

# Cartographie des sols par Modélisation Statistique (CSMS) en Occitanie

Philippe Lagacherie<sup>1</sup>, Amine Chemchem<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LISAH, Univ Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier,

<sup>2</sup> ATOS, Montpellier

LISAH

Atos

# Cartographie Par Modélisation Statistique : Définition et historique

CSMS : la production d'estimations spatialisées de types de sol ou de valeurs de propriétés des sols en tout point de l'espace par des modèles statistiques alimentés par des données spatiales environnementales et calibrés avec les données de sol disponibles sur la zone d'étude. (Voltz et al, 2018)

1985-95 : Travaux pionniers en Australie, France et USA

2003 : La CSMS est reconnue comme discipline scientifique



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

Geoderma 117 (2003) 3–52

GEODERMA

[www.elsevier.com/locate/geoderma](http://www.elsevier.com/locate/geoderma)

On digital soil mapping

A.B. McBratney<sup>a,\*</sup>, M.L. Mendonça Santos<sup>b</sup>, B. Minasny<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Australian Centre for Precision Agriculture, Faculty of Agriculture, Food and Natural Resources, McMillan Building A05, The University of Sydney, Sydney, New South Wales 2006, Australia

<sup>b</sup> EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rua Jardim Botânico 1024, 22.460-000, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

Received 19 November 2002; received in revised form 14 May 2003; accepted 5 June 2003



2009: projet GlobalSoilMap : vers l'opérationnalité

POLICYFORUM

ENVIRONMENTAL SCIENCE

Digital Soil Map of the World

Pedro A. Sanchez,<sup>1\*</sup> Sonya Ahmed,<sup>2</sup> Florenço Carré,<sup>3</sup> Alfred E. Hartemink,<sup>3</sup> Jonathan Hempel,<sup>4</sup> Jeroen Huising,<sup>5</sup> Philippe Lagacherie,<sup>6</sup> Alex B. McBratney,<sup>1</sup> Neil J. McKenzie,<sup>1</sup> Maria de Lourdes Mendonça-Santos,<sup>7</sup> Budiman Minasny,<sup>1</sup> Luca Montanarella,<sup>8</sup> Peter Odeh,<sup>9</sup> Cheryl A. Palm,<sup>1</sup> Jeffrey D. Sachs,<sup>10</sup> Keith D. Shepherd,<sup>11</sup> Tor Gunnar Vagan,<sup>12</sup> Bernard Vanlauwe,<sup>13</sup> Markus G. Walsh,<sup>1</sup> Leigh A. Winowiecki,<sup>1</sup> Gan-Lin Zhang<sup>14</sup>

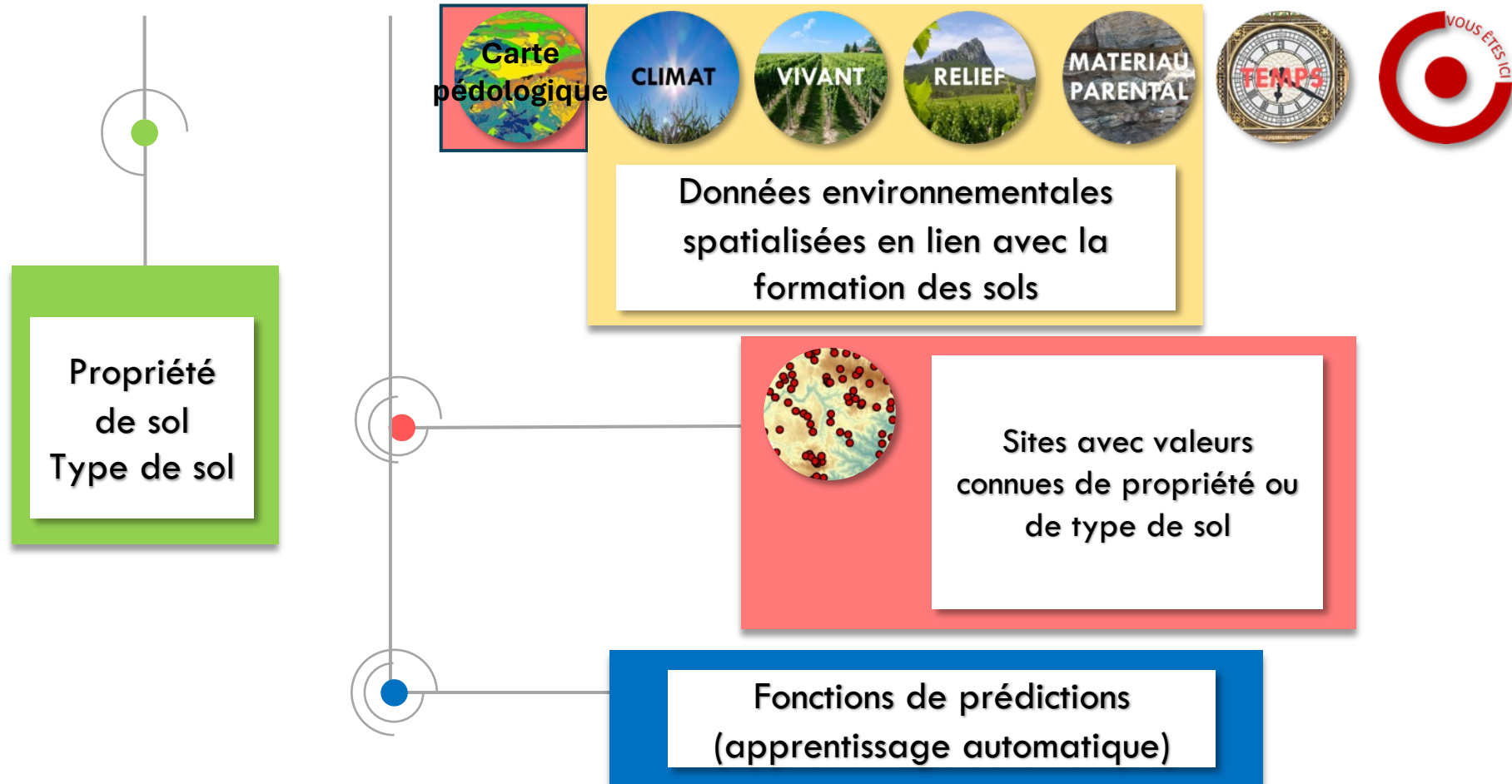
Increased demand and advanced techniques could lead to more refined mapping and management of soils.



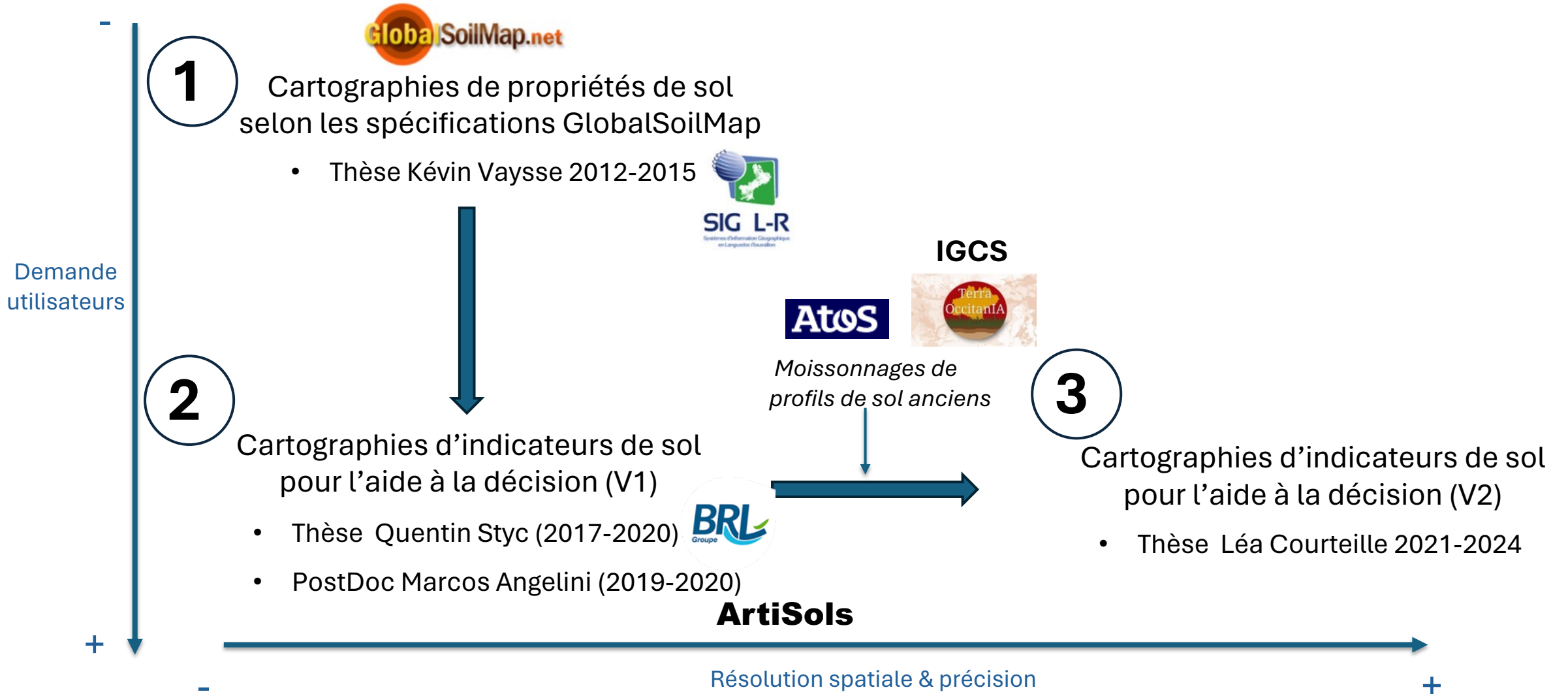
# Cartographie Par Modélisation Statistique : Principe général

$$S = f(s, c, o, r, p, a, n) + \varepsilon$$

Erreur  
estimée

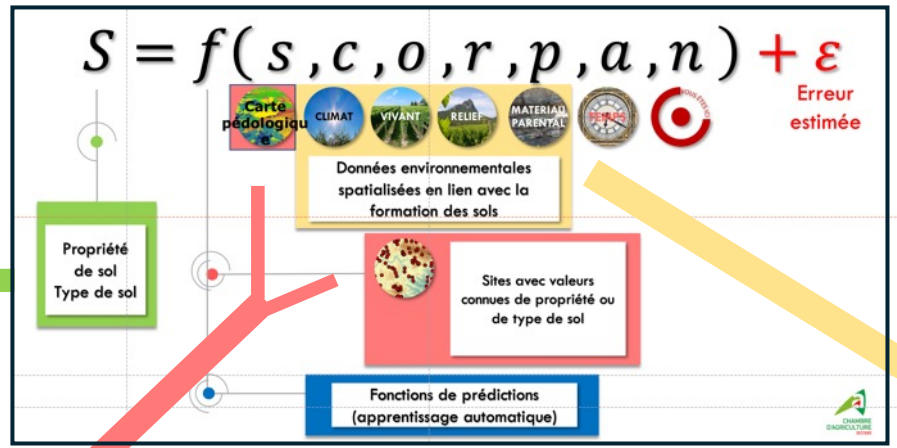
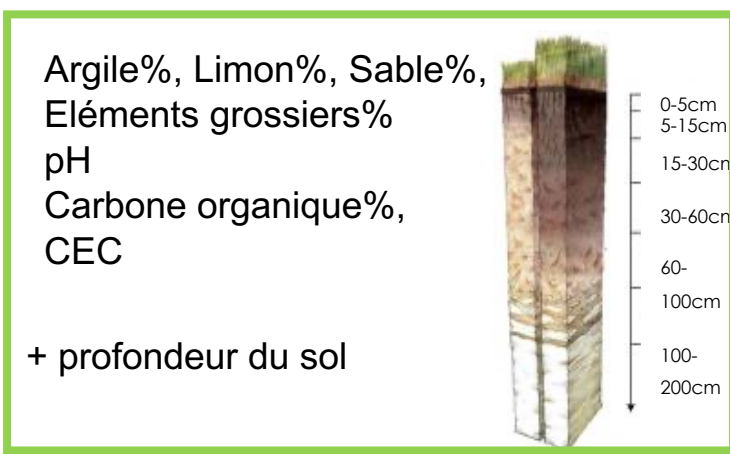


