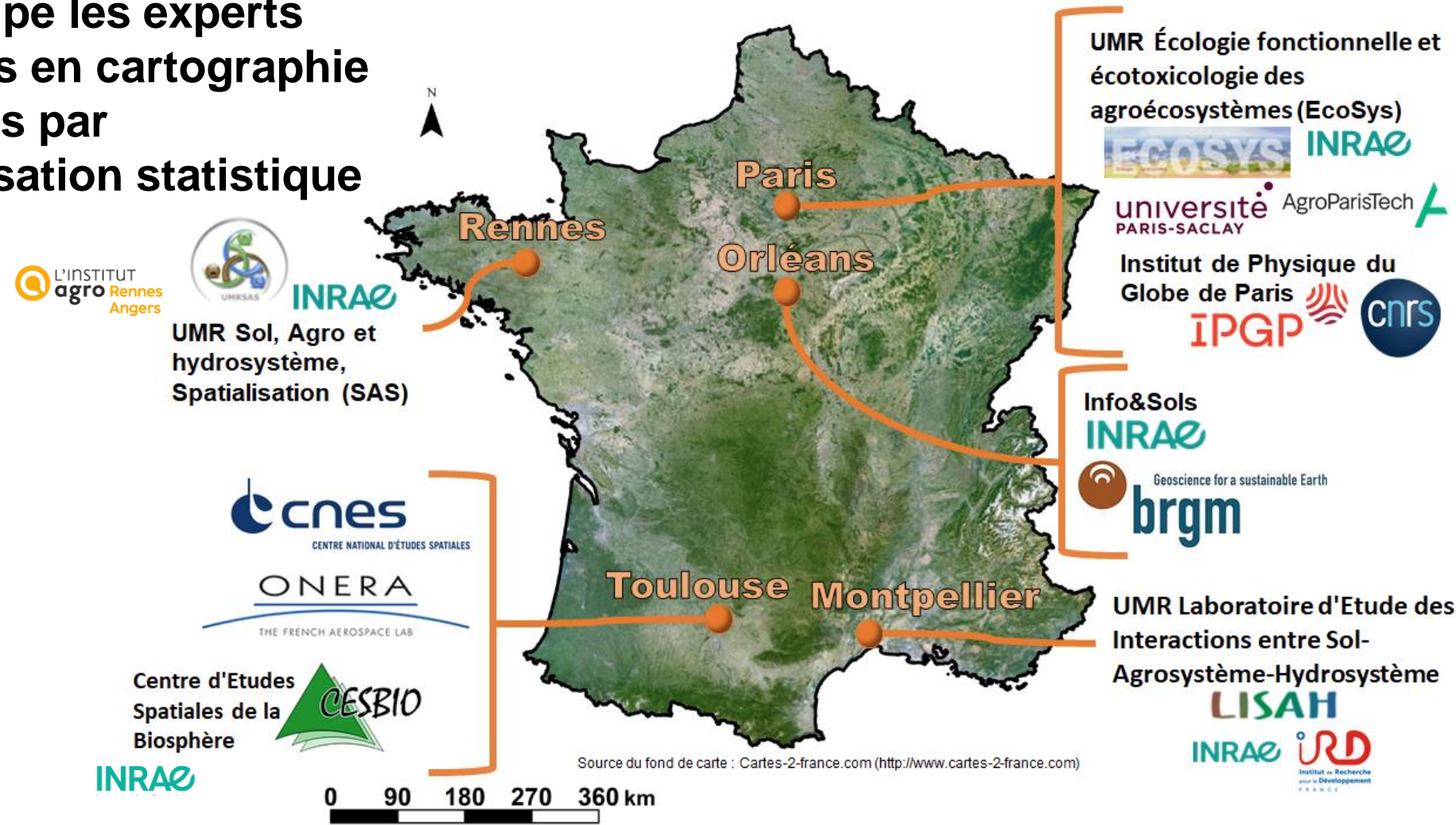


Le Centre d'Expertise Scientifique « Cartographie Numérique des Sols » Theia



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/>

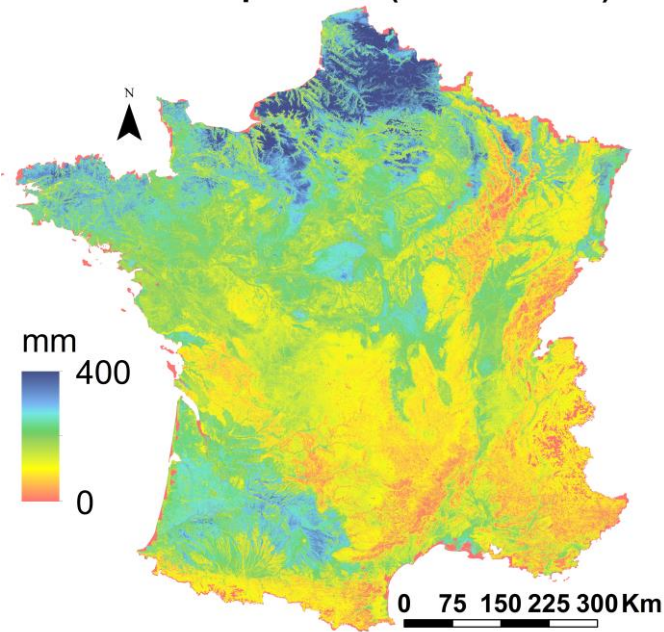


Le Centre d'Expertise Scientifique « Cartographie Numérique des Sols » Theia



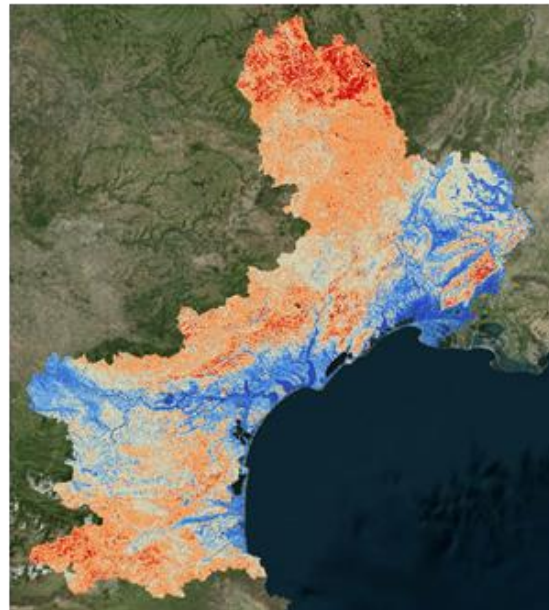
Objectif 1 : Produire des estimations spatialisées de propriétés de sol

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

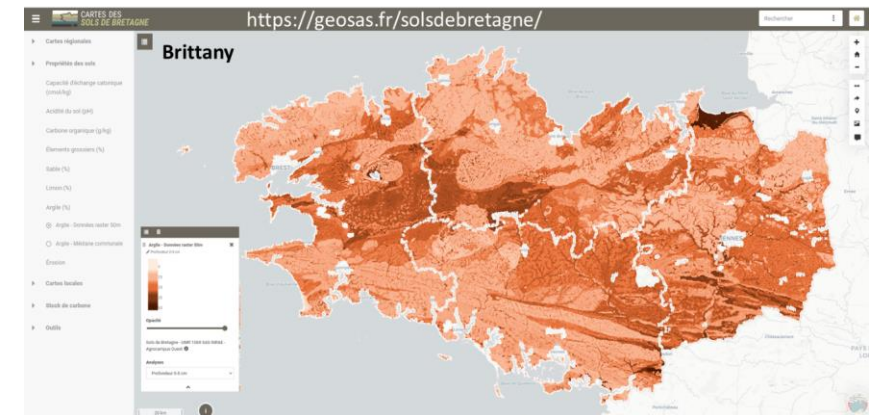


<https://ckan.openig.org/dataset/cartes-numeriques-de-proprietes-des-sols-en-languedoc-roussillon>



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

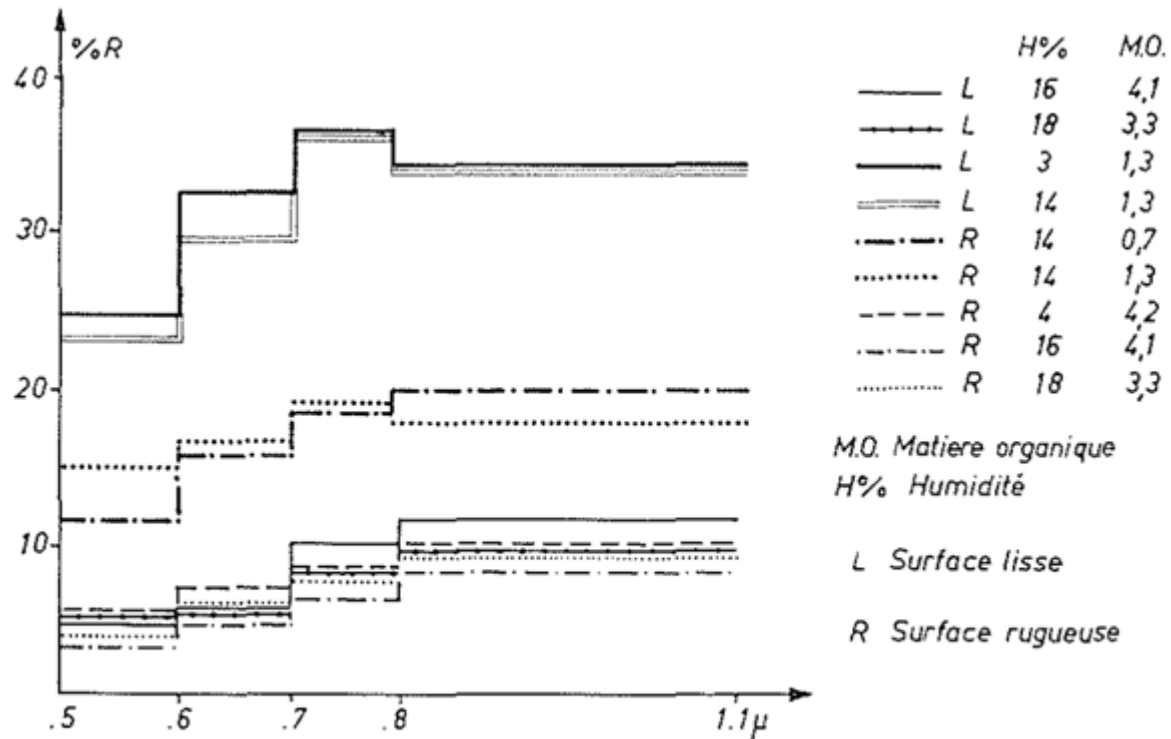


Figure 1 – Courbes de réflectance de sols peu ou pas organiques

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.

