

Cartographie des sols par Modélisation Statistique (CSMS) en Occitanie

Philippe Lagacherie¹, Amine Chemchem²

¹ LISAH, Univ Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier,

² 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

SCIENCE @ DIRECT®

Geoderma 117 (2003) 3–52

GEODERMA

www.elsevier.com/locate/geoderma

On digital soil mapping

A.B. McBratney^{a,*}, M.L. Mendonça Santos^b, B. Minasny^a

^a 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

^b 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,^{1*} Sonya Ahmed,² Florenço Carré,³ Alfred E. Hartemink,³ Jonathan Hempel,⁴ Jeroen Huising,⁵ Philippe Lagacherie,⁶ Alex B. McBratney,¹ Neil J. McKenzie,¹ Maria de Lourdes Mendonça-Santos,⁷ Budiman Minasny,¹ Luca Montanarella,⁸ Peter Odeh,⁹ Cheryl A. Palm,¹ Jeffrey D. Sachs,¹⁰ Keith D. Shepherd,¹¹ Tor Gunnar Vagan,¹² Bernard Vanlauwe,¹³ Markus G. Walsh,¹ Leigh A. Winowiecki,¹ Gan-Lin Zhang¹⁴

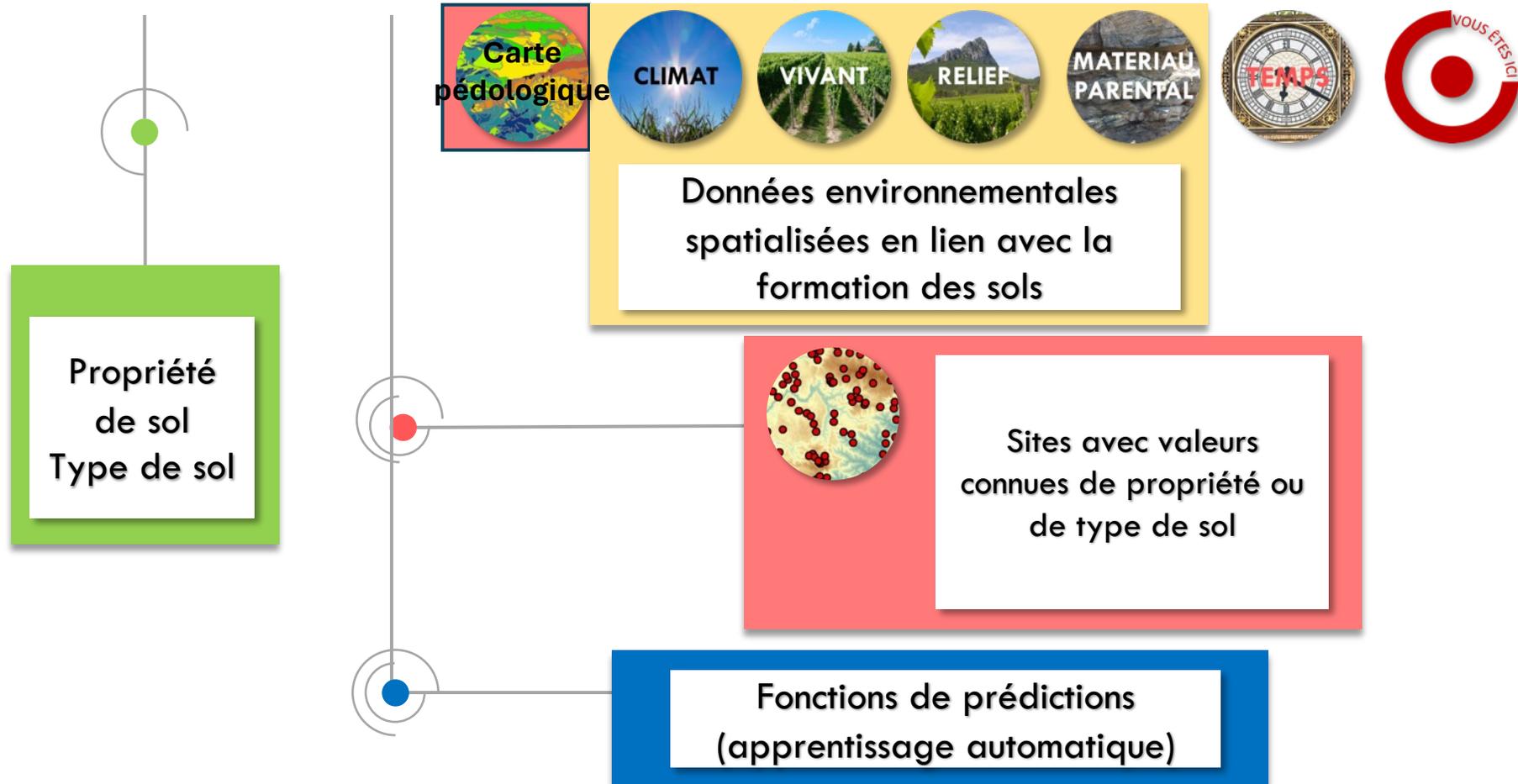
Increased demand and advanced techniques could lead to more refined mapping and management of soils.