# CSMS en Languedoc-Roussillon: Les trois grandes étapes de son application

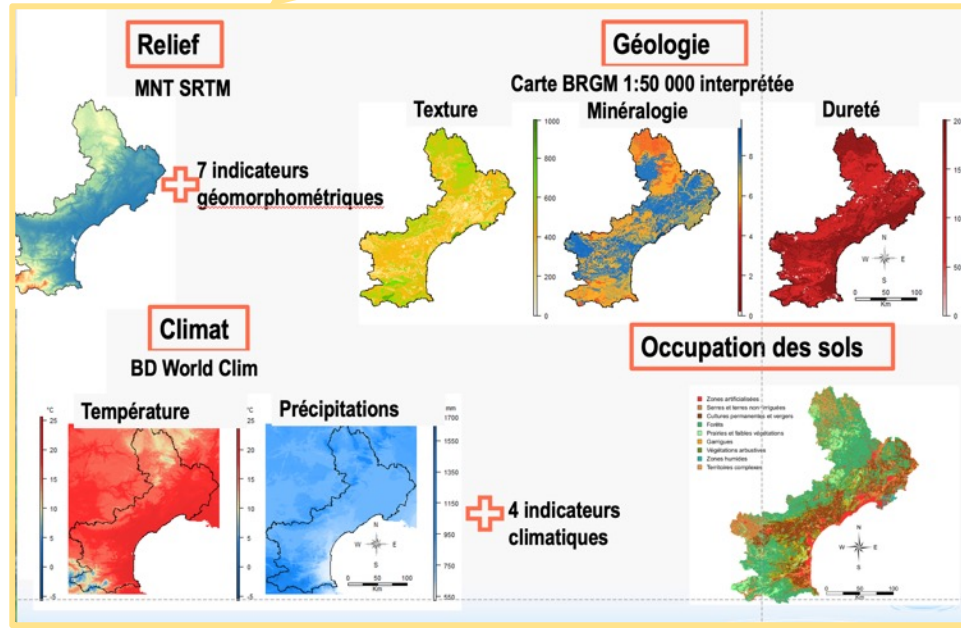


# Cartographies de propriétés de sol selon les spécifications GlobalSoilMap

(Thèse Kévin Vaysse, 2012-2015)

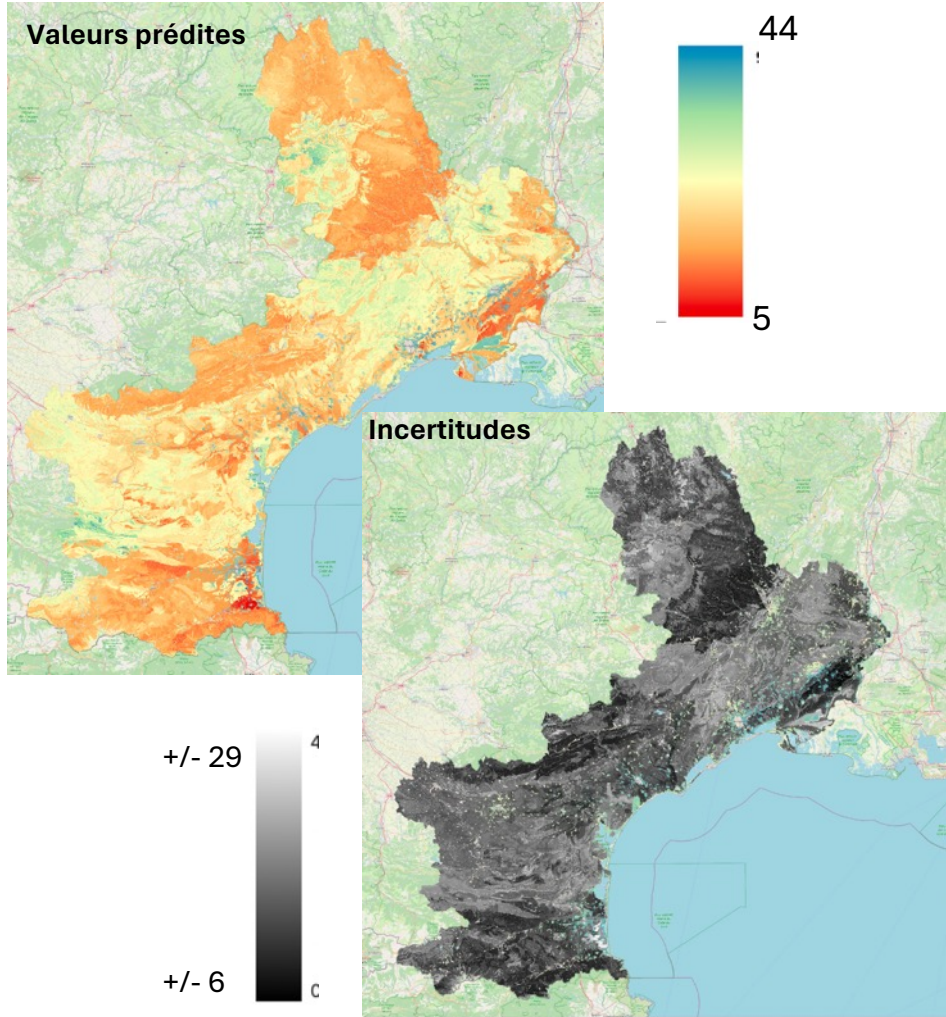


Algorithme:  
Forêt de régression quantile

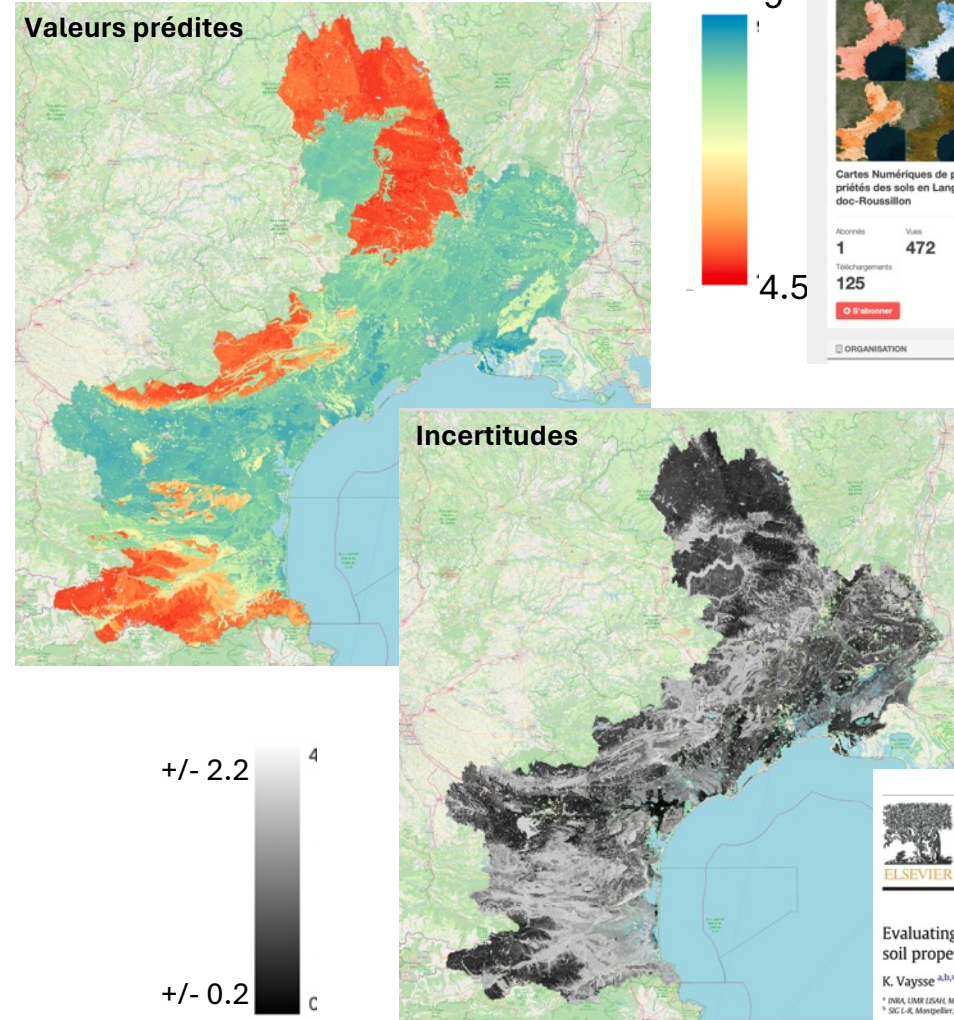


# Exemples de produits GlobalSoilMap Languedoc-Roussillon

Taux d'argile 0-5 cm (%)



pH 30-60 cm

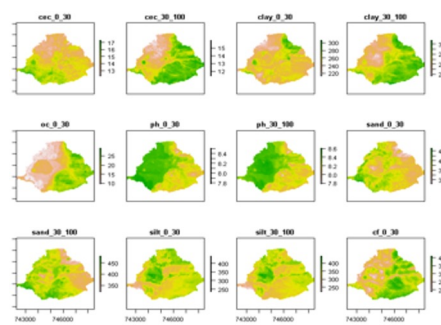


# Cartographies d'indicateurs de sol pour l'aide à la décision

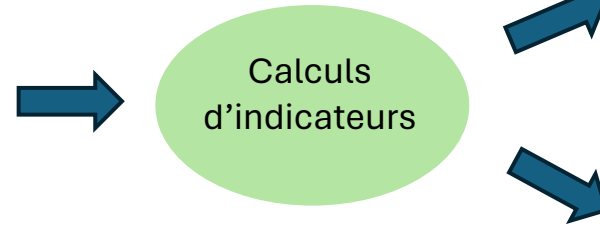
## Deux indicateurs demandés par utilisateurs en Occitanie:

- Réservoir Utile du sol (gestion de la ressource en eau)
- Indice de qualité des sols (planification urbaine)

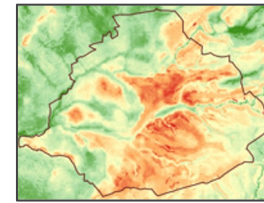
## Démarche: CSMS multivariable



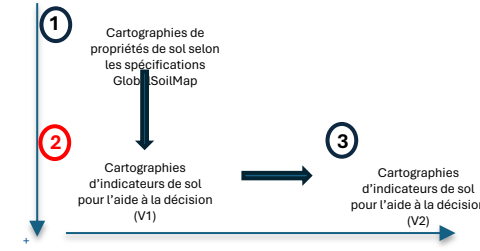
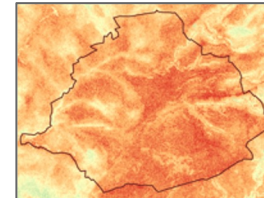
Spatialisations séparées de composants des indicateurs (propriétés de sol)