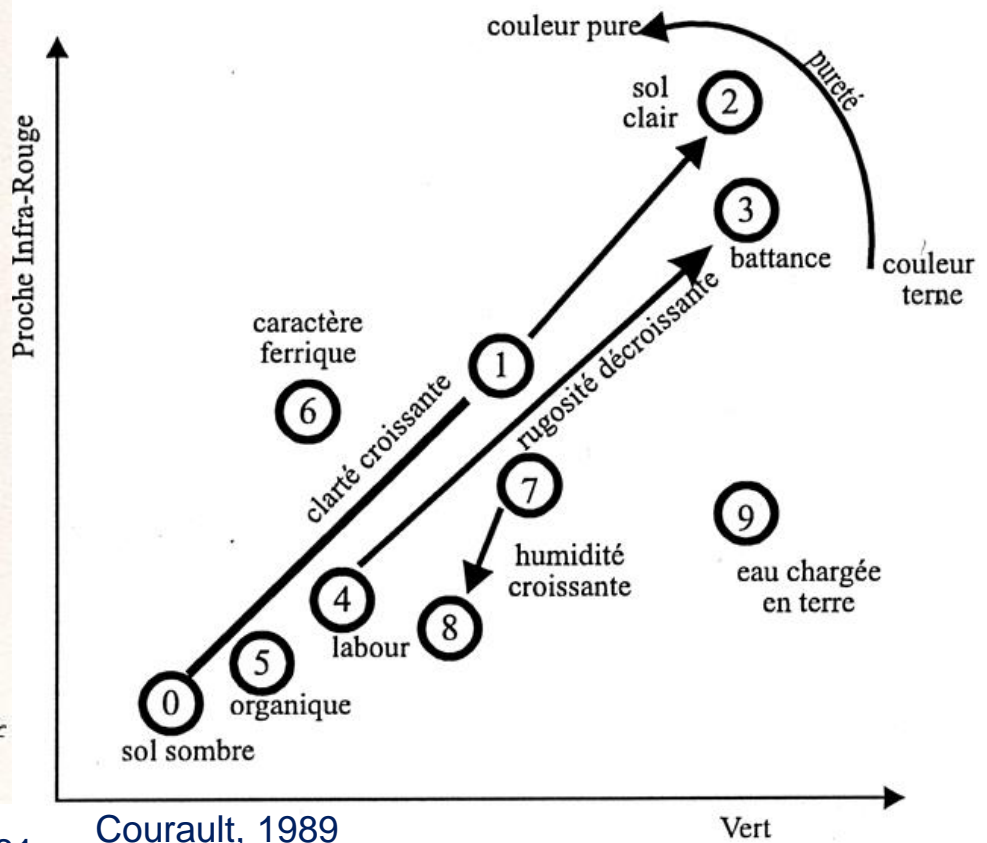


Comportements et indices spectraux des sols



noir : végétation - blanc : eau

Figure IX - Index de brillance sur sols nus



Courault, 1989

Vert

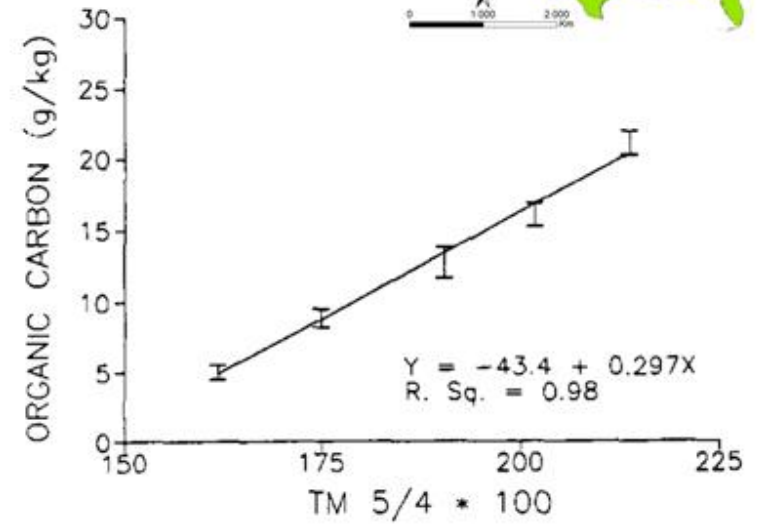
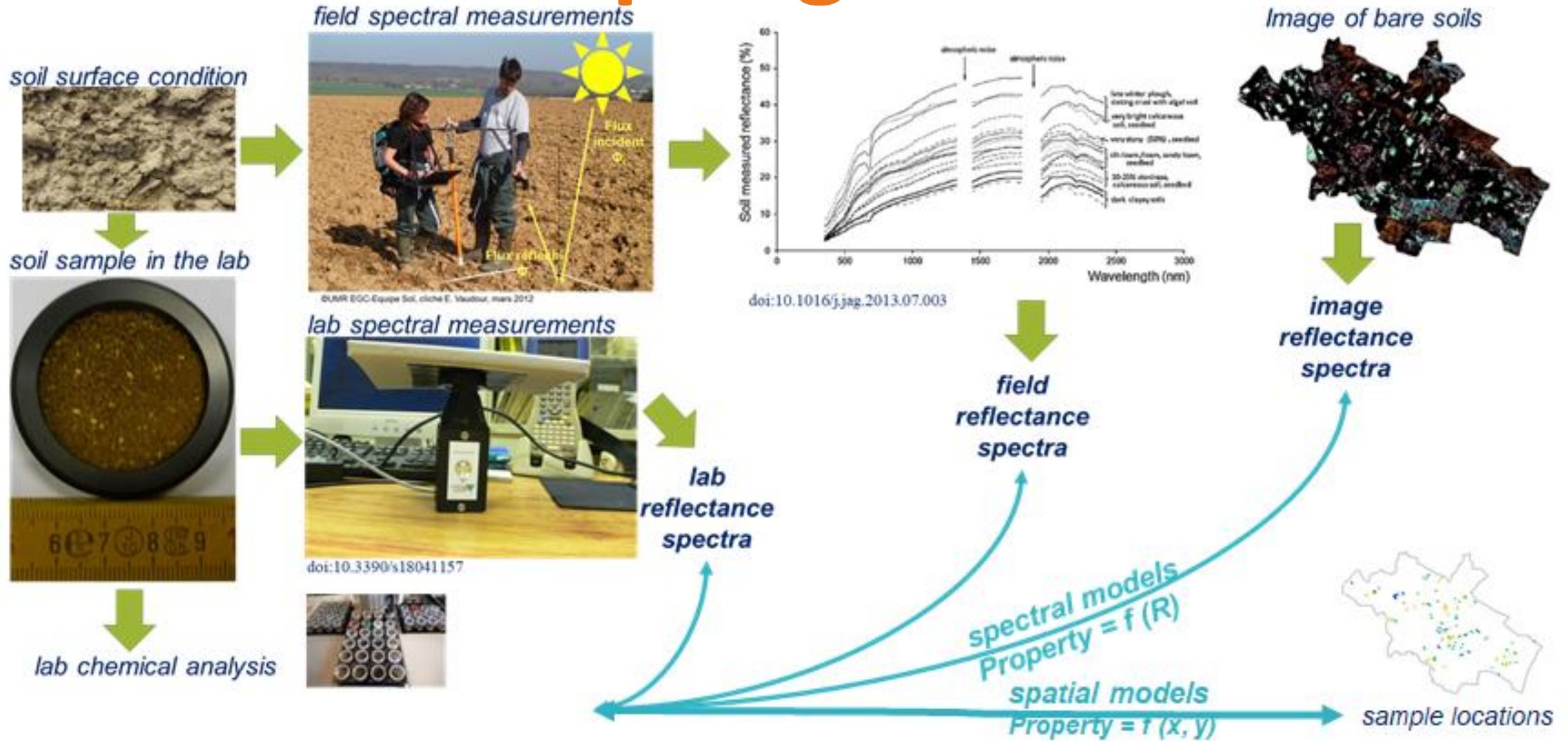


Figure 3. Regression line for organic carbon with TM 5/4. Error bars are standard error of the mean of soil samples.

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)

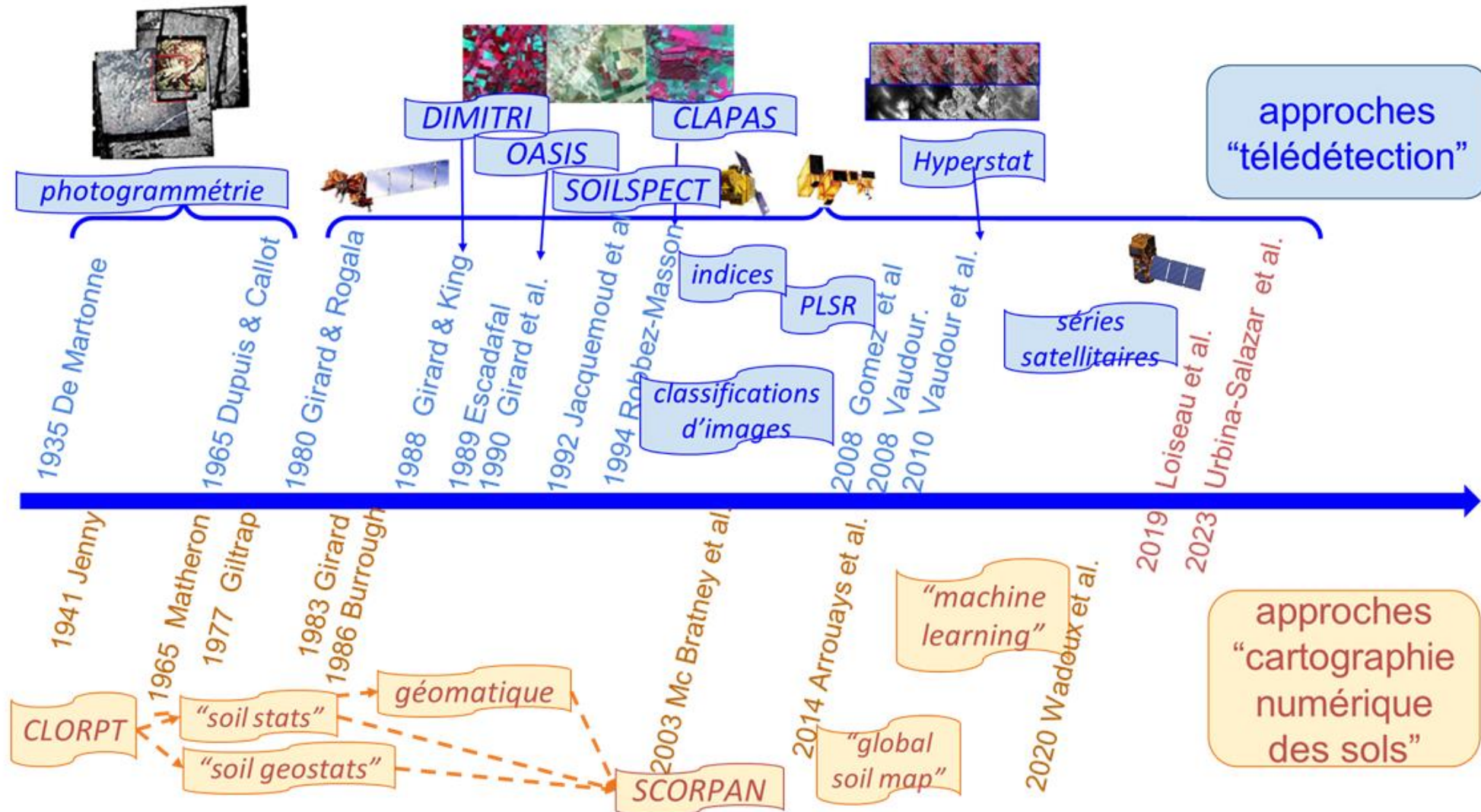
SAINT *et al.*, symp int Avignon 1981

Principes généraux

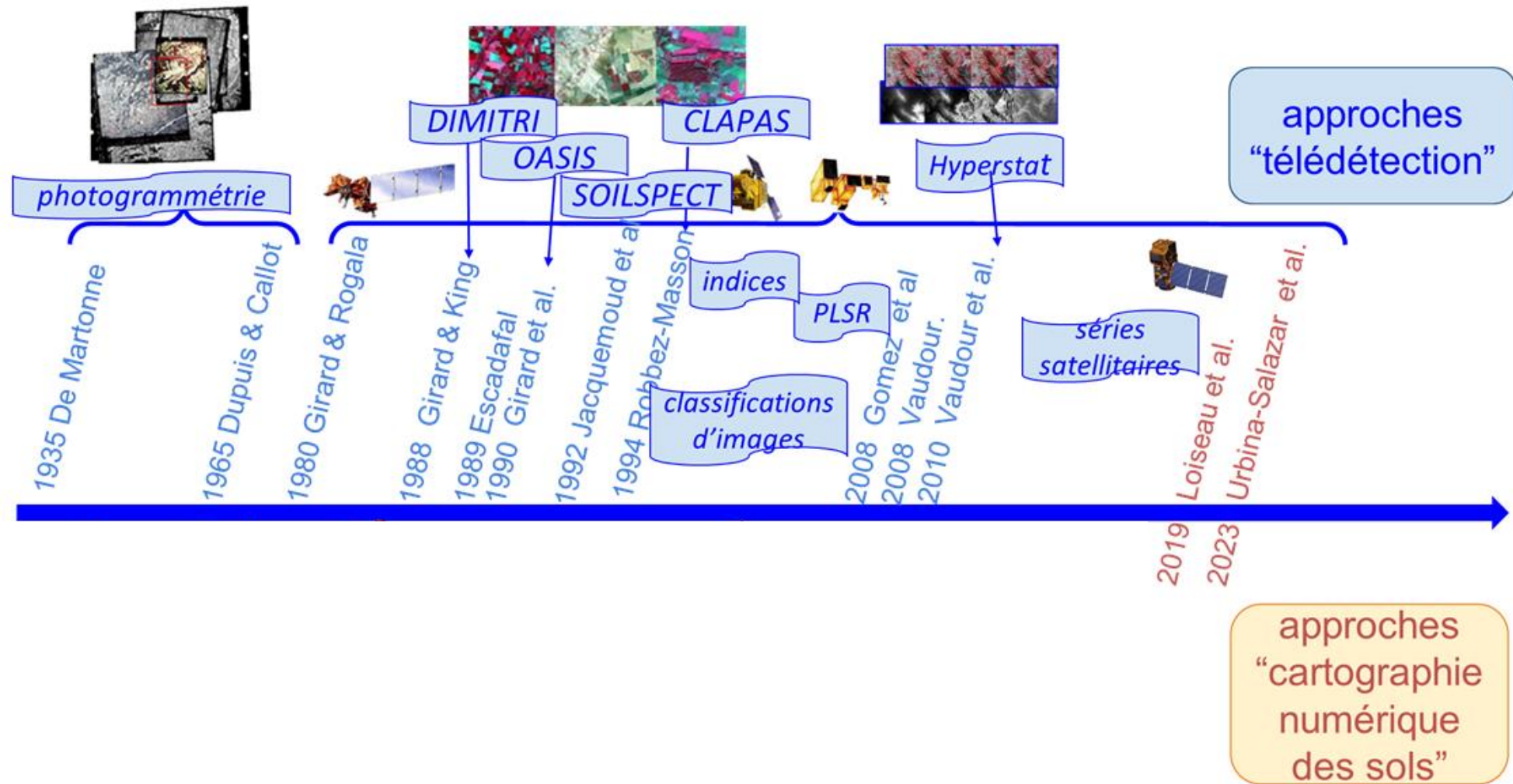


Vaudour et Wetterlind, 2021. *EJPSOIL Newsletter*

Rétrospective historique



Rétrospective historique





COPERNICUS

#EUSpace

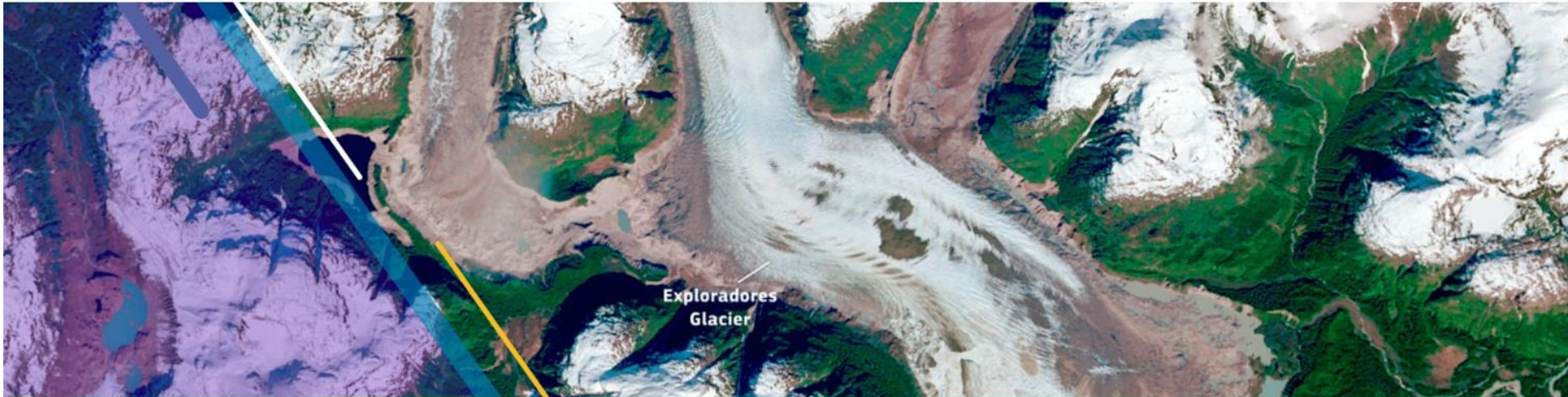
Médiathèque Agenda Actus Contact FAQ | Se connecter