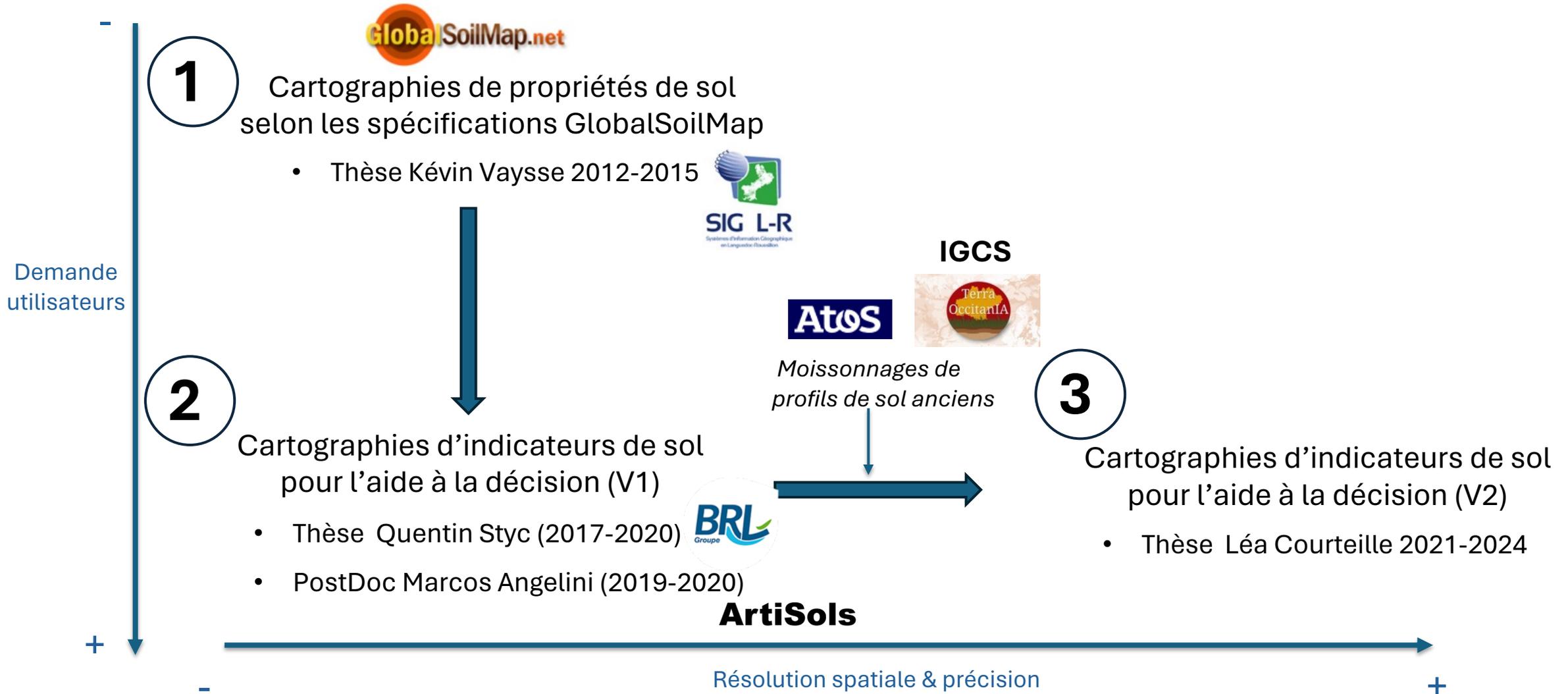
Cartographie Par Modélisation Statistique : Principe général