Valeurs prédites



Incertitudes

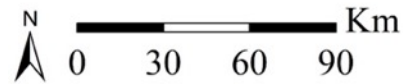
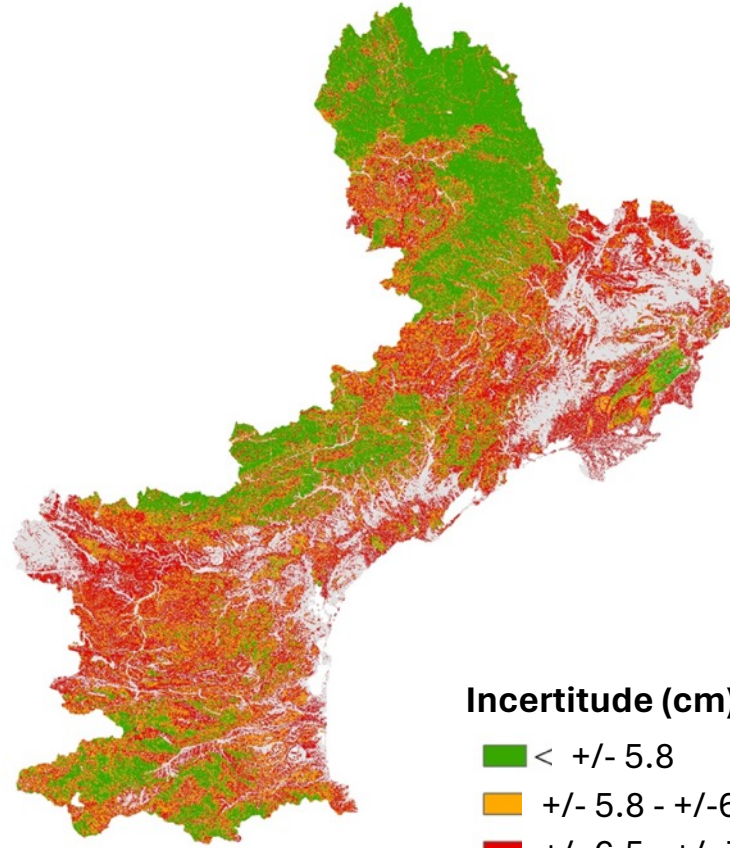
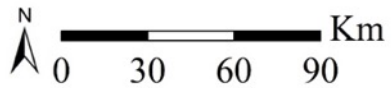
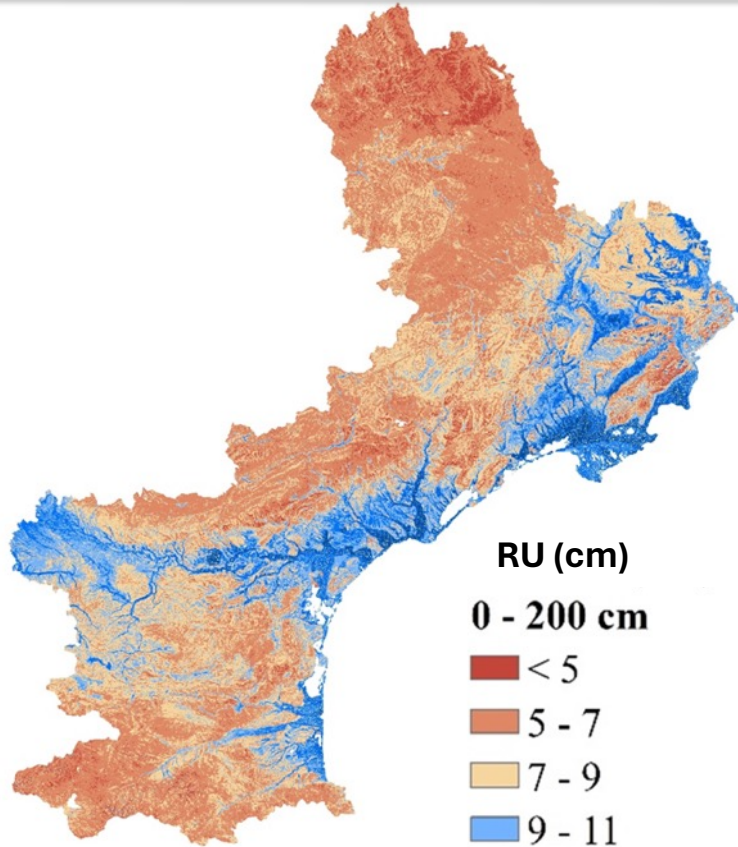
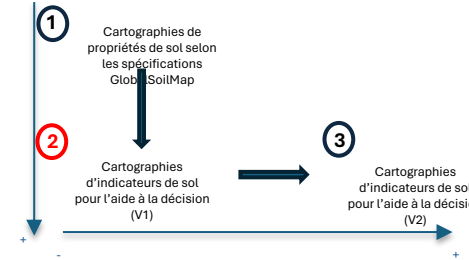


## Défi méthodologique: propager correctement les incertitudes des cartes de propriétés de sol

- Réservoir Utile : formule de propagation d'erreur dans une opération arithmétique (*Styc & Lagacherie, 2021*)
- Indice de qualité des sols: simulations stochastiques basées sur un modèle géostatistique (*Angelini et al, 2022*)

# Réservoir Utile du sol du Languedoc Roussillon

(Thèse Quentin Styc, 2017-2020)



- Variabilités de RU représentées conformes aux connaissances
- Gain de résolution spatiale / RRP



- Forte incertitude prédite
- Uniquement 12% de variabilité du RU représentée

Geoderma 391 (2021) 114968



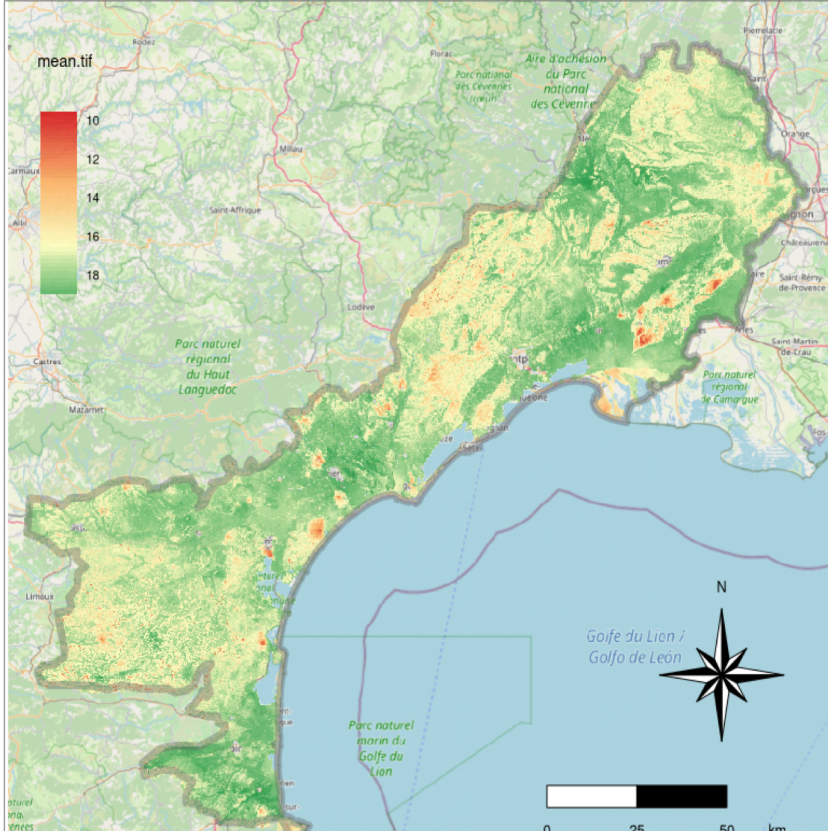
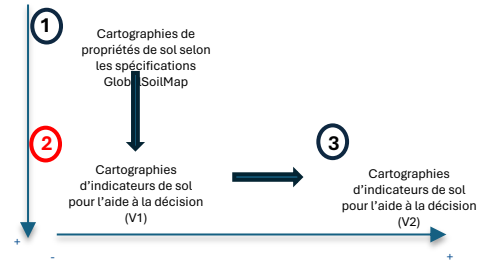
Uncertainty assessment of soil available water capacity using error propagation: A test in Languedoc-Roussillon

Styc Quentin<sup>a,b</sup>, Lagacherie Philippe<sup>a,\*</sup>

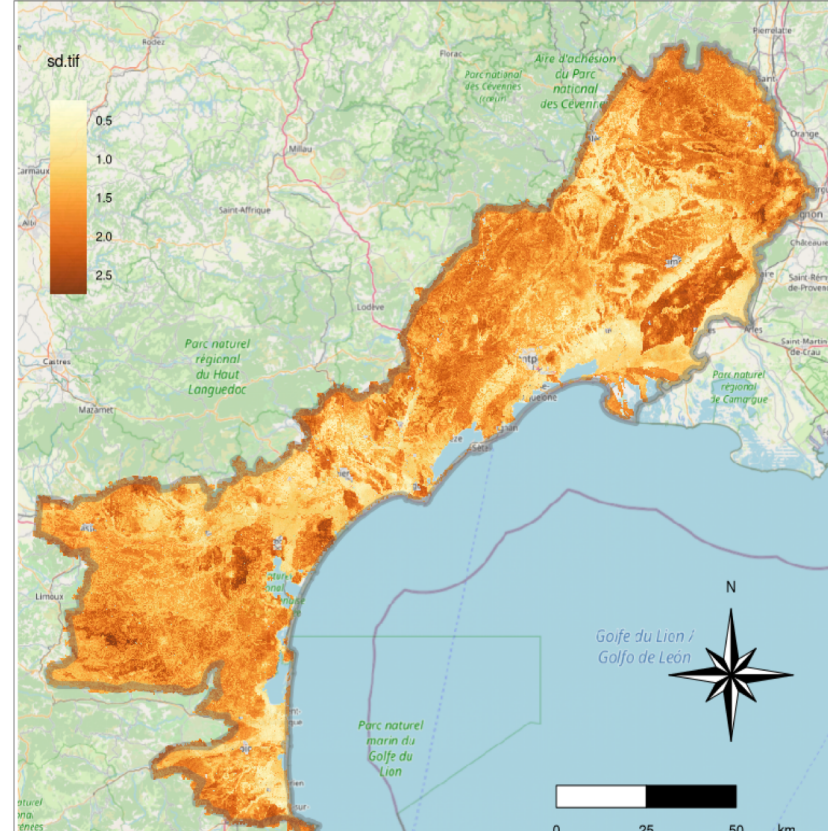




# Indice de multifonctionnalité (qualité) des sols sur la zone côtière d'Occitanie



Valeurs prédites



Incertitudes



- Variabilités de IQS représentées conformes aux connaissances
- Gain de résolution spatiale / RRP



- Forte incertitude prédite
- Uniquement 7 % de variabilité représentée

DOI: 10.1111/ejss.13345

ORIGINAL ARTICLE

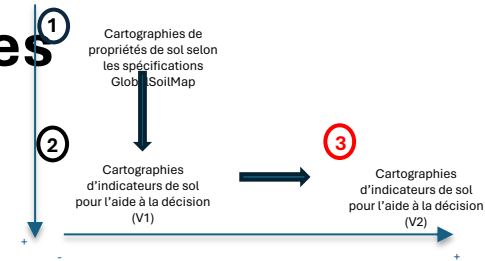


A multivariate approach for mapping a soil quality index and its uncertainty in southern France

M. E. Angelini<sup>1,2</sup> | G. B. M. Heuvelink<sup>3,4</sup> | P. Lagacherie<sup>2</sup>



# Enrichissement de la Base régionale de données de profils pédologiques

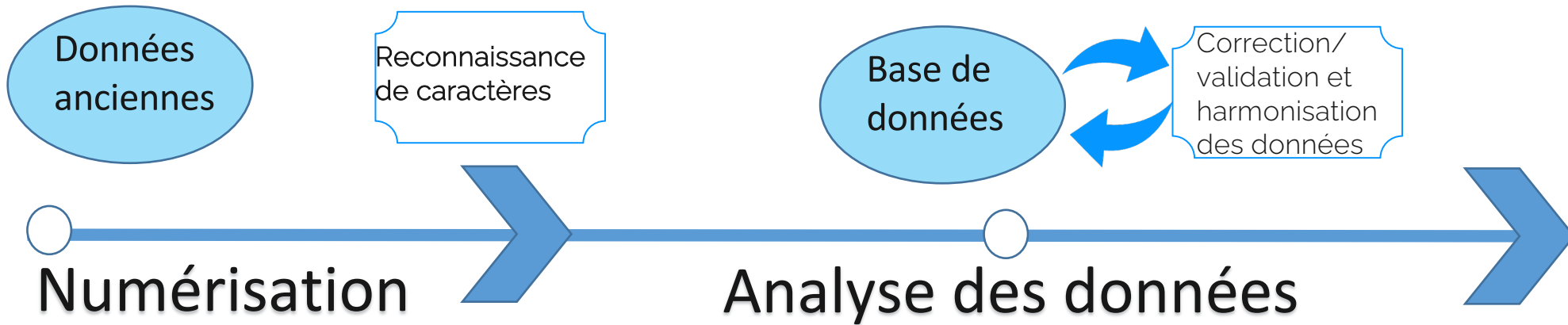


Etudes - projets	Nombre de profils	Auteurs	dates profils
Carte 1/100 000 Argelès	72	INRA, CNABRL	1960-65
Carte 1/100 000 Lodève	327	INRA-IFN	1969-85
Carte 1/25 000 BV Peyne	20	INRA	2000-10
Projet IGCS CAPVAL	71	GeoSOLEAU, ACH	1992-98
Projet IGCS 2021	1 192	SIGALES, GeoSOLEAU	1985-2006
Projet TerraOccitania	6 752	CNABRL	1955-92

# De la fiche de sol ancienne à la donnée stockée dans DONESOL



Projet cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional



# Vue sur les données anciennes

## Traitement semi-automatique des fiches de sol

- 4 formats différents
- 6752 documents traités

Format 1

Format 2

C.N.A.B.R.L. D.E.M.V. S.E.S. (mod. 843)

### FICHE DE SOL

211 Fe 3-4 Fe 2

**CARACTÈRES GÉNÉRAUX**

OBSERVATEUR: VIDR  
 DATE DE PRÉLEVEMENT: 21.11.62  
 CARNET N° 167 FEUILLET N° 6  
 CARTE 1/50.000  
 COORDONNÉES LAMBERT: X: 688,700; Y: 130,760  
 ALTITUDE: 15 m

**CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES** (Feuille N° 502)

N°	Profondeur	Pourcentage en poids				Viscosité de rotation		Δσ	C <sub>u</sub>	C <sub>l</sub>	Date
		P	O	S	S.L.	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>				
I 111	0-10	1	0	1	99			1,50		25	13,4
V 116	10-60	0	0	100		8,7·10 <sup>-4</sup>	6,7·10 <sup>-4</sup>	1,35		3	27-10,9
V 449	60-120	0	0	100		1,1·10 <sup>-2</sup>	9,3·10 <sup>-4</sup>	1,30		4	23-9,5

C.N.A.B.R.L. S.E.S. (mod. 843)

### CARACTÉRISTIQUES PÉDOLOGIQUES

211 Fe 3-4 Fe 2

**CARACTÈRES DU SOL EN PLACE**

Horizon	N°	Épaisseur	Couleur	Texture	Structure	Sous-structure	Consistance	Reaktion HCl %	Observations complémentaires
1	10	10	brun reflets lie de vin	4	Micro polyédrique		Friable	++	Horizon de labour. Réaction négative.
2	60	50	brun reflets lie de vin	4	Polyédrique à micropolyédrique		Friable	++	Exploité par racines et radicelles. Porosité bonne. Rare débris de coquilles. Rare graviers et galets noirs.
3	120	60	brun reflets lie de vin	4	Polyédrique à micropolyédrique		Friable	++	Racines et radicelles. Porosité moyenne. Rare débris de coquilles. Rare graviers et galets colluvionnés. Gorgé d'eau.