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>

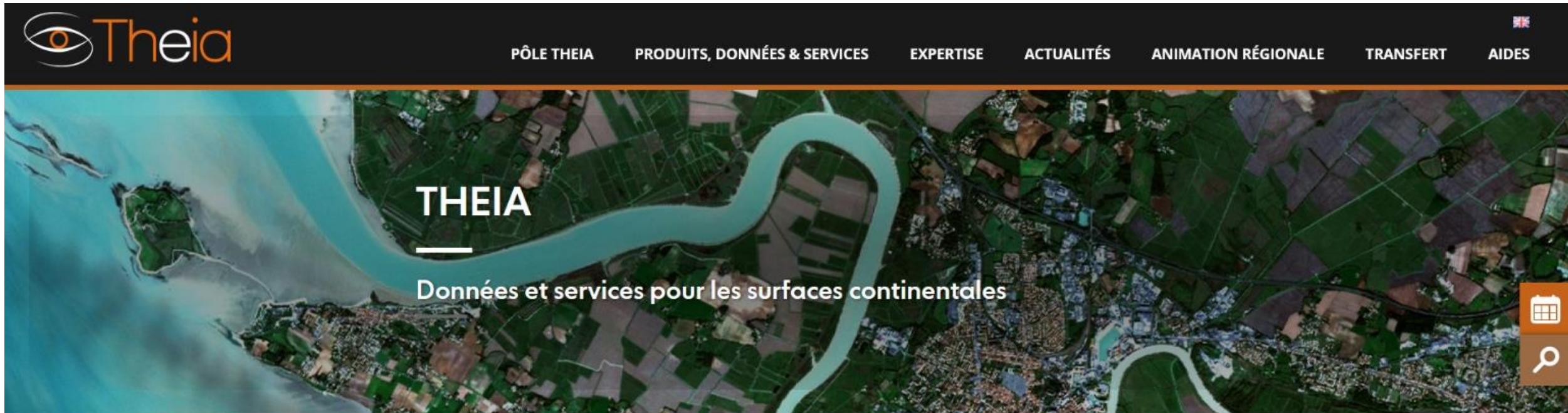


Families of satellites dedicated to Copernicus "The Sentinels"

~30

Contributing missions from National, European or International organisations

Theia



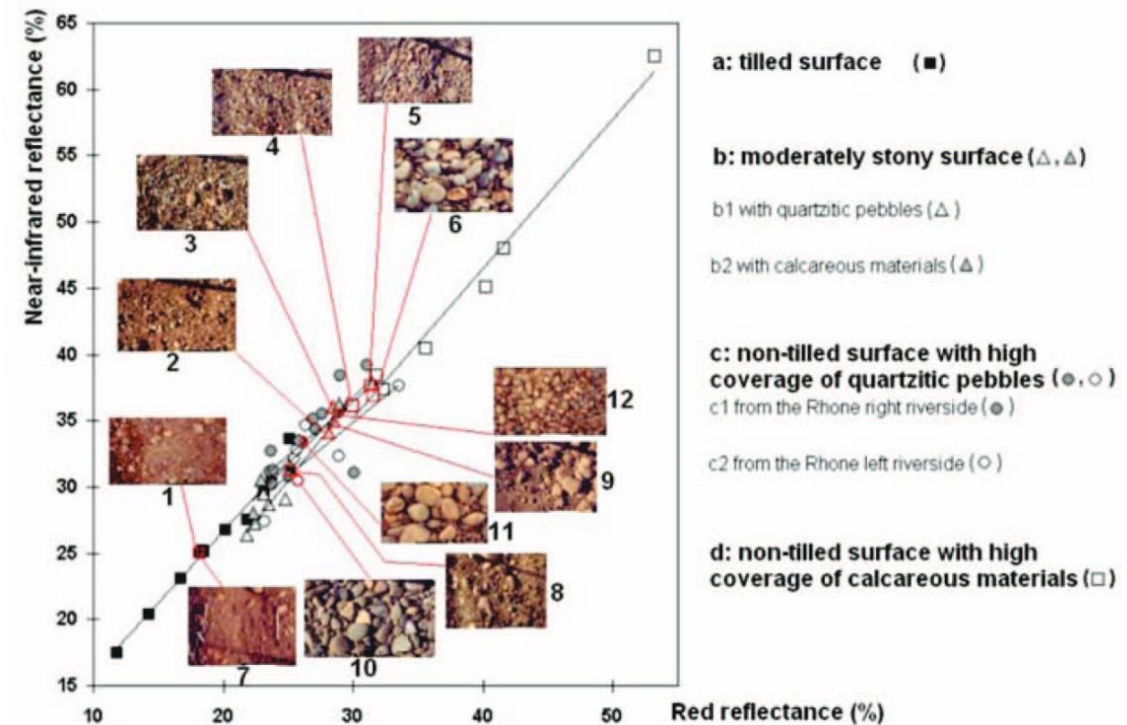
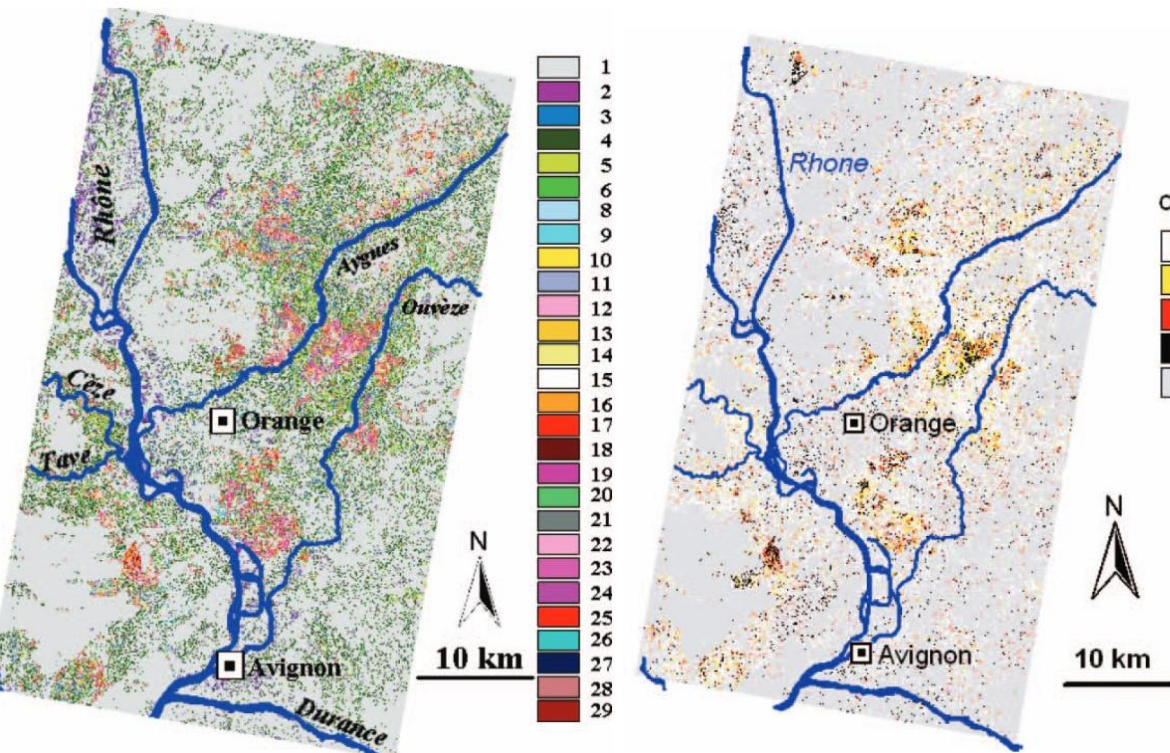
Theia en un schéma

A la une

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

Les réalisations : types de sols

classification bayésienne par maximum de vraisemblance des sols viticoles rhodaniens