**ANALYSES**

**Granulométrie** (en résultats non exprimés en % de terre sèche)

N°	Profondeur	Pourcentage en poids				Viscosité de rotation		Δσ	C <sub>u</sub>	C <sub>l</sub>	Date
		P	O	S	S.L.	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>				
I 669	0-20	0	3	3	97			1,55		16	7
V 155	20-55	0	2	2	98	8,8x10 <sup>-4</sup>	5,7x10 <sup>-4</sup>	1,52		5	15
P 444	55-120	2	6	8	92	3,5x10 <sup>-4</sup>	3,5x10 <sup>-4</sup>	1,46		6	14

**ANALYSE CHIMIQUE - COMPLEXE ABSORBANT - TESTS DES SOLS SALÉS**

N°	Profondeur	Cations				Anions				pH	C <sub>u</sub>	C <sub>l</sub>	Date		
		Tot	Asf	Ca	Mg	K	Na	Cl	NO <sub>3</sub>						
1	4														
2	7														
3	5														

**CONCLUSIONS :**  
 Choix des cultures limité par les fondations.  
 Epaisseur utile : 120 cm.

C.N.A.B.R.L. S.E.S. (mod. 843)

### FICHE DE SOL

806 Be 3 Bn 1

**CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES**

OBSERVATEUR: JB/JV  
 DATE DE PRÉLEVEMENT: 25/5/58  
 FEUILLE N° 23  
 CARNET N° 69 FEUILLET N° 11  
 LOCALITÉ: SEZIEUX-NORD  
 COORDONNÉES LAMBERT: X: 861,650; Y: 118,180  
 ALTITUDE: 36 m

**ANALYSES**

**granulométrie** (en résultats non exprimés en % de terre sèche)

N°	Profondeur	Pourcentage en poids				Viscosité de rotation		Δσ	C <sub>u</sub>	C <sub>l</sub>	Date
		P	O	S	S.L.	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>				
I 669	0-20	0	3	3	97			1,55		16	7
V 155	20-55	0	2	2	98	8,8x10 <sup>-4</sup>	5,7x10 <sup>-4</sup>	1,52		5	15
P 444	55-120	2	6	8	92	3,5x10 <sup>-4</sup>	3,5x10 <sup>-4</sup>	1,46		6	14

**ANALYSE CHIMIQUE - COMPLEXE ABSORBANT - TESTS DES SOLS SALÉS**

N°	Profondeur	Cations				Anions				pH	C <sub>u</sub>	C <sub>l</sub>	Date		
		Tot	Asf	Ca	Mg	K	Na	Cl	NO <sub>3</sub>						
1	18														
2	19														
3	12														

**CONCLUSIONS :**  
 Toute culture en assurant le drainage.  
 Partes crues  
 Irrigation : à la règle ou aspiration

**CARACTÉRISTIQUES PÉDOLOGIQUES**

806 Be 3 Bn 1 Feuille N° 17

**CARACTÈRES DU SOL EN PLACE**

GÉOLOGIE: Alluvion du Lirou  
 USAGE ACTUEL: vignes  
 VÉGÉTATION SPONTANÉE: ...

**ÉTAT DE LA SURFACE**  
 ORIGINE ET TYPE DU SOL: Sol alluvial peu évolué.

N°	Profondeur	Couleur	Texture	Structure		Consistance	Reaktion HCl %	Observations complémentaires
				Meso	Macro			
1	20	beige D 63	2	continue	Pseudoparticulaire à granuleuse	moulu	++	R et r. Horizon de culture
2	55	beige orangé D 72	2	continue	polyédrique fragile	friable	++	R et r. Nrx. graviers poreux. Coquilles Pseudomycellium abondantes. Débris de galets et galets.
3	100	brun rougeâtre B 63	2	continue	polyédrique fragile	friable	++	R et r. Nombreux graviers poreux. Coquilles Débris de galets et galets.

**ANALYSES : granulométrie** (résultats exprimés en % pour la durée dans l'état de séchage)

N°	Profondeur	Pourcentage en poids				Viscosité de rotation		Δσ	C <sub>u</sub>	C <sub>l</sub>	Date
		P	O	S	S.L.	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>				
I 669	0-20	0	3	3	97			1,55		16	7
V 155	20-55	0	2	2	98	8,8x10 <sup>-4</sup>	5,7x10 <sup>-4</sup>	1,52		5	15
P 444	55-120	2	6	8	92	3,5x10 <sup>-4</sup>	3,5x10 <sup>-4</sup>	1,46		6	14

**ANALYSE CHIMIQUE - COMPLEXE ABSORBANT - TESTS DES SOLS SALÉS**

N°	Profondeur	Cations				Anions				pH	C <sub>u</sub>	C <sub>l</sub>	Date		
		Tot	Asf	Ca	Mg	K	Na	Cl	NO <sub>3</sub>						
1	18														
2	19														
3	12														

# Entraînement du modèle de reconnaissance du texte

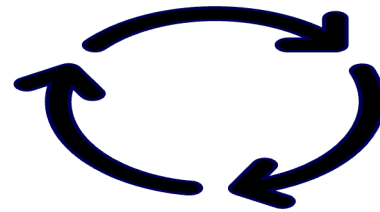
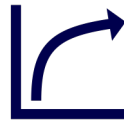
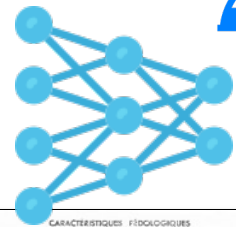


Soumission automatique des documents  
scannés

Entraînement du  
Modèle

(h[s])  
HYPERSCIENCE

Azure AI | Document Intelligence Studio



Labélisation des données (20 documents / format)

The screenshot shows the (h[s]) interface for document analysis. The main window displays a scanned document titled "FICHE DE SOL" (Soil Card) with various fields filled out. The interface includes a sidebar with navigation options like "Tâches", "Soumissions", "Les flux", "Une bibliothèque", "Rapports", "Utilisateurs", and "Administration". The right sidebar shows a list of fields extracted from the document, such as "observateur", "date\_prelevement", "carnet\_num", "feuille\_num", "carte\_1:50k", "carte\_1:20k", "numero", and "localite". The document content includes fields like "OBSERVATEUR", "DATE DE PRÉLEVEMENT", "CARNET N°", "FEUILLET N°", "CARTE 1/50.000", "LOCALITE", "COORDONNÉES", "ALTITUDE", "SITUATION TOPOGRAPHIQUE", "INCLINAISON", "RELIEF", and "SIGNES D'ÉROSION".

# Évaluation du modèle de reconnaissance du texte

Count of Submission ID	Column Labels	FALSE	TRUE (blank)	Grand Total	Cumulative Automation	Automation %	Cumulative Errors	Accuracy %
0.95-1			64	64	64	1,1%	0	100,0%
0.9-0.95	1	2884		2885	2949	51,2%	1	100,0%
0.85-0.9	1	902		903	3852	66,9%	2	99,9%
0.8-0.85	3	519		522	4374	75,9%	5	99,9%
0.75-0.8	4	286		290	4664	80,9%	9	99,8%
0.7-0.75	8	178		186	4850	84,2%	17	99,6%
0.65-0.7	6	100		106	4956	86,0%	23	99,5%
<b>0.6-0.65</b>	<b>4</b>	<b>87</b>		<b>91</b>	<b>5047</b>	<b>87,6%</b>	<b>27</b>	<b>99,5%</b>
0.55-0.6	5	65		70	5117	88,8%	32	99,4%
0.5-0.55	10	64		74	5191	90,1%	42	99,2%
0.45-0.5	9	59		68	5259	91,3%	51	99,0%
0.4-0.45	16	42		58	5317	92,3%	67	98,7%
0.35-0.4	11	55		66	5383	93,4%	78	98,6%
0.3-0.35	13	32		45	5428	94,2%	91	98,3%
0.25-0.3	17	37		54	5482	95,1%	108	98,0%
0.2-0.25	11	39		50	5532	96,0%	119	97,8%
0.15-0.2	24	45		69	5601	97,2%	143	97,4%
0.1-0.15	15	36		51	5652	98,1%	158	97,2%
0.05-0.1	46	8		54	5706	99,0%	204	96,4%
0-0.05	55	1		56	5762	100,0%	259	95,5%
<0 or (blank)					5762	100,0%	259	95,5%
<b>Grand Total</b>	<b>259</b>	<b>5503</b>		<b>5762</b>				

Compromis entre le taux de l'automatisation et le taux de précision

## Base de données

- 4 formats différents
- 6752 documents traités

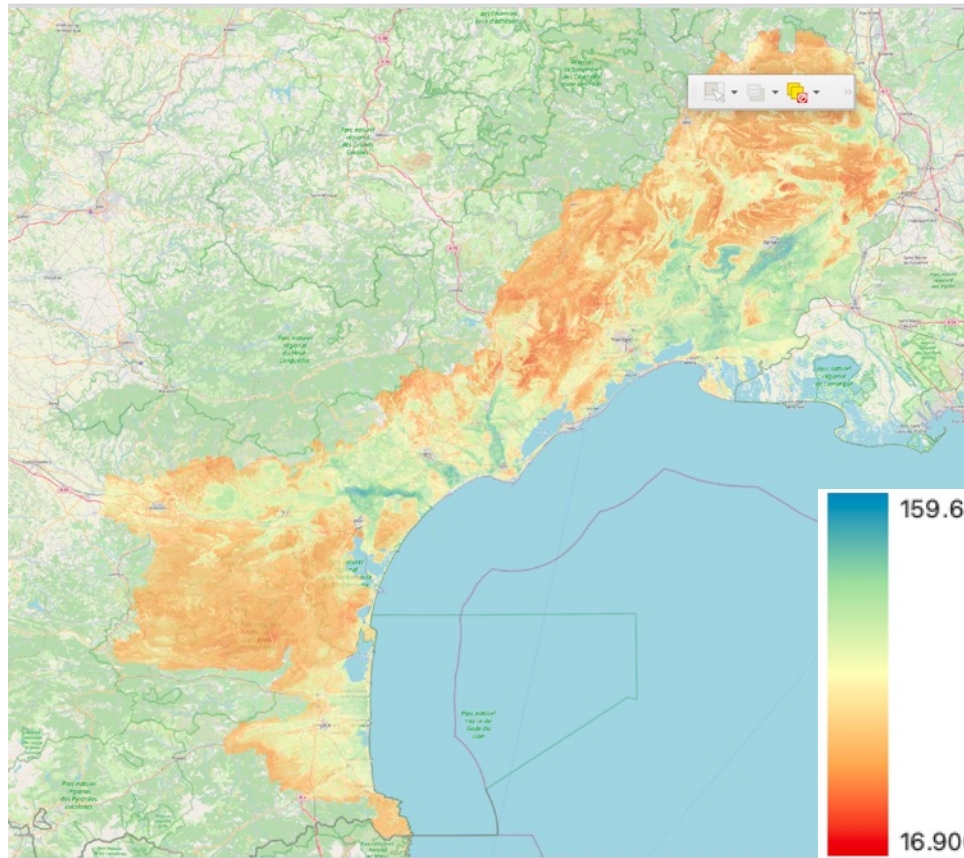
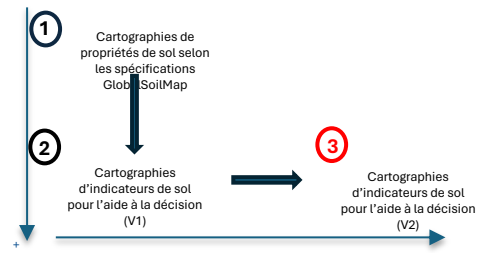
## Implémentation of the system :