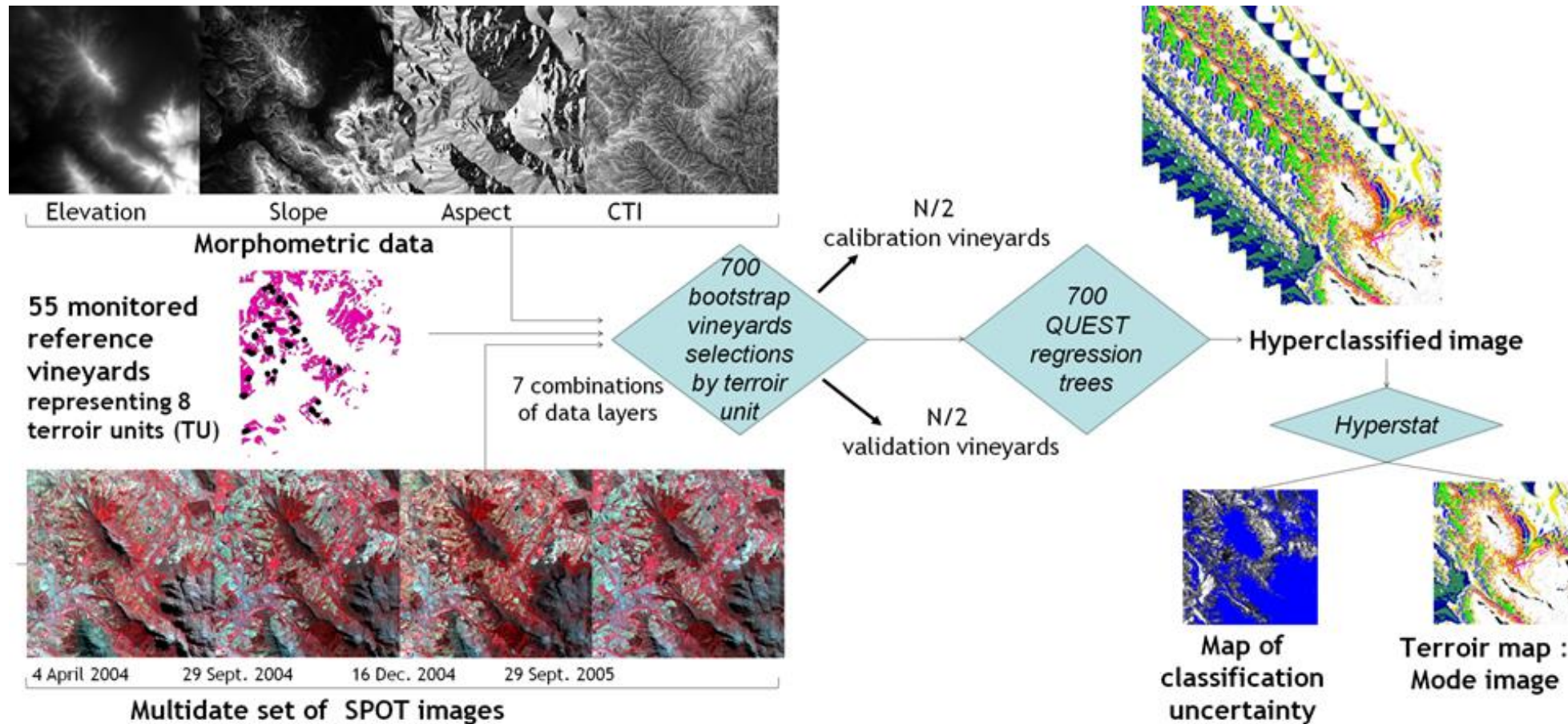


Vaudour, 2008

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

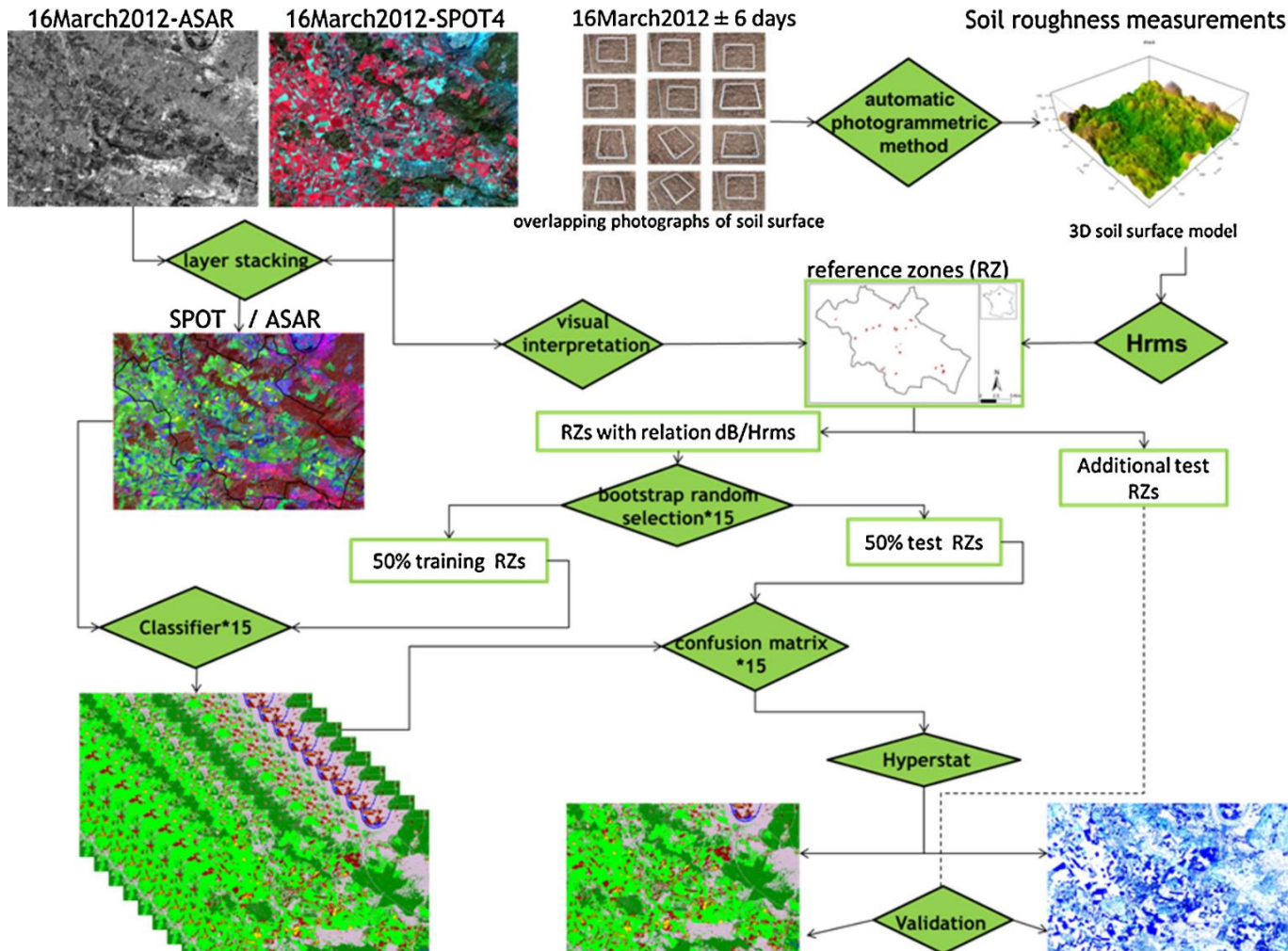
Les réalisations : zones de gestion homogène de sols

exemple de zonage viticole numérique par arbres de régression

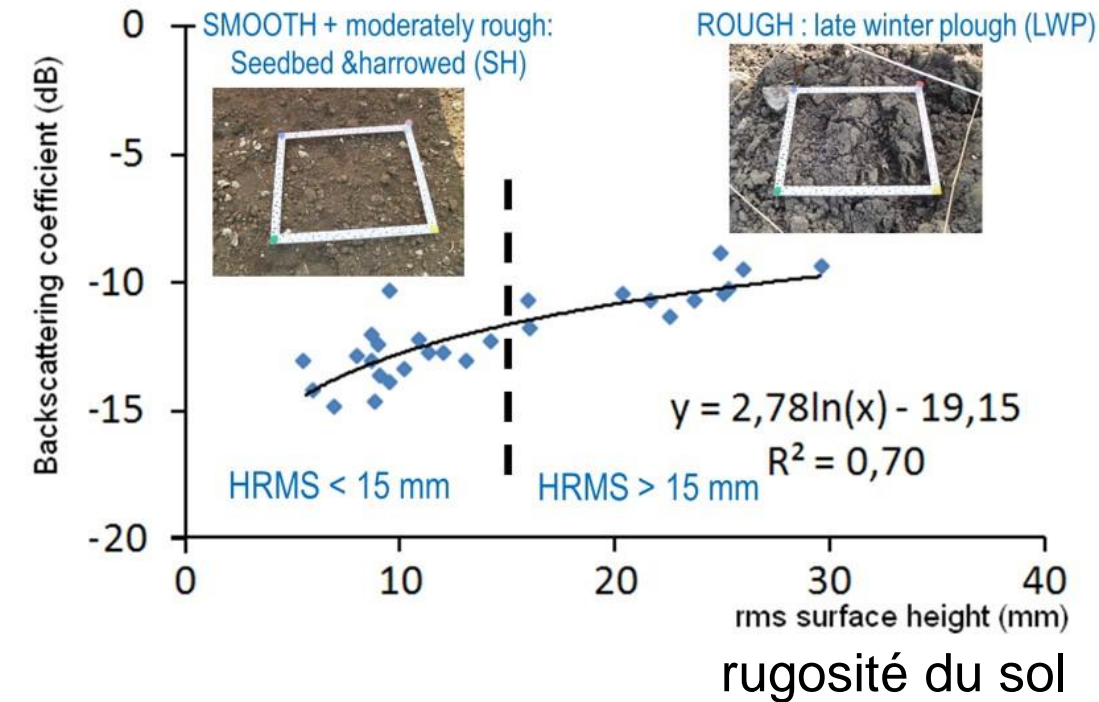


Vaudour *et al.*, 2010
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.001>

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



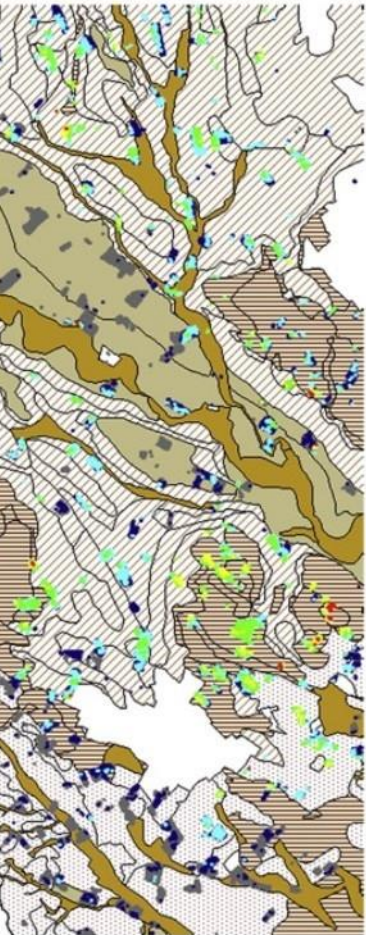
signal radar (bande C, 5,6 Ghz, polarisation HH)



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

Les réalisations : propriétés de sols via imagerie aéroportée hyperspectrale

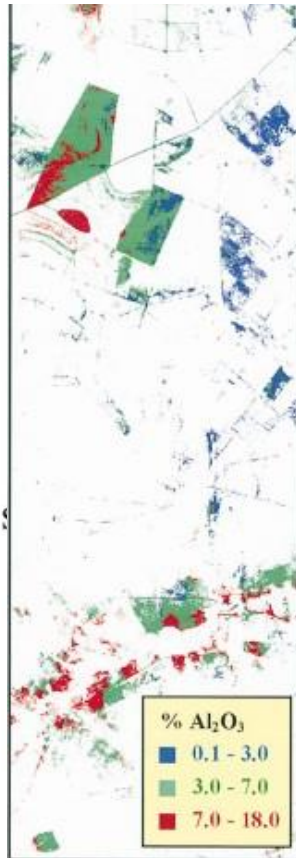
CaCO₃
(g/kg)



Al₂O₃ (%)

Galvao et al., 2001

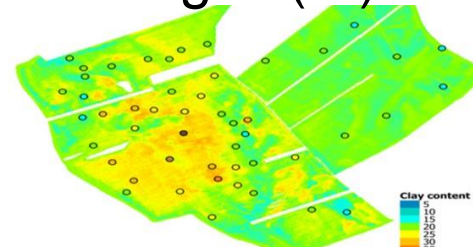
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00170-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00170-X)



TiO₂ (%)



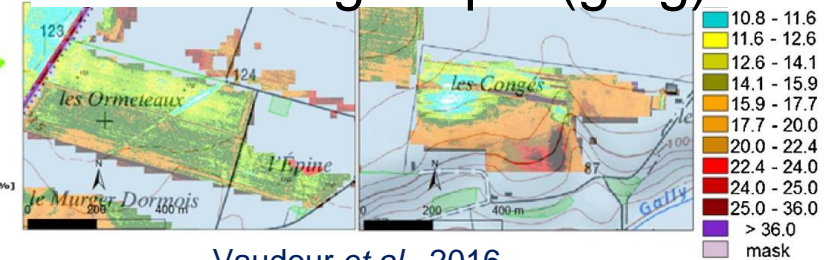
argile (%)



Gholizadeh et al., 2018

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

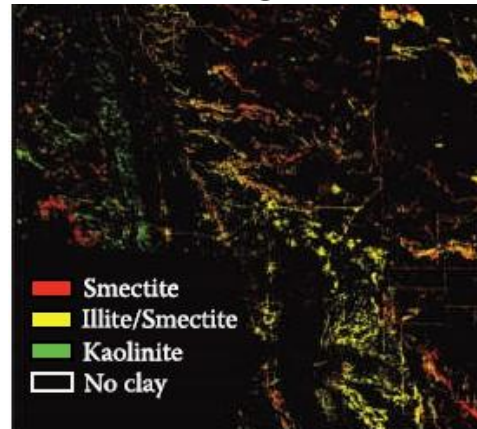
carbone organique (g/kg)



Vaudour et al., 2016

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

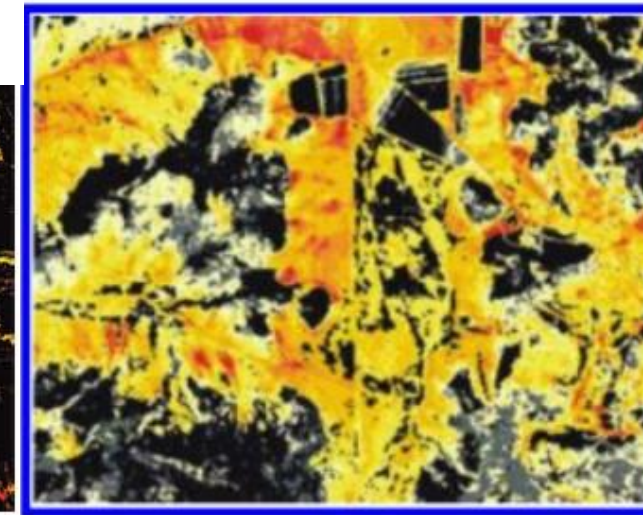
argiles
minéralogiques



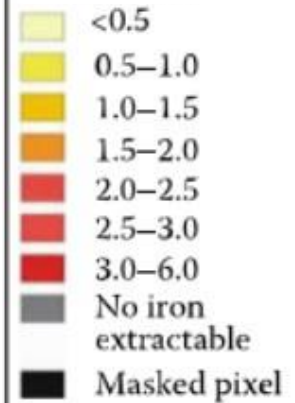
Chabrillat et al., 2002

[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

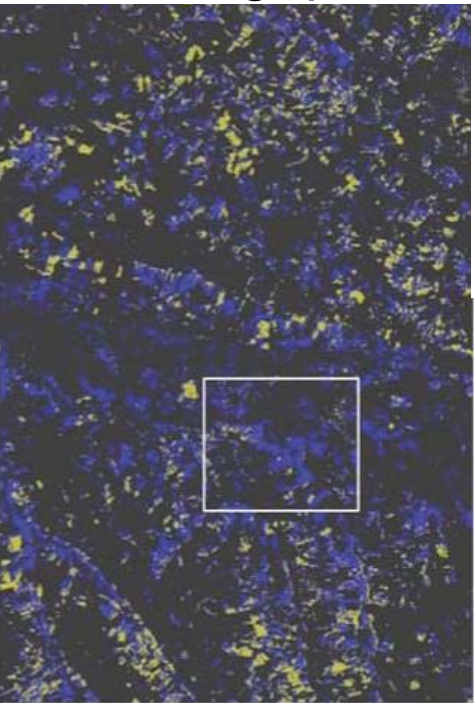
<https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0025>

Gomez et al., 2012

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

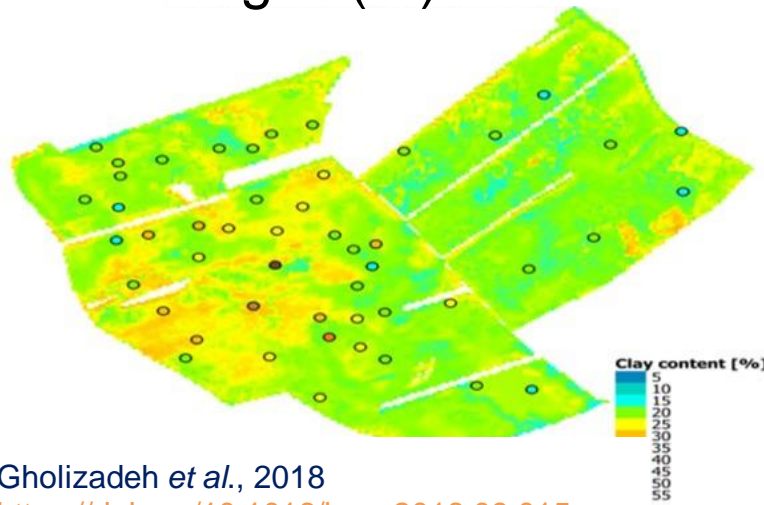
Les réalisations : propriétés de sols via imagerie multispectrale mono-date