- Accuracy : 99,5 %
- Automatisation : 87,6 %
- 36 champs à compléter manuellement  
≈ - **3 min / document**

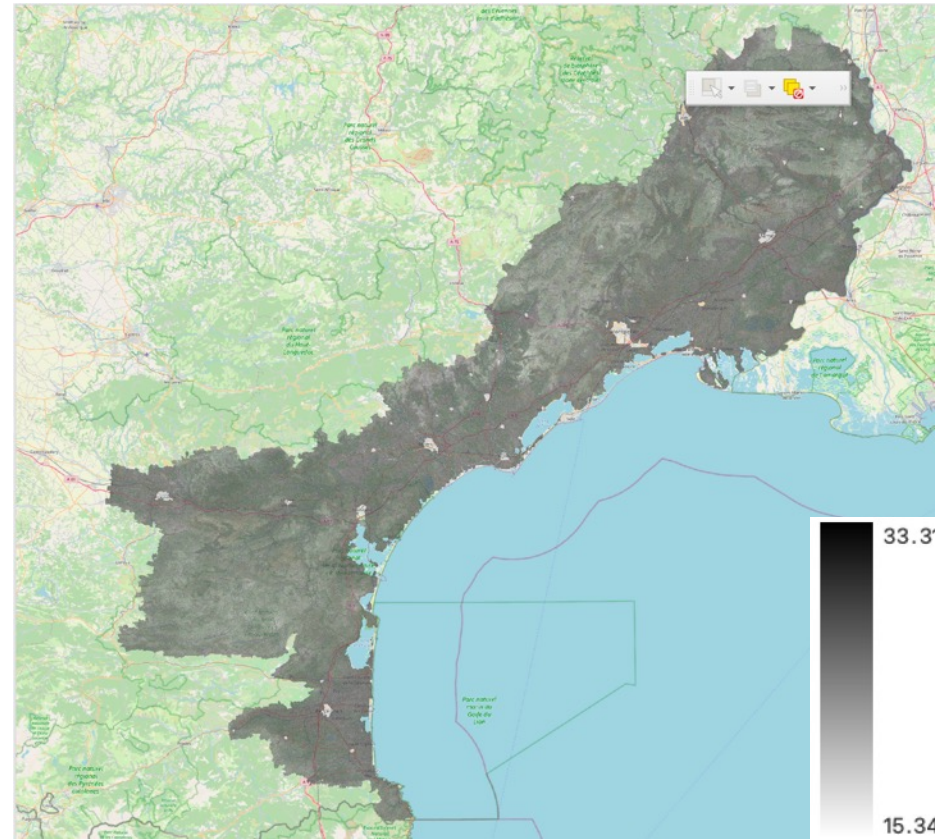
	Sans notre solution	Avec notre solution	Gain
<b>1 fiche</b>	13 minutes	3 minutes	<b>10 minutes</b>
<b>6752 fiches</b>	182 jours	57 jours	<b>125 jours</b>

# Réservoir Utile du sol (0-100 cm) de la zone côtière d'Occitanie

Modèle CSMS construit avec 9135 profils de sols (1 profil / 1.3 km<sup>2</sup>)



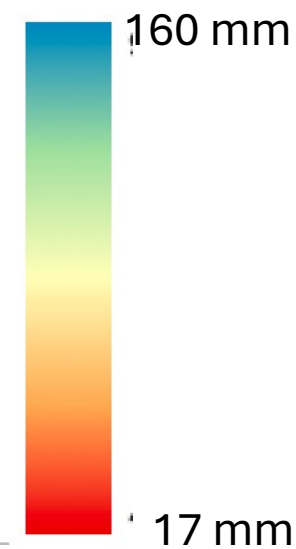
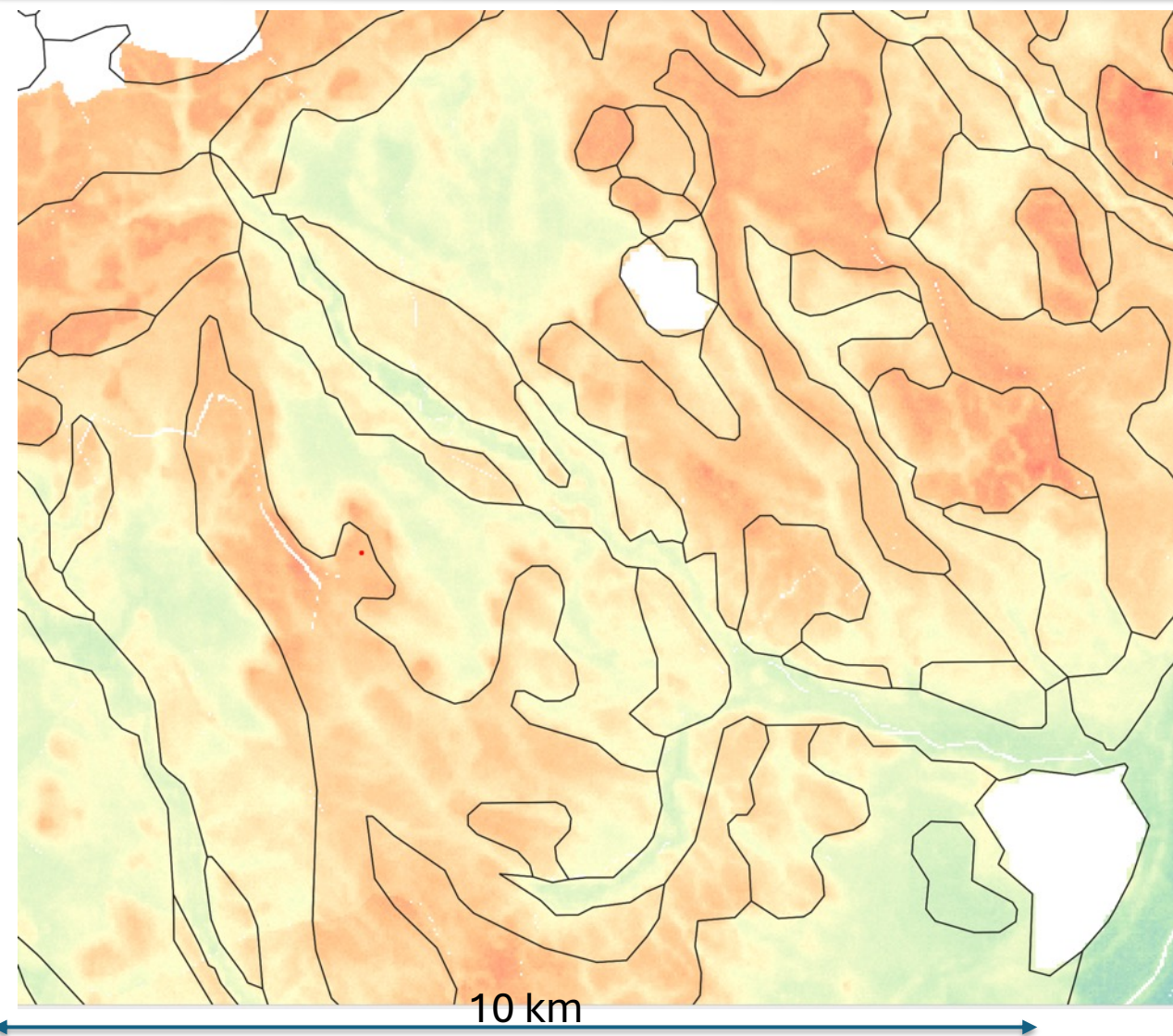
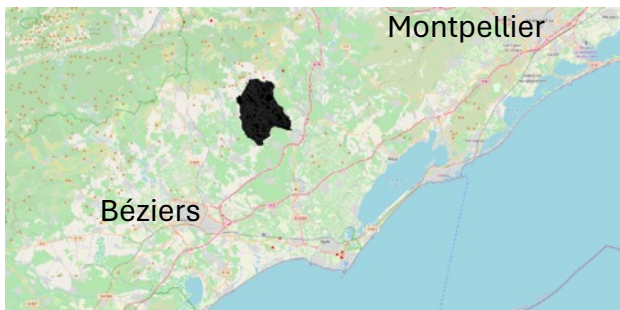
Valeurs prédites



Incertitudes

~30 % de variabilité de RU représentée

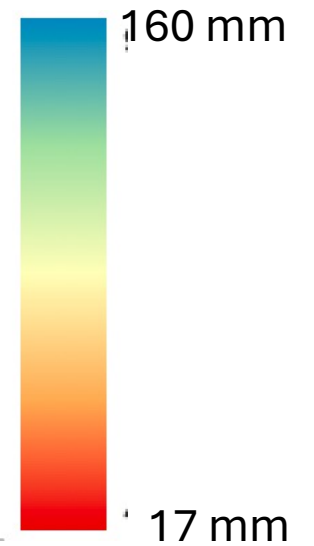
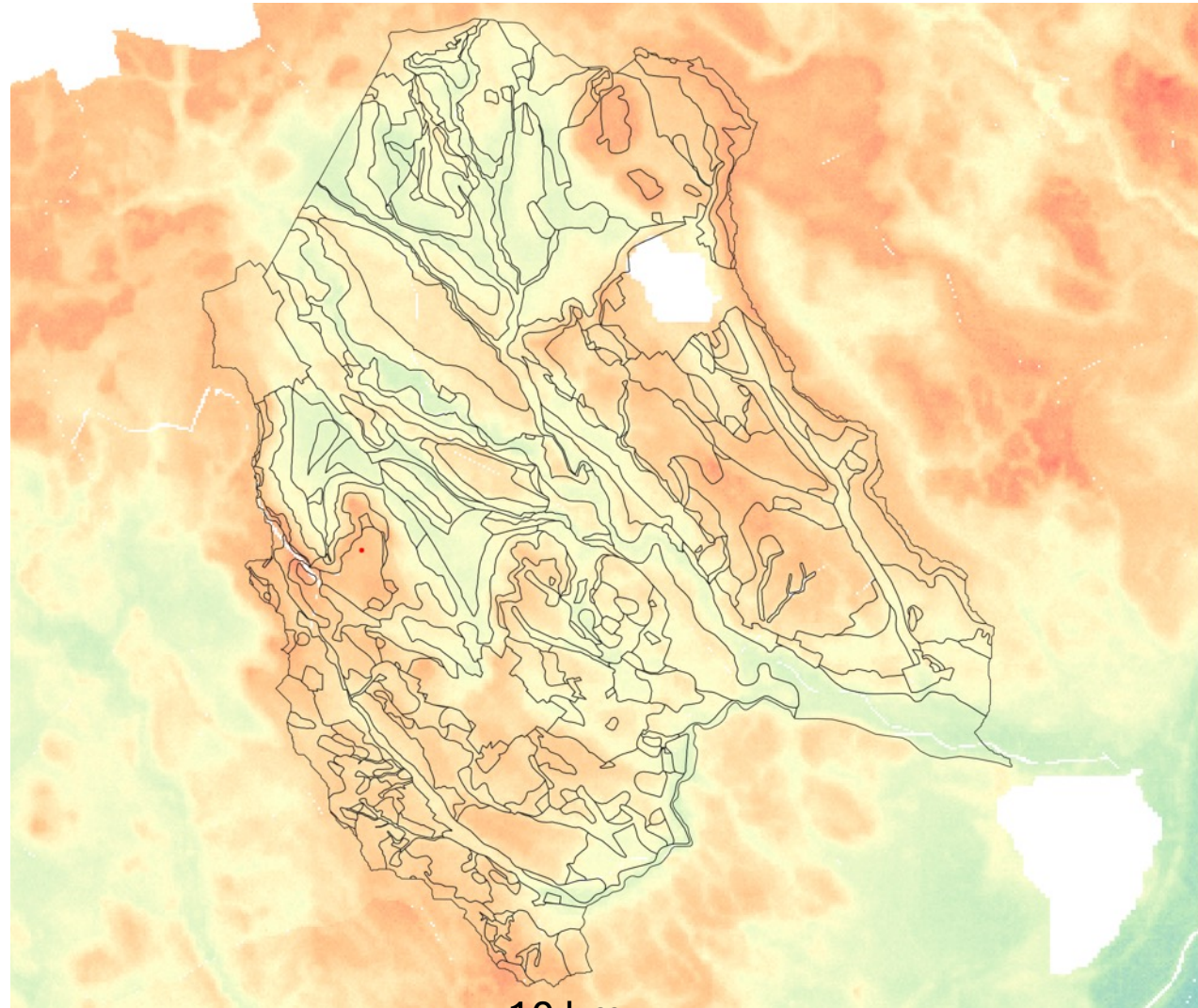
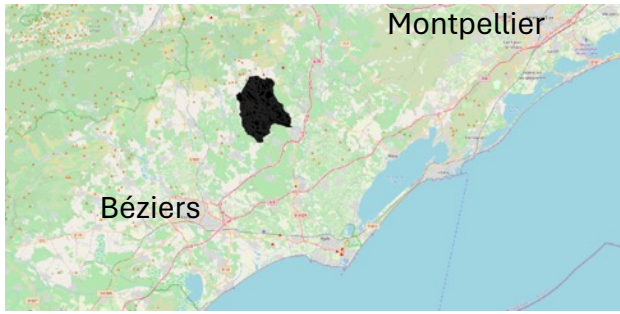
# Cartes de Réservoir Utile du sol (0-100 cm) et RRP