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>

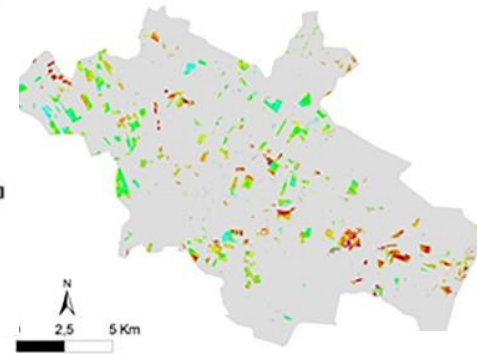
- Illite
- Chlorite

SOC (g/Kg)



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

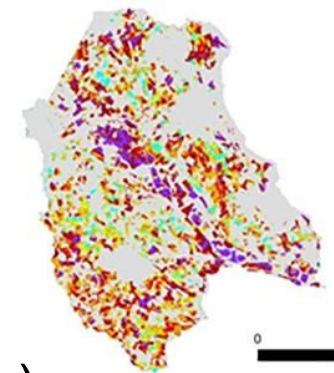
Versailles Plain



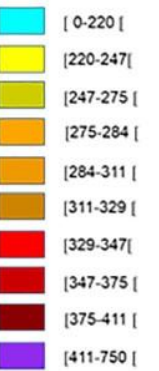
argile
(g/Kg)



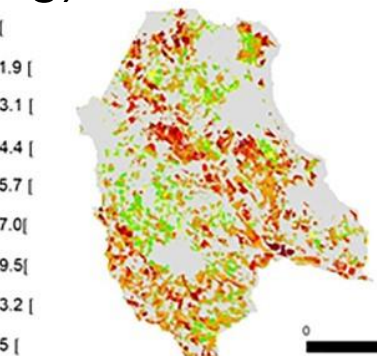
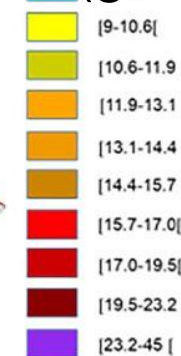
La Peyne valley



argile
(g/Kg)



SOC (g/Kg)



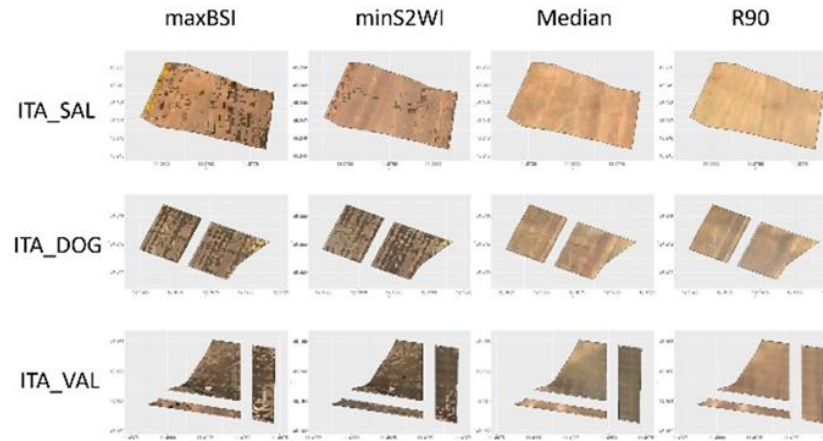
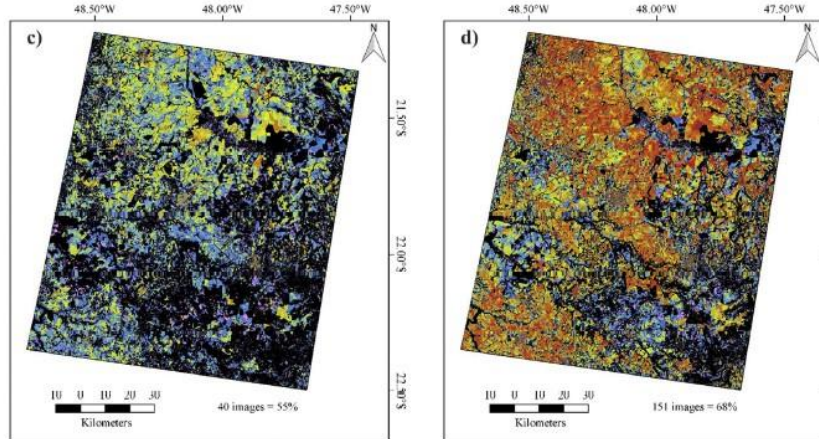
fer (%)



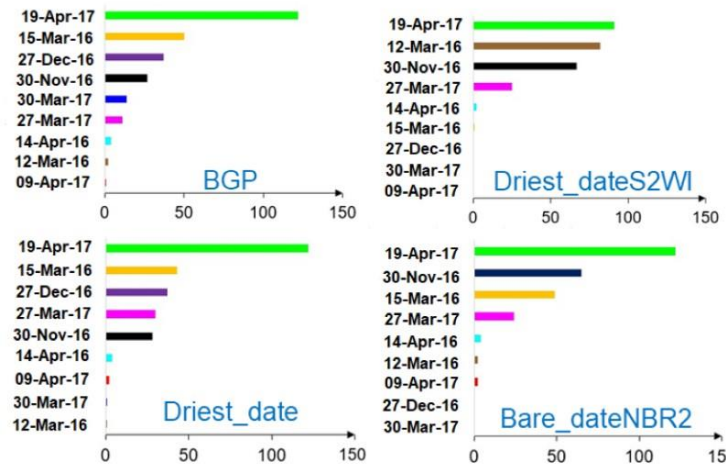
Vaudour *et al.*, 2019
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.006>

Les réalisations : réflectance du sol nu

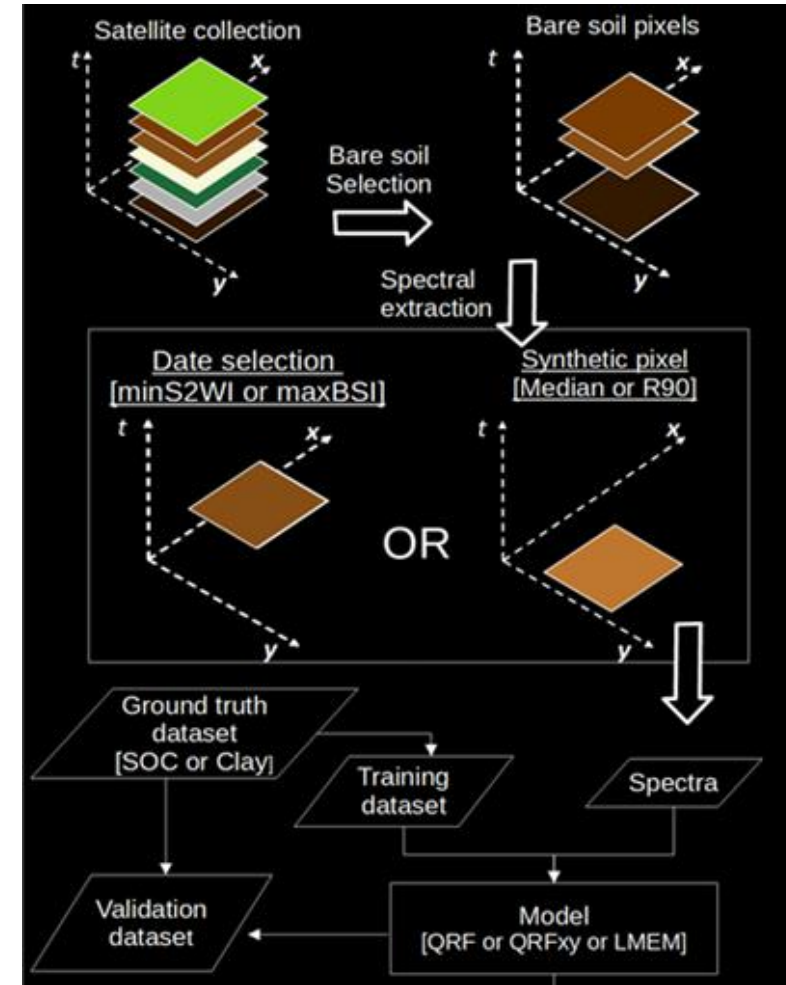
Dimension temporelle : mosaïque temporelle de sols nus



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>

Number of overlapped pixels of bare soil during the time series

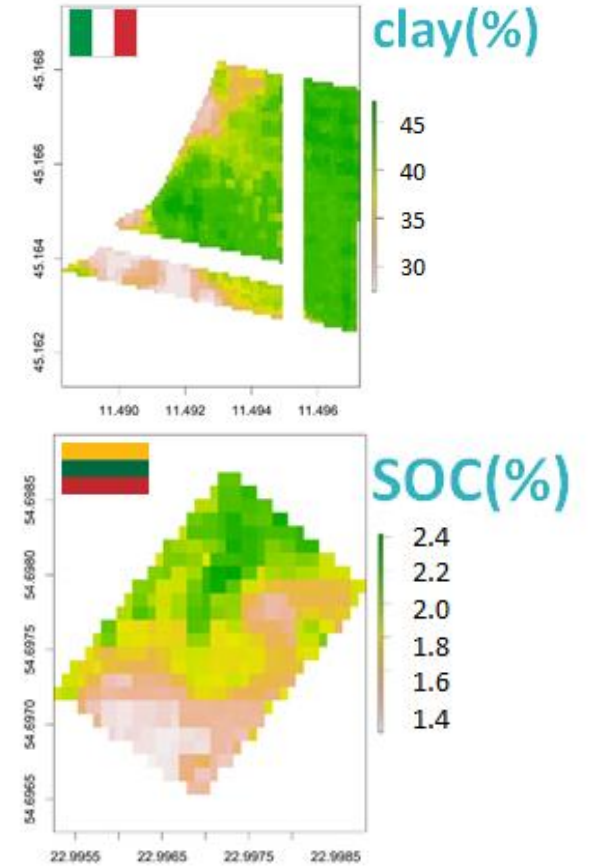
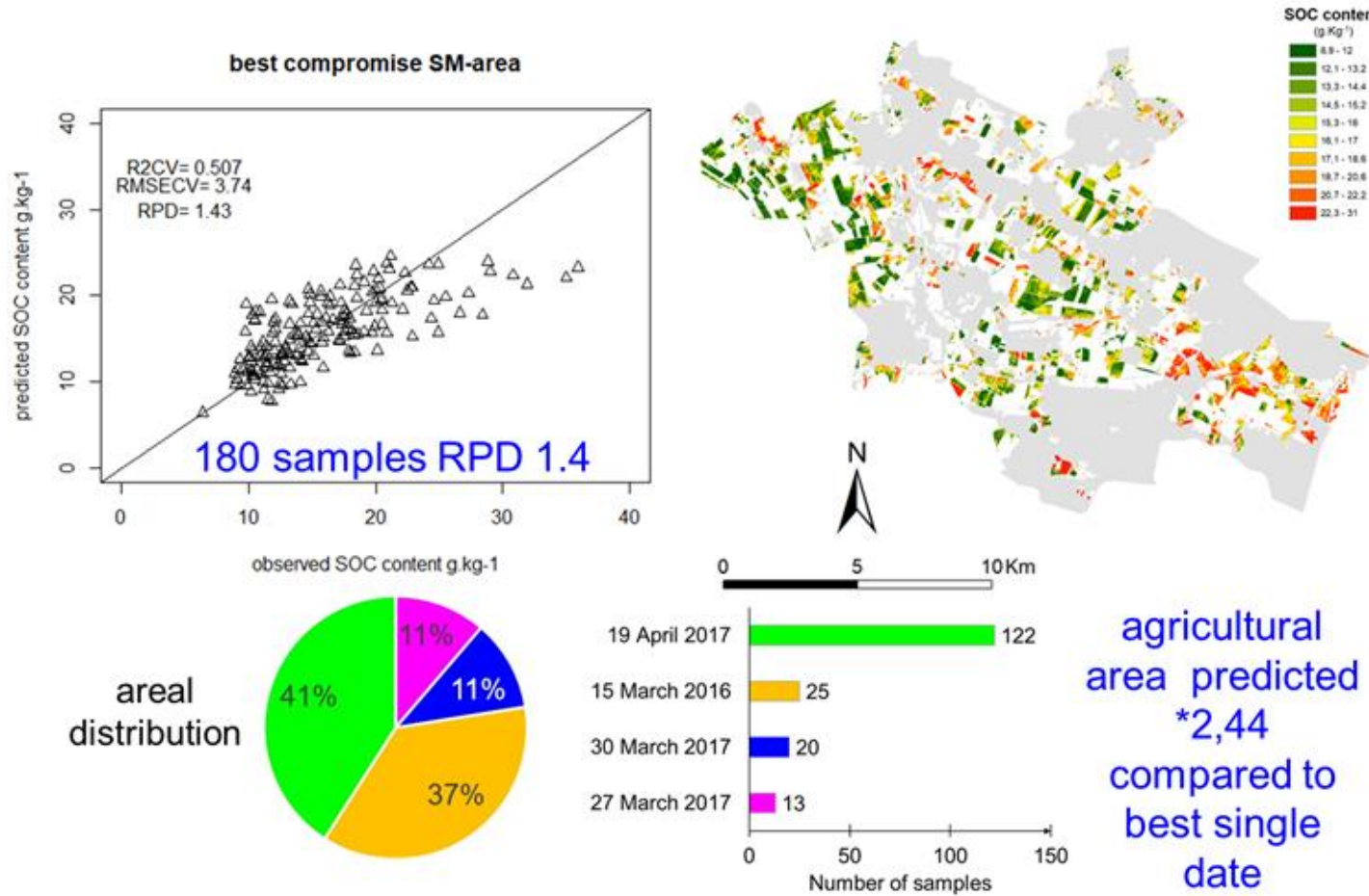
0 1 2 5 10 20 40 60