Polygones du RRP



# Cartes de Réservoir Utile du sol (0-100 cm) et carte 1/25 000 BV Peyne (Coulouma et al, 2004)

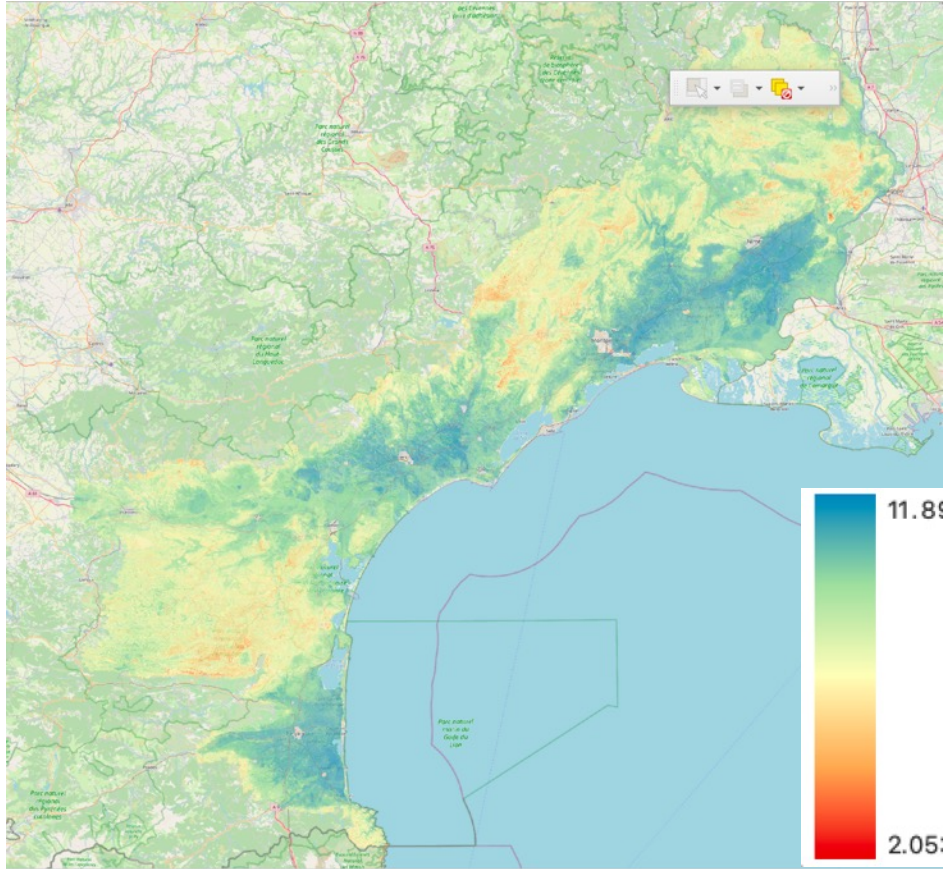
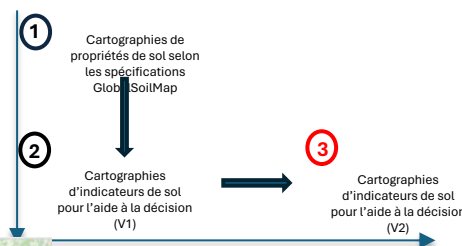


Polygones carte  
1/25 000

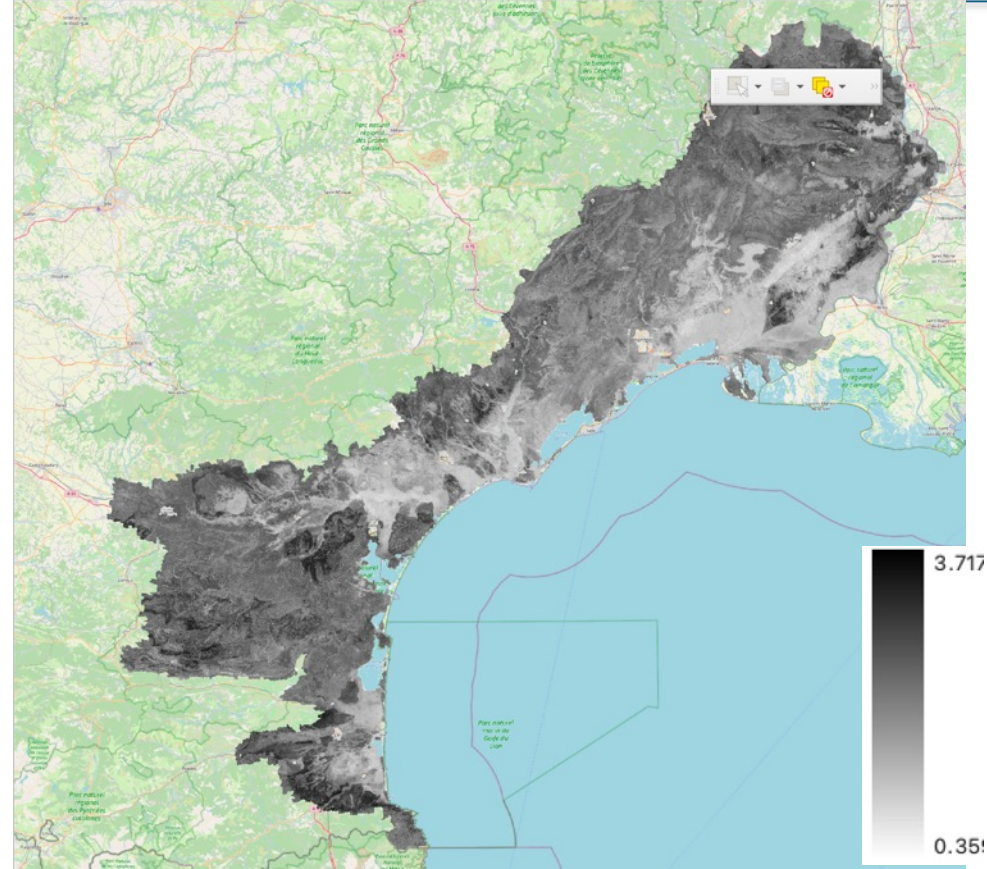
10 km

# Indice de multifonctionnalité des sols de la zone côtière d'Occitanie

Modèle CSMS construit avec 9135 profils de sols (1 profil / 1.3 km<sup>2</sup>)



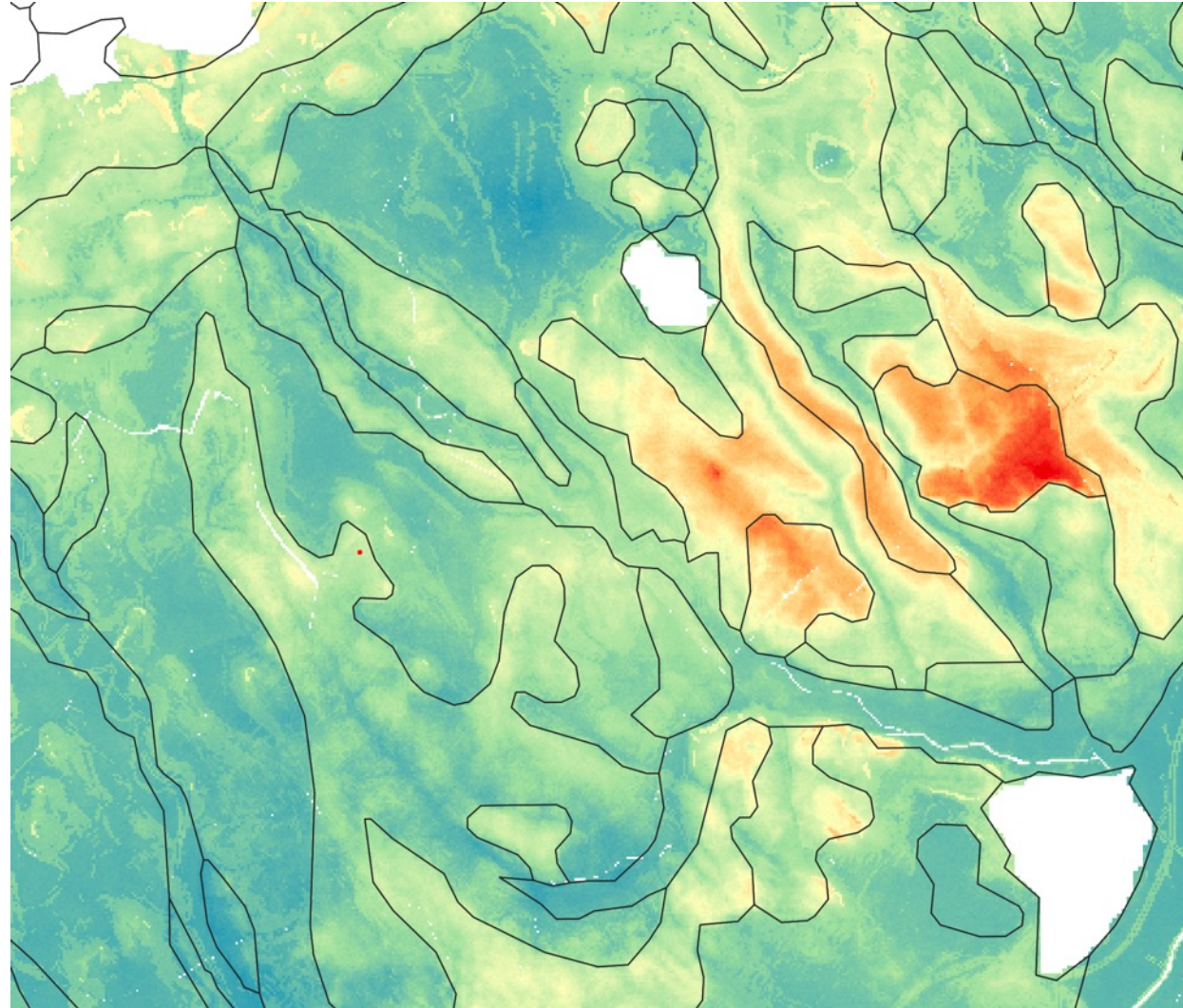
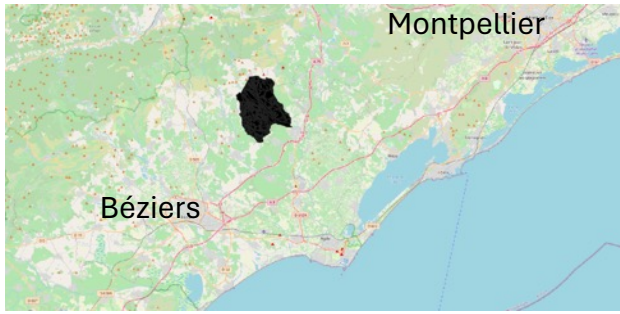
Valeurs prédites