Demattê *et al.*, 2018
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.047>

stratégies :

- seuillages indices/masquages
- par pixel ou par date

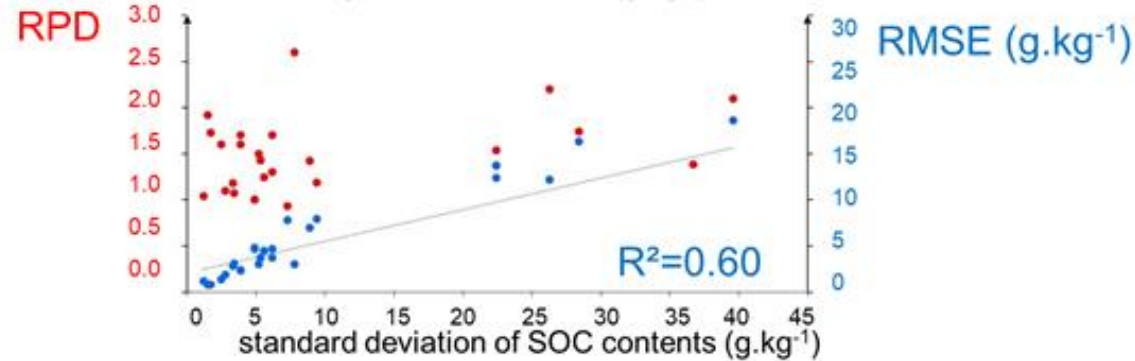
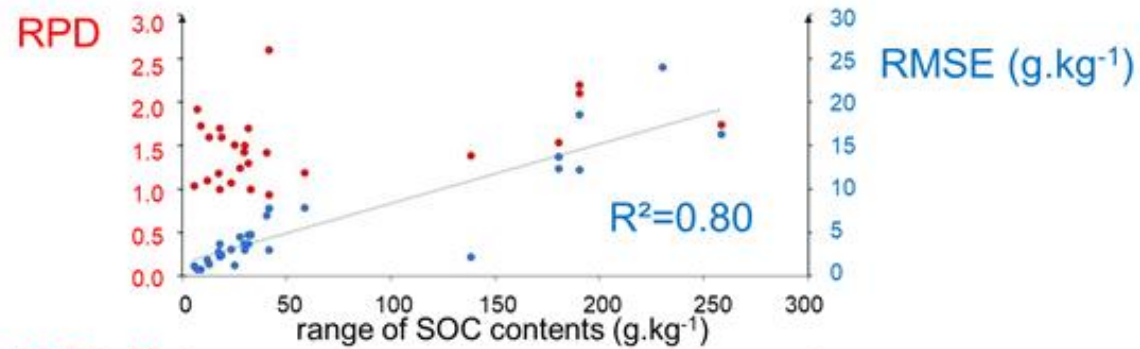
Dimension temporelle : mosaïque temporelle de sols nus



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

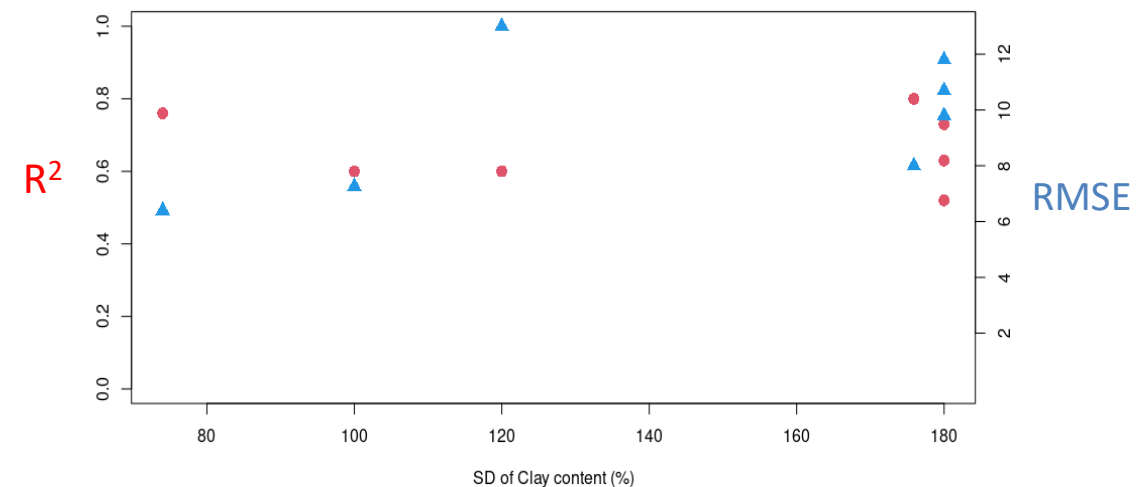
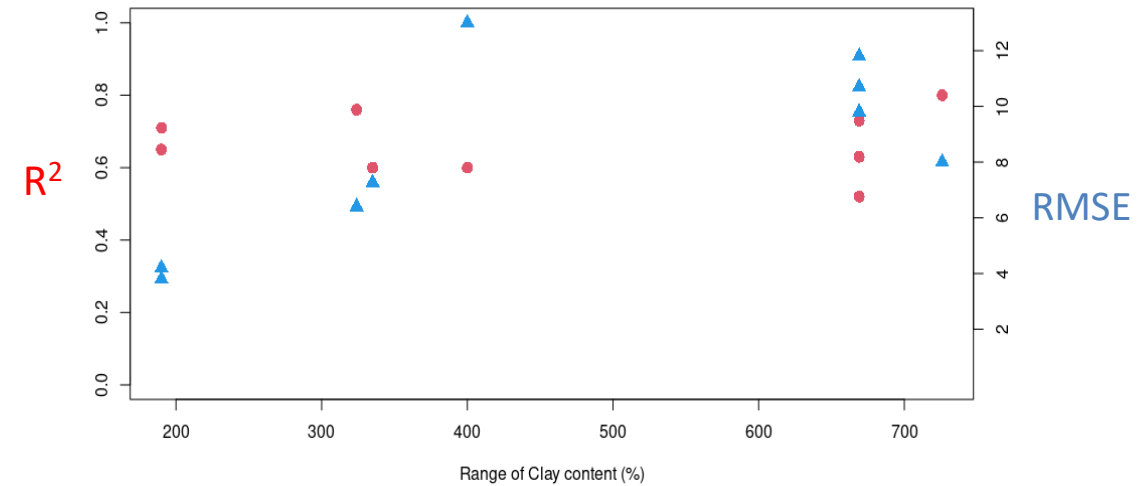
Castaldi *et al.*, 2023
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026>

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



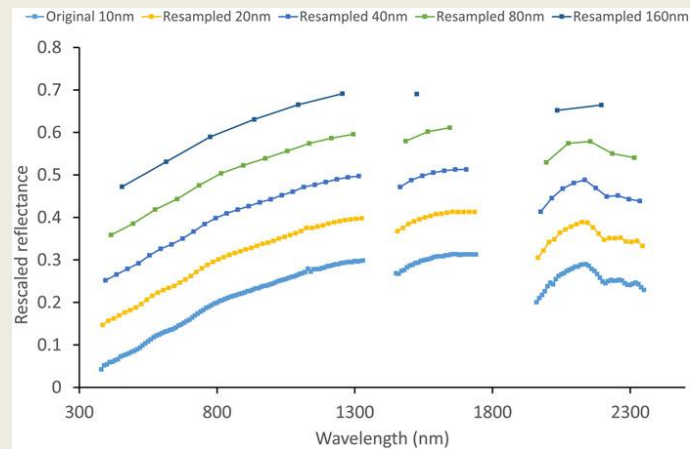
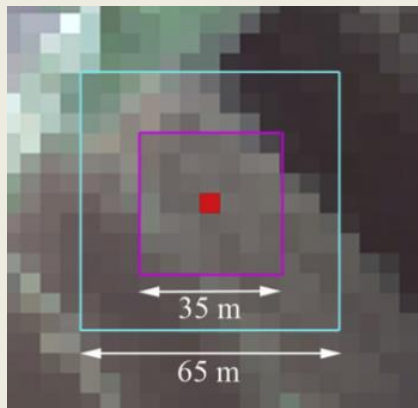
Vaudour *et al.*, 2022

<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

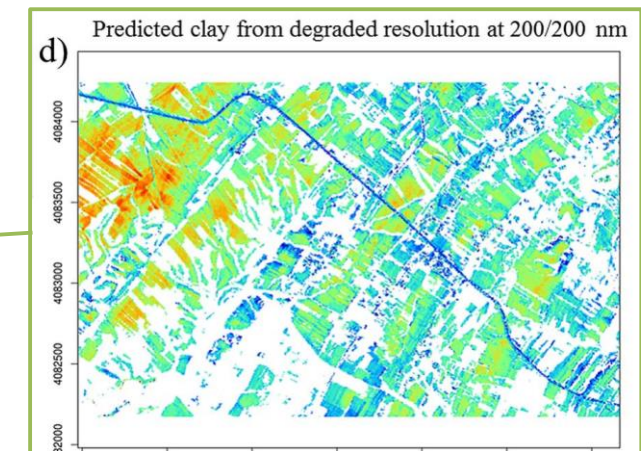
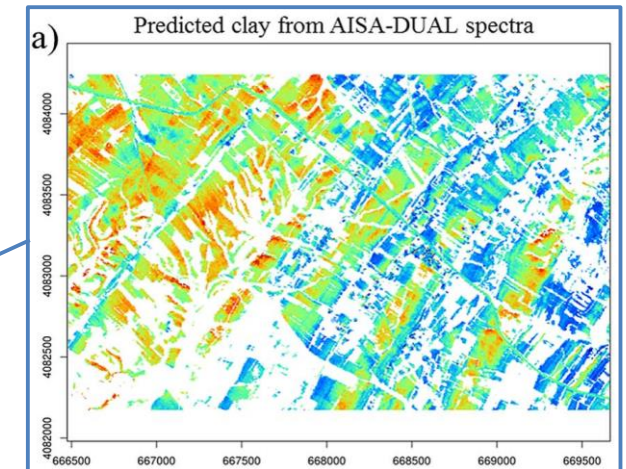


Caractéristiques instrumentales :

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	0.80	0.73	0.72
Sen2Cor	R_{CV}^2	0.62	0.63	0.62	0.60	0.50	0.76	0.72	0.62	0.80	0.74	0.72
LaSRC	R_{CV}^2	0.63	0.62	0.62	0.59	0.50	0.75	0.72	0.63	0.77	0.72	0.68

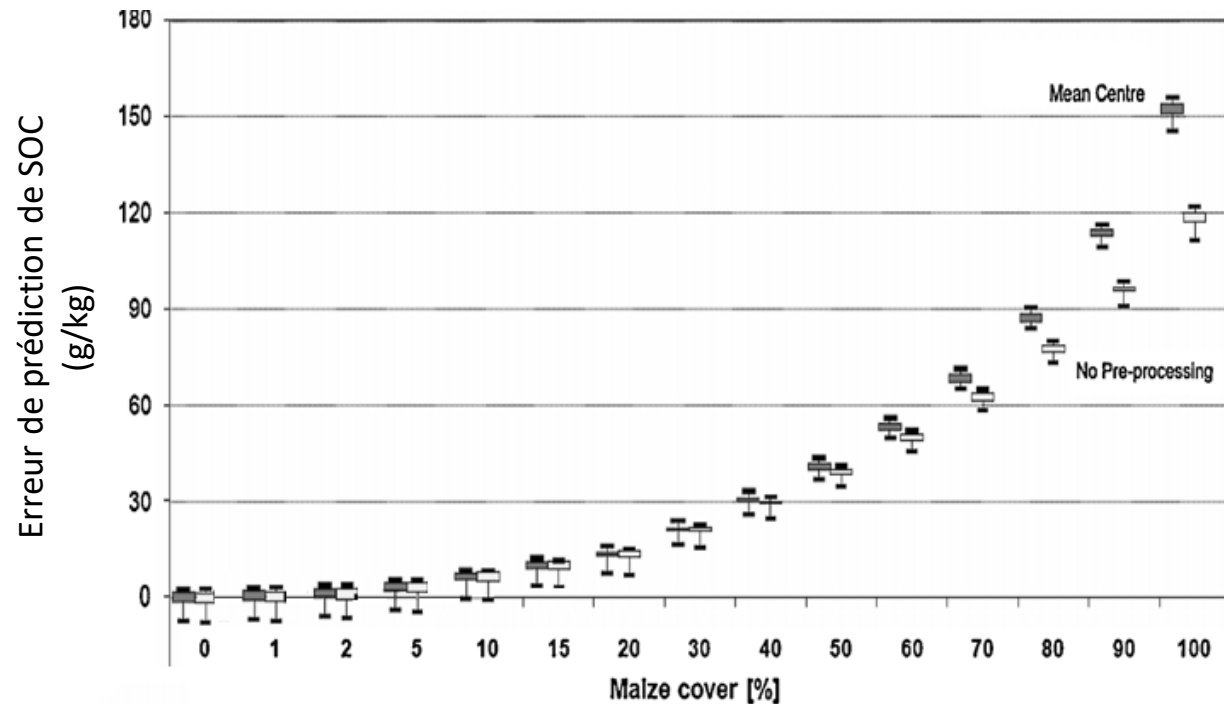


Gomez *et al.*, 2021

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115959>

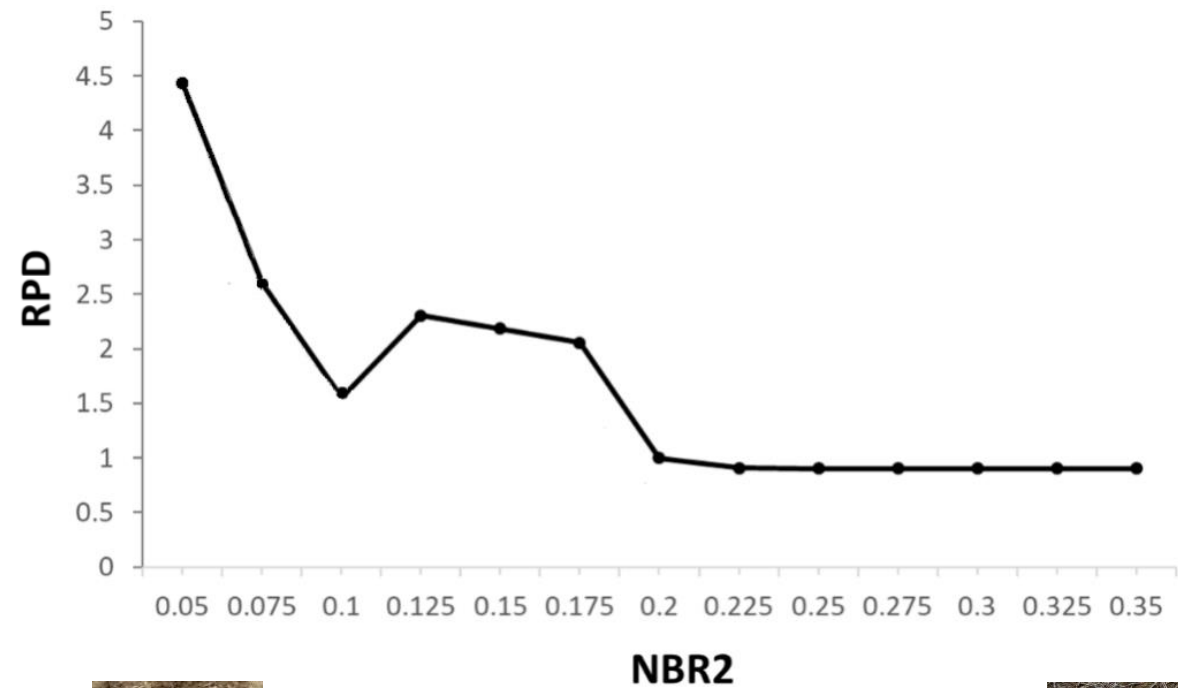
Focus sur la végétation

Verte



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

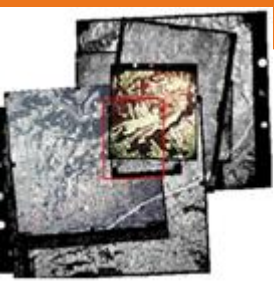
Sèche



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

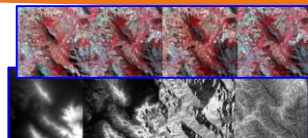


DIMITRI

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

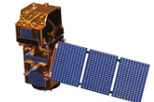
classifications d'images

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

CLOPRT

"soil stats"

"soil geostats"

géomatique

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


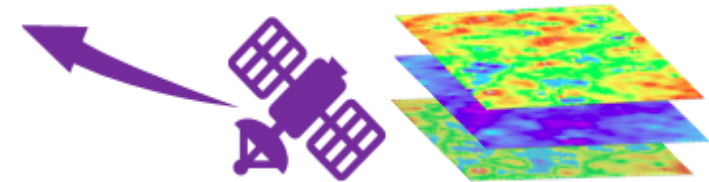
Localisation
XY

Erreur
estimée

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

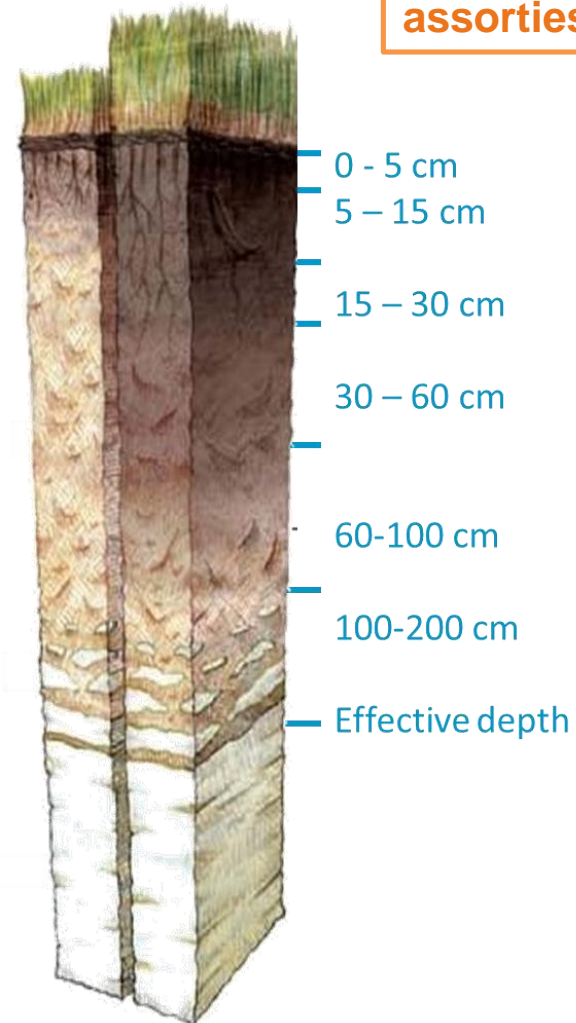
Données spatiales sur les déterminants
de la variabilité des sols ou corrélées à
cette variabilité (covariables)

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

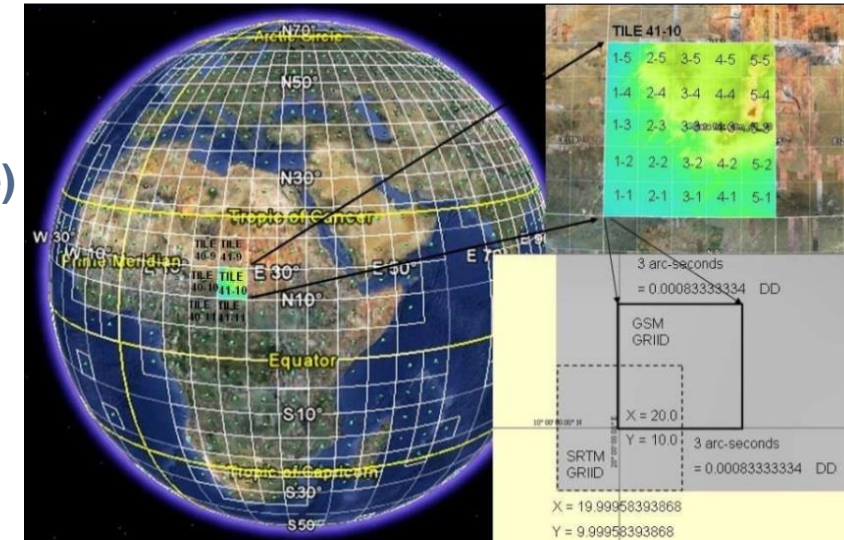


GlobalSoilMap

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

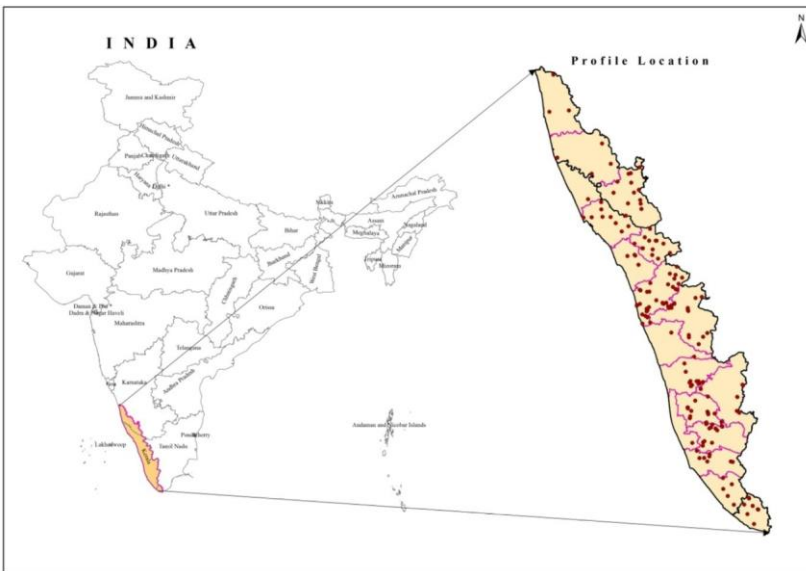
Table 3
Summary, in chronological order, of previous quantitative scorpan-like studies in which soil classes and/or attributes were spatially predicted

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 sample
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, θ at - 10 and - 1500 kPa				×	×	D3	224	300	100	Lower Macquarie Valley, Australia	McKenzie and Austin (1993)	

McBratney *et al.*, 2003

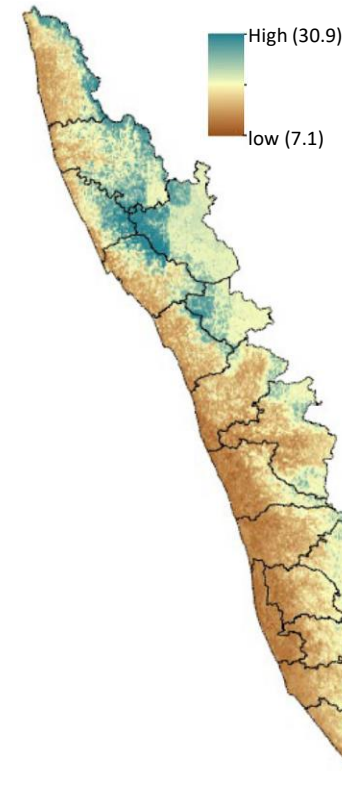
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)

La télédétection : des covariables dans le modèle SCORPAN

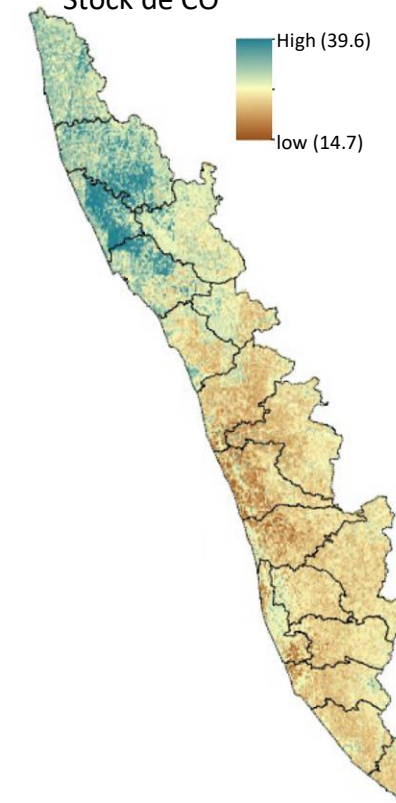


Cartographie du stock de CO

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)

+

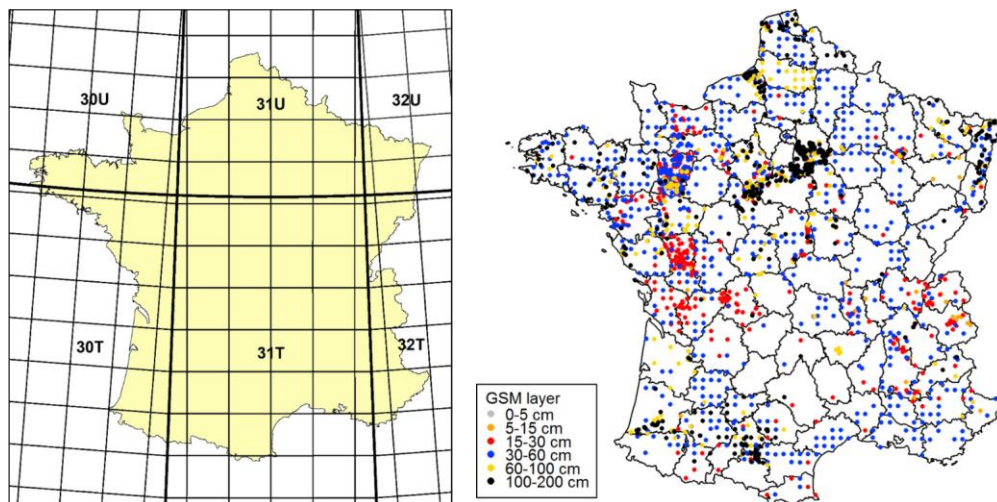
- Bandes spectrales LANDSAT

Dharumarajan *et al.*, 2021

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

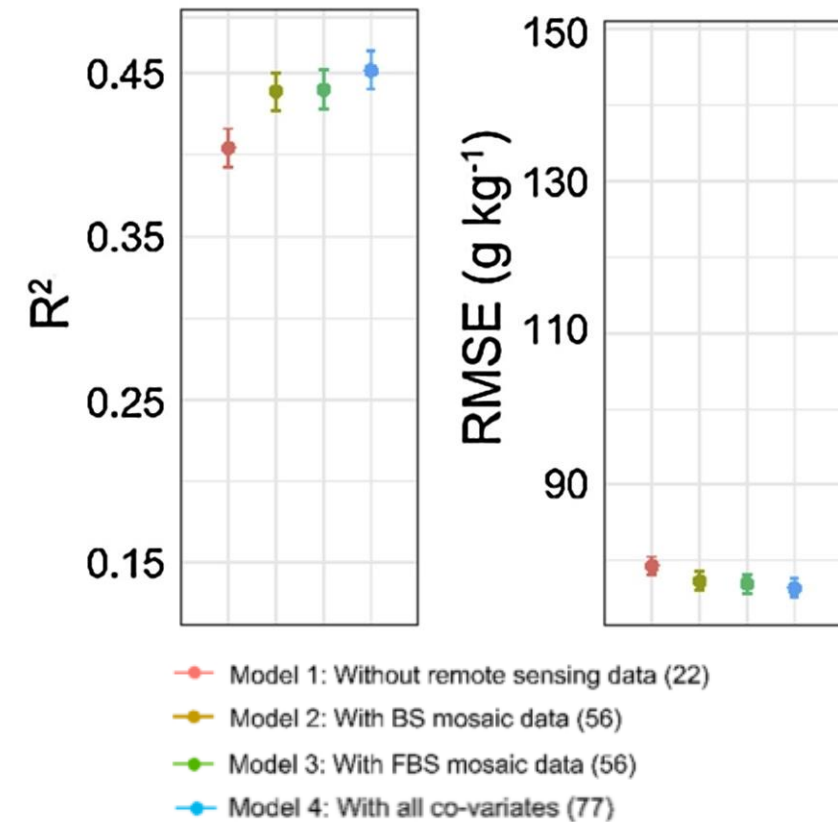
La télédétection : des covariables dans le modèle SCORPAN

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.