Incertitudes

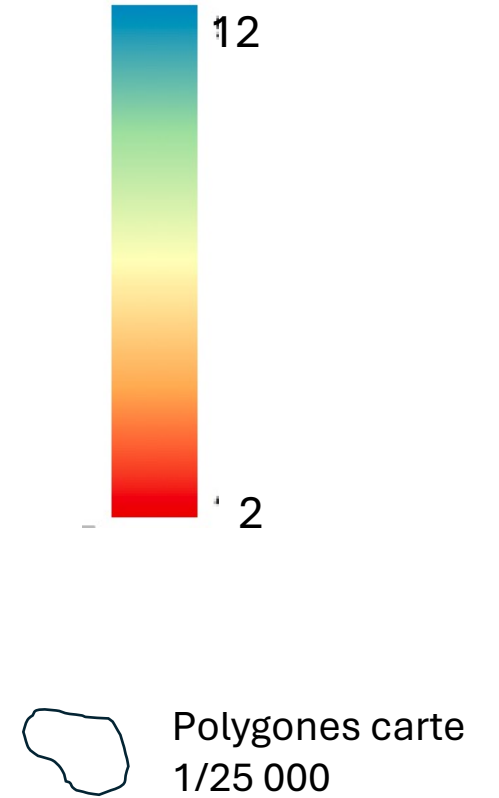
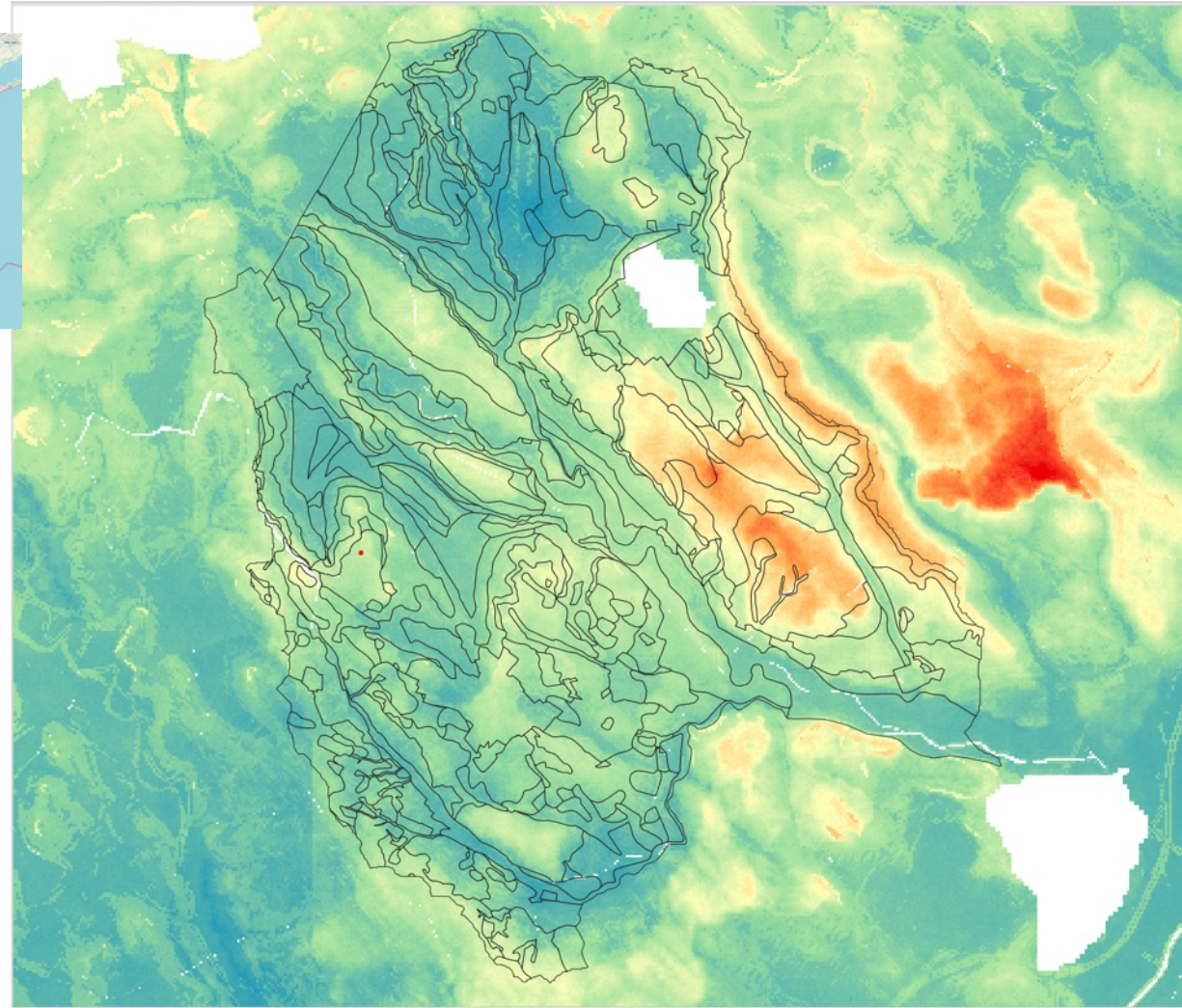
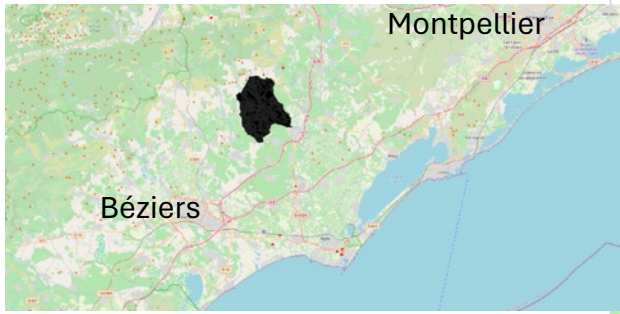
% de variabilité de l'indice de multifonctionnalité des sols représentée: calculs en cours

# Cartes d'Indice de Multifonctionnalité et RRP



Polygones du RRP

# Cartes d'indice de multifonctionnalité et carte 1/25 000 BV Payne (Coulouma et al, 2004)



# Pourquoi appliquer la CSMS à l'échelle d'une région ?

---

- Augmenter la résolution spatiale de la connaissance régionale des sols
- Expliciter et zoner l'incertitude cartographique pour mieux la prendre en compte
- Diversifier l'offre en information géographique sur les sols pour satisfaire plus d'utilisateurs
- Permettre d'organiser dans le temps la montée en qualité de la connaissance régionale des sols (cartes révisables)

# CSMS : Les limites actuelles et les solutions envisagées

Incertitudes résiduelles non négligeables dues à l'inaptitude des modèles à représenter les variations de sol très locales



- Augmenter la densité spatiale des observations de sol
- Développer des approches de CSMS locale et participatives

Difficultés de prendre en compte l'incertitude dans les décisions



- Développer des visualisations des produits CSMS adaptées à la décision en contexte incertain (Léa Courteille, demain)

Difficultés d'appropriation de la CSMS par des « non-académiques »



- Organiser le transfert de technologie CSMS (Mawuclo Hounkpatin Totin, Anne Richer de Forges, demain)
- Simplifier les démarches de CSMS



**Merci pour votre attention**

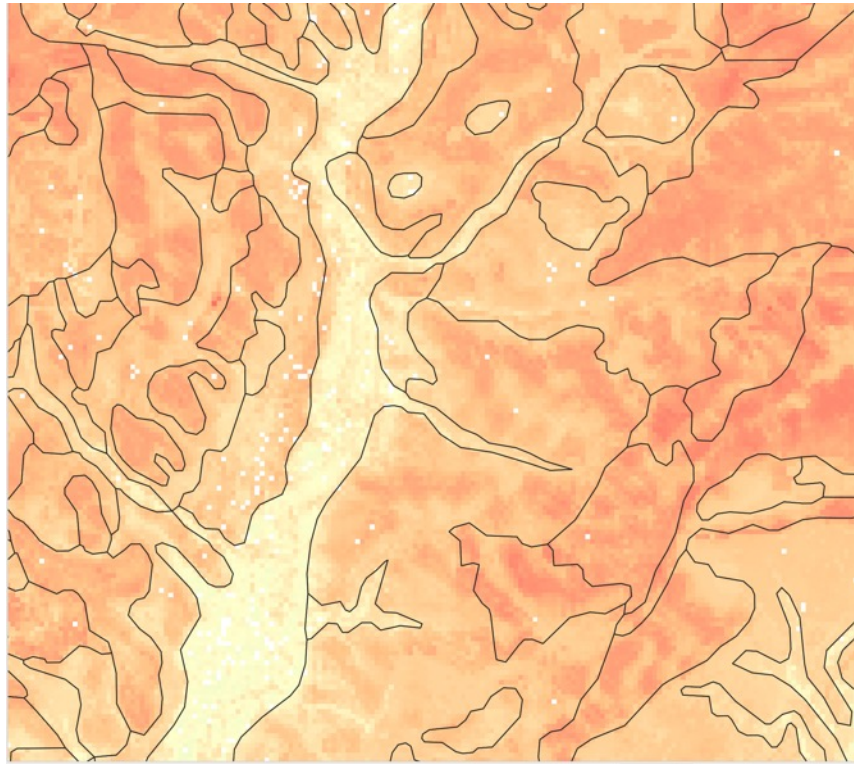
Retrouvez toutes les présentations pour le Séminaire  
**LA CONNAISSANCE DES SOLS AU SERVICE DES PROJETS DE TERRITOIRES**

[Sur lien de la page](#)

# Comparaison des versions de cartes de Réservoir Utile du sol

**2019**

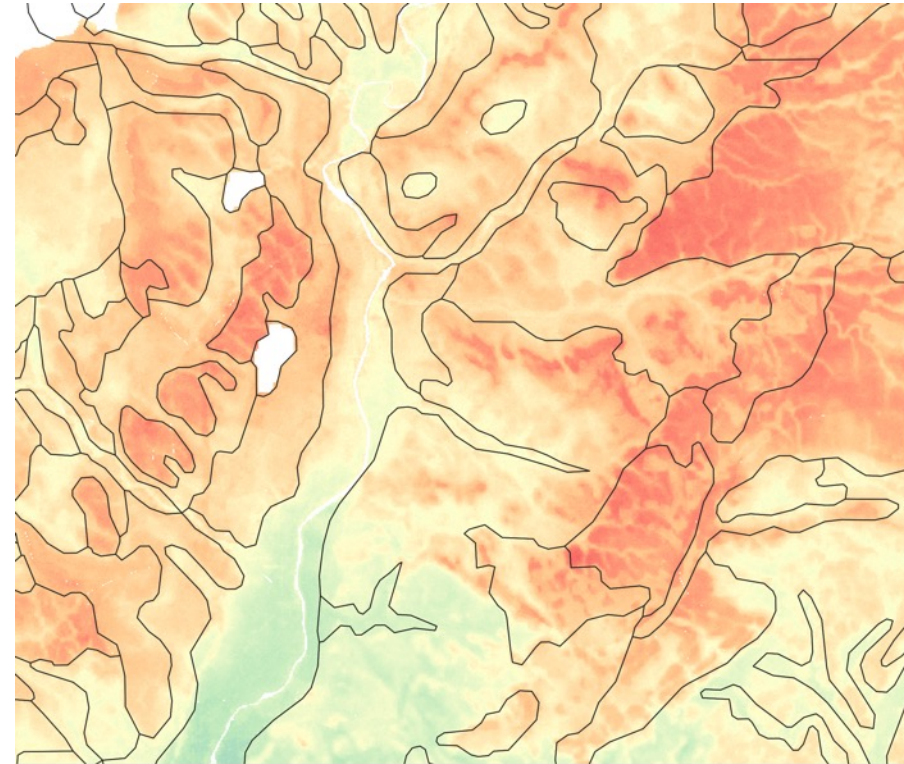
1 profil / 13.5 km<sup>2</sup>



10 km

**2024**

1 profil / 1.3 km<sup>2</sup>

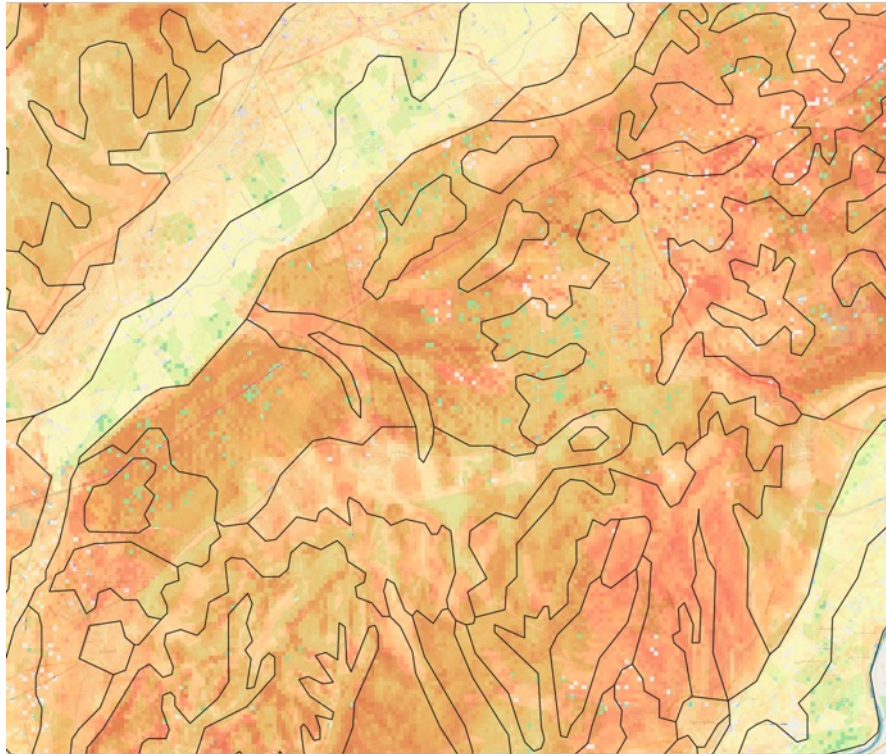




# Comparaison des versions de cartes de Réservoir Utile du sol

**2019**

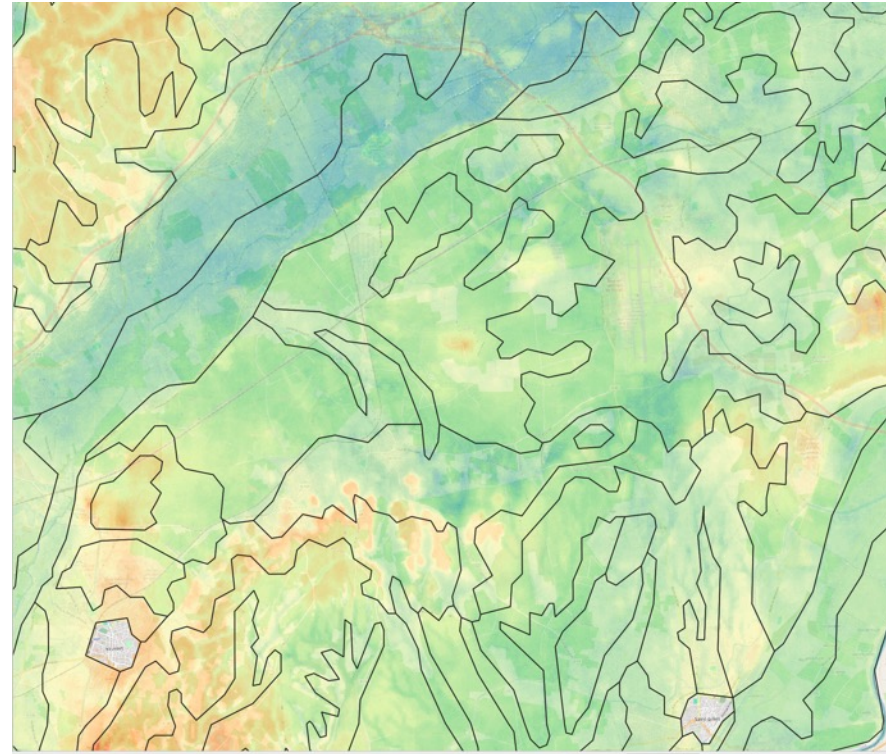
1 profil / 13.5 km<sup>2</sup>



10 km

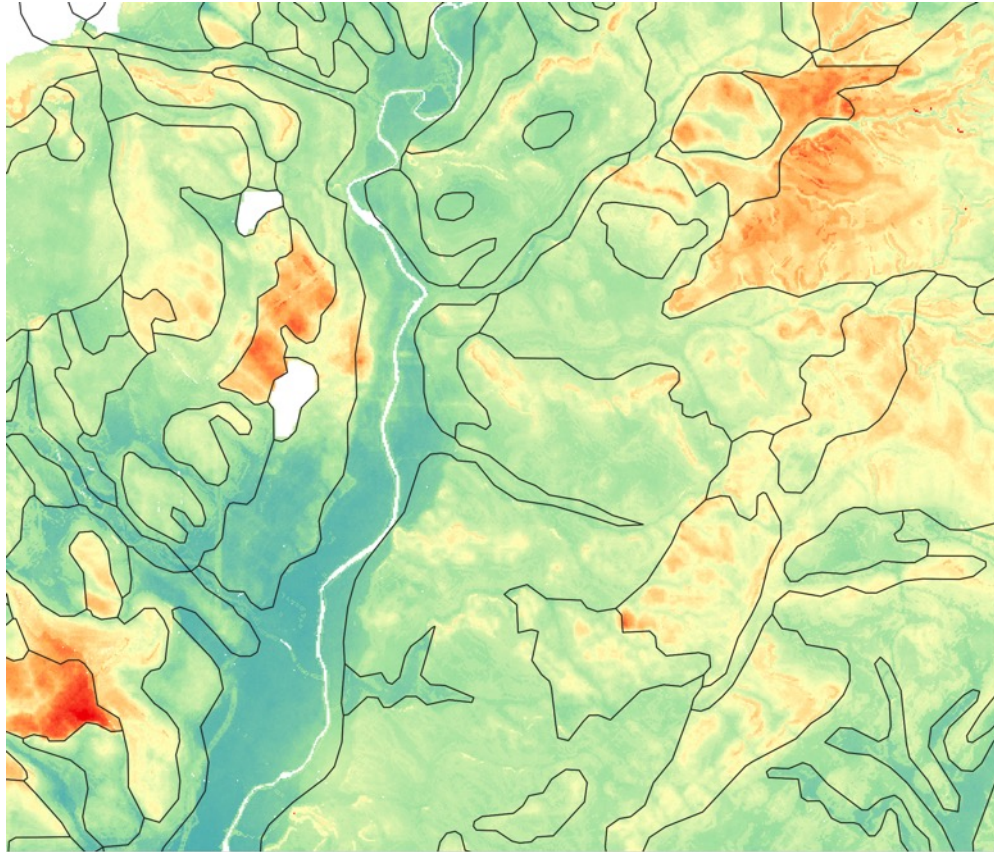
**2024**

1 profil / 1.3 km<sup>2</sup>



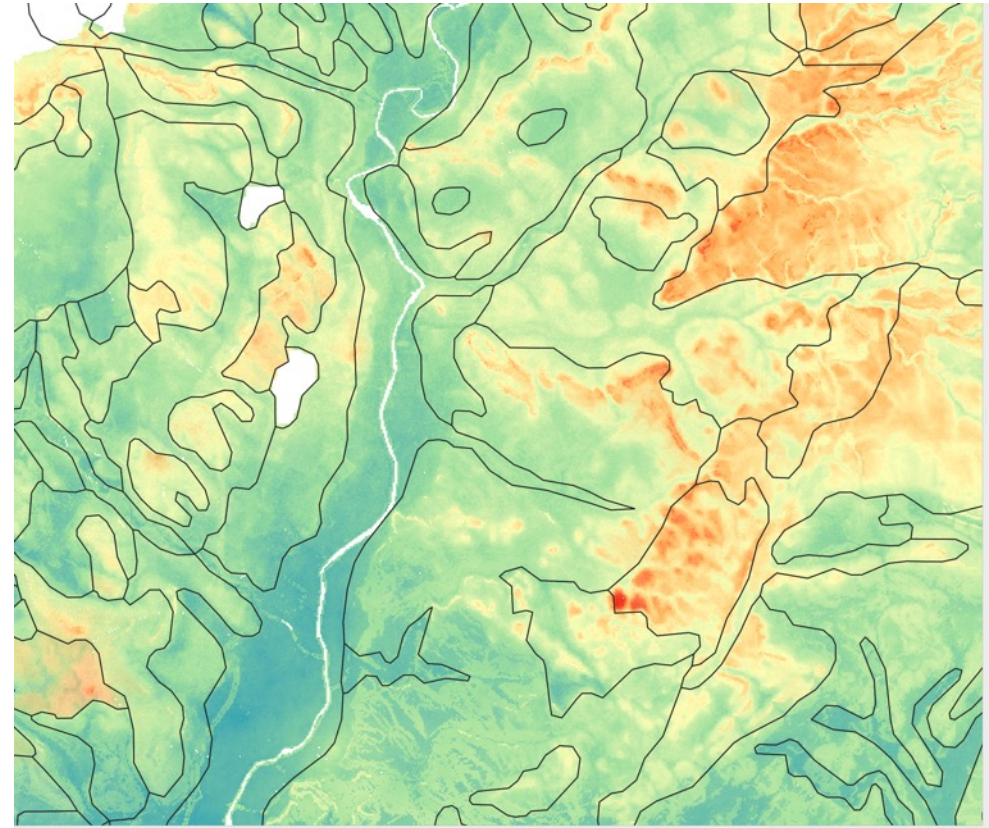
# Comparaison des versions de cartes d'indice de multifonctionnalité des sols

**2022**  
1 profil / 9,9 km<sup>2</sup>



10 km

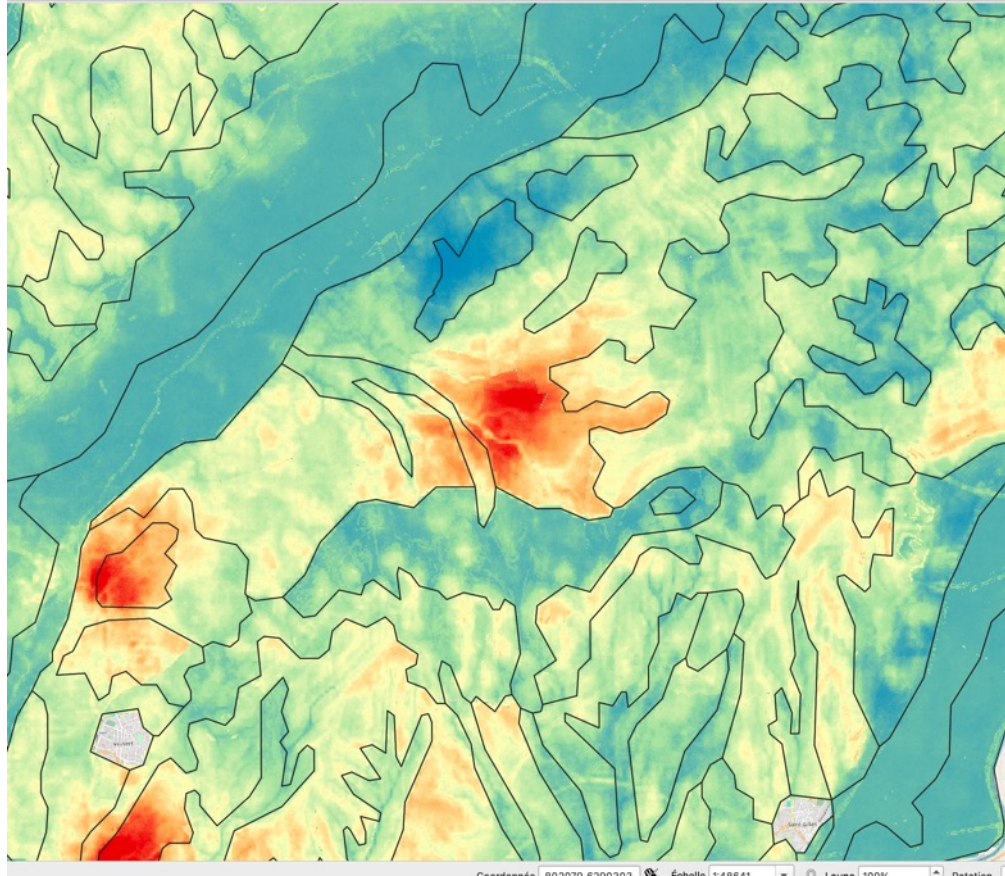
**2024**  
1 profil / 1.3 km<sup>2</sup>



# Comparaison des versions de cartes d'indice de multifonctionnalité des sols



**2022**  
1 profil / 9,9 km<sup>2</sup>



**2024**  
1 profil / 1.3 km<sup>2</sup>