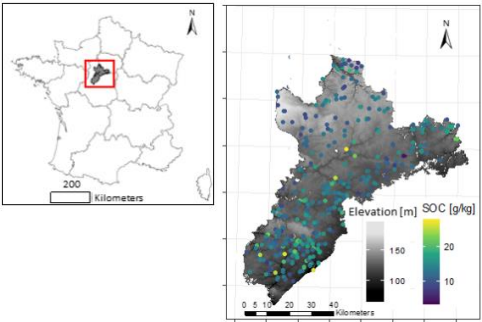


Loiseau *et al.*, 2019

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

La télédétection : des covariables dans le modèle SCORPAN

Cartographie de la teneur en CO

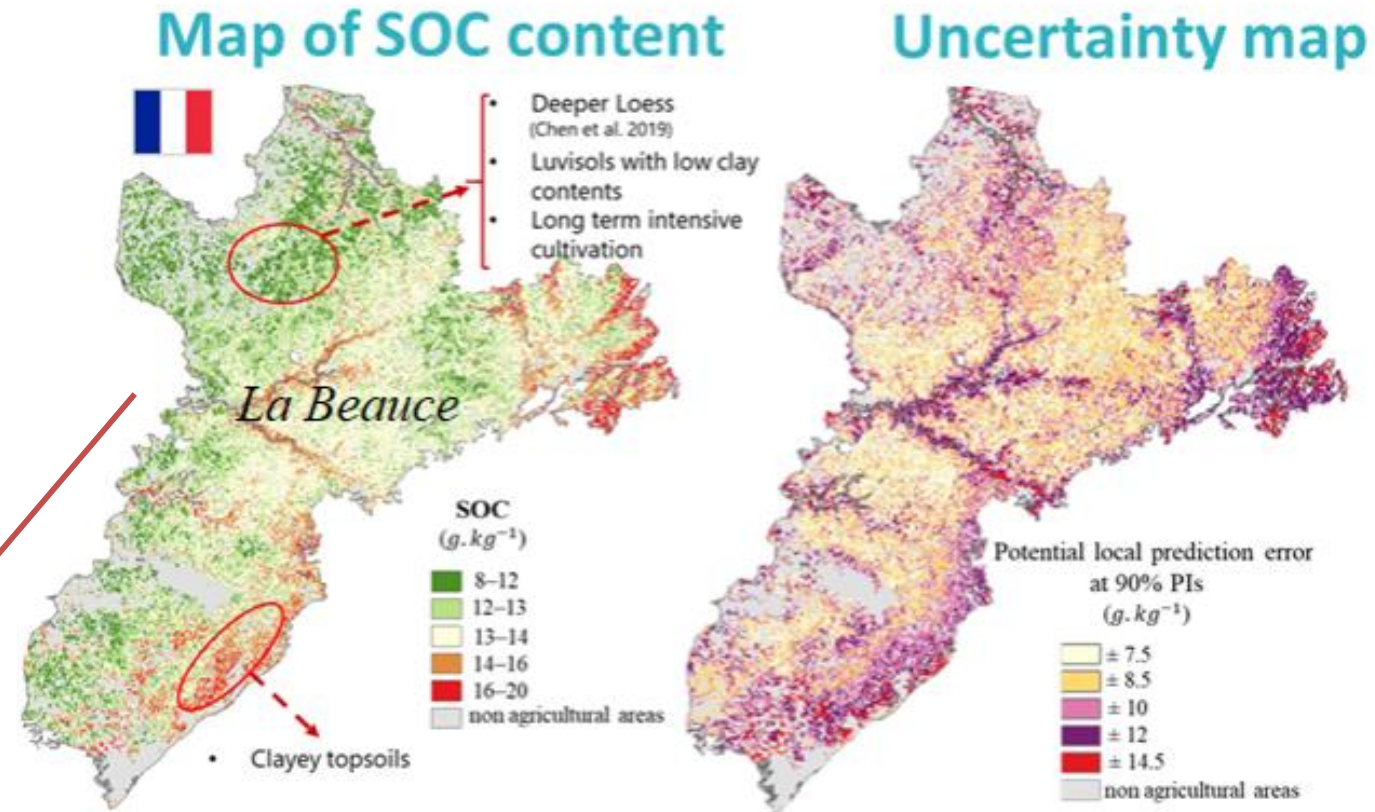


Covariables du modèle :

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

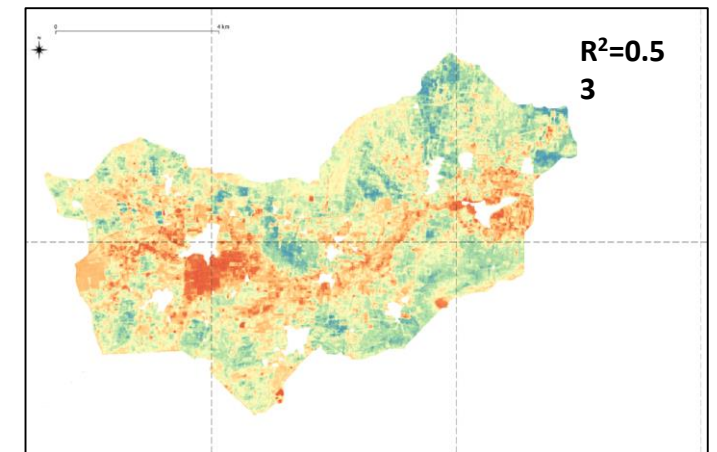
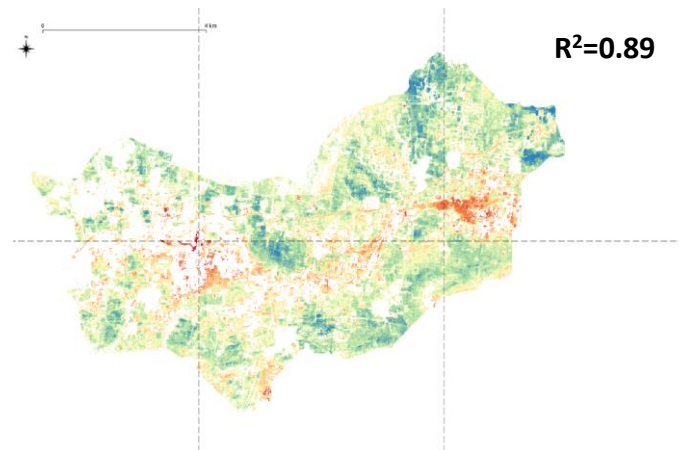
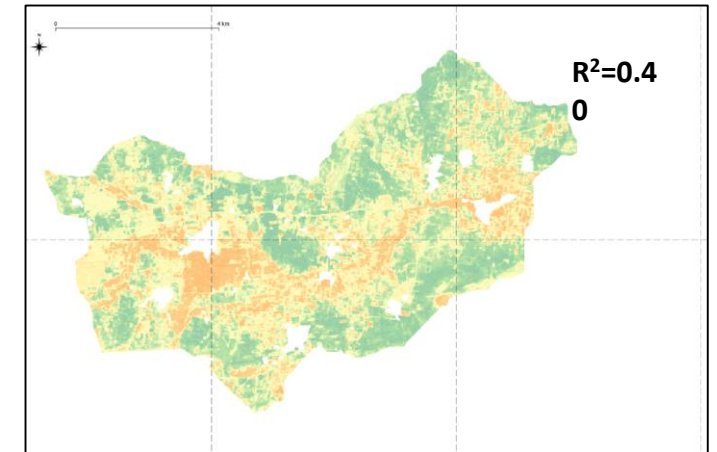
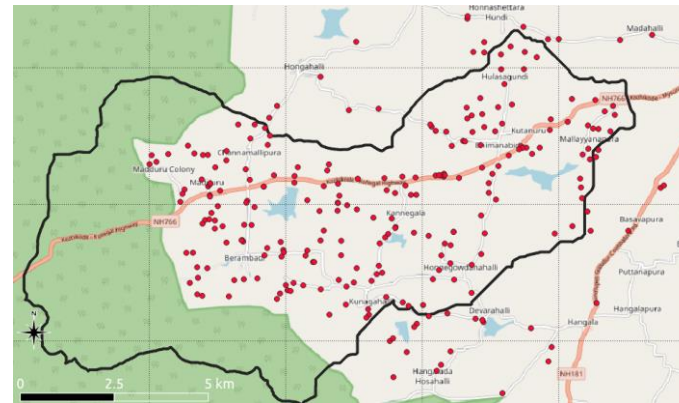


Urbina-Salazar et al., 2023
<https://doi.org/10.3390/rs15092410>

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

DSM

Cartographie de la teneur en Argile texturale

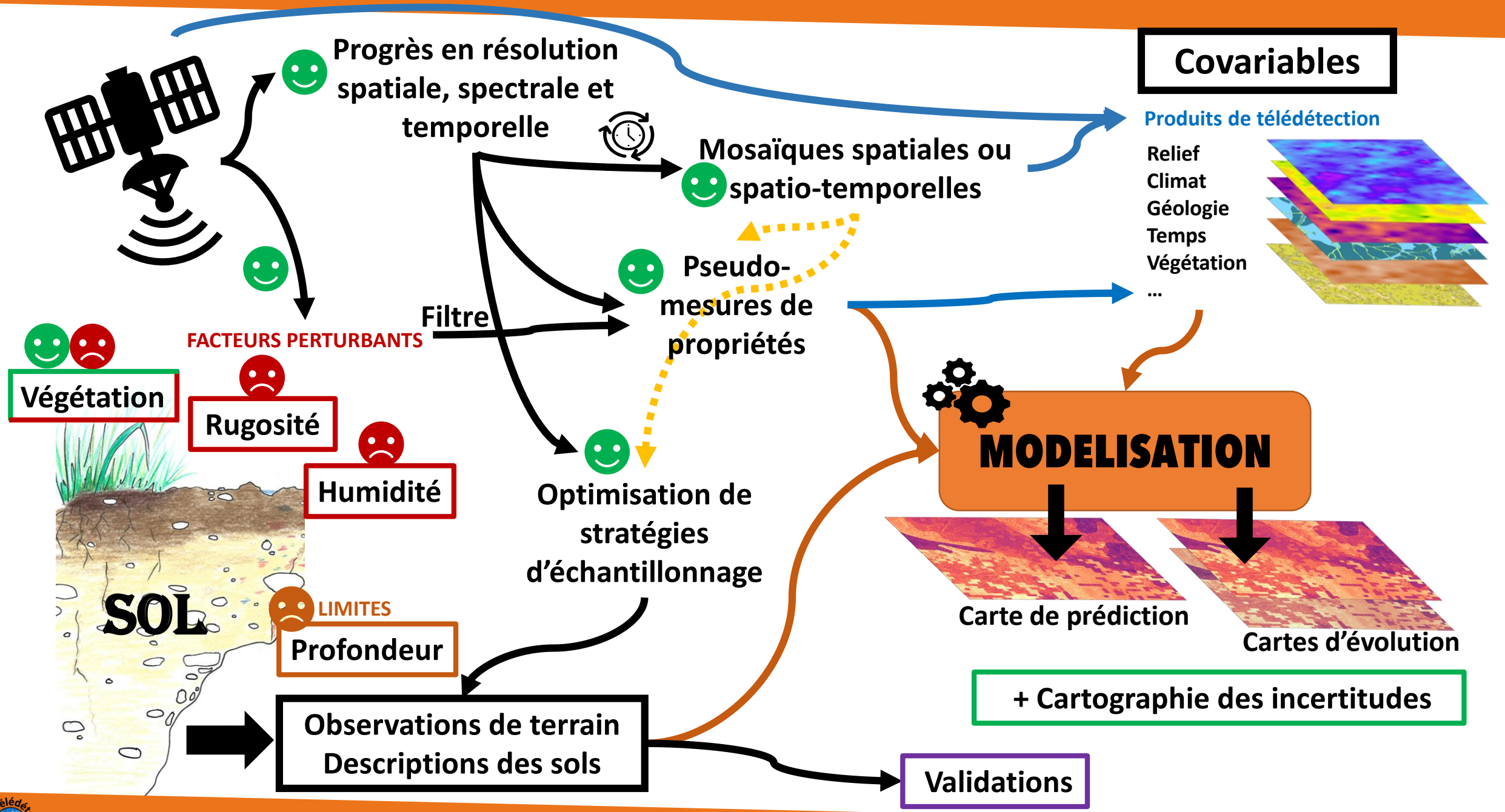


Covariables du modèle :

- 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>