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

Erreur
estimée

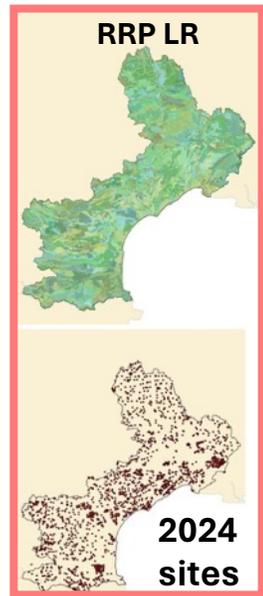
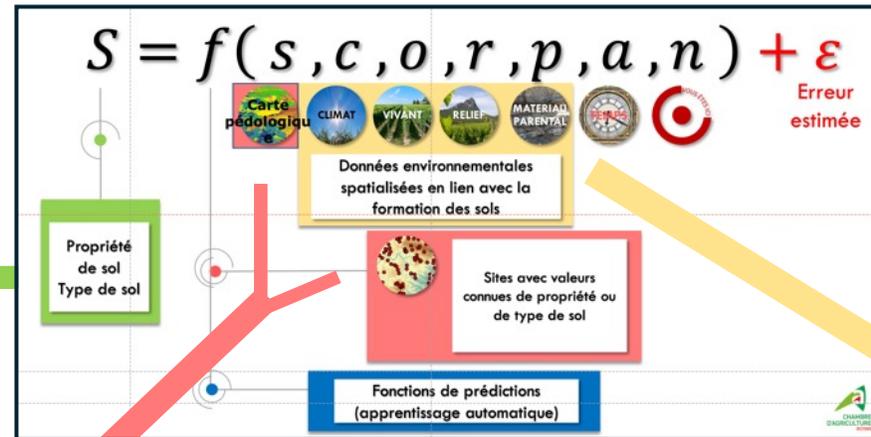


CSMS en Languedoc-Roussillon: Les trois grandes étapes de son application

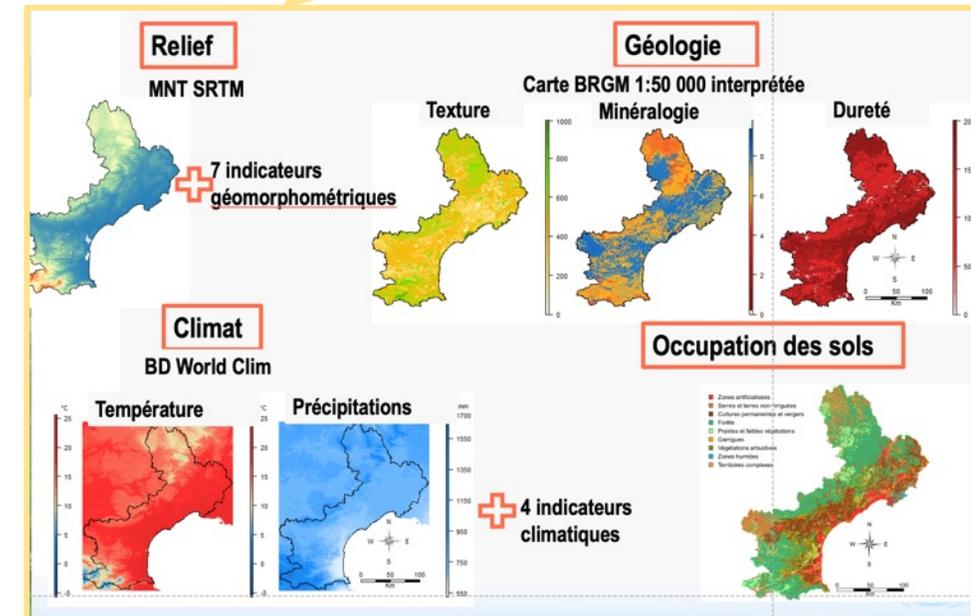


Cartographies de propriétés de sol selon les spécifications GlobalSoilMap

(Thèse Kévin Vaysse, 2012-2015)

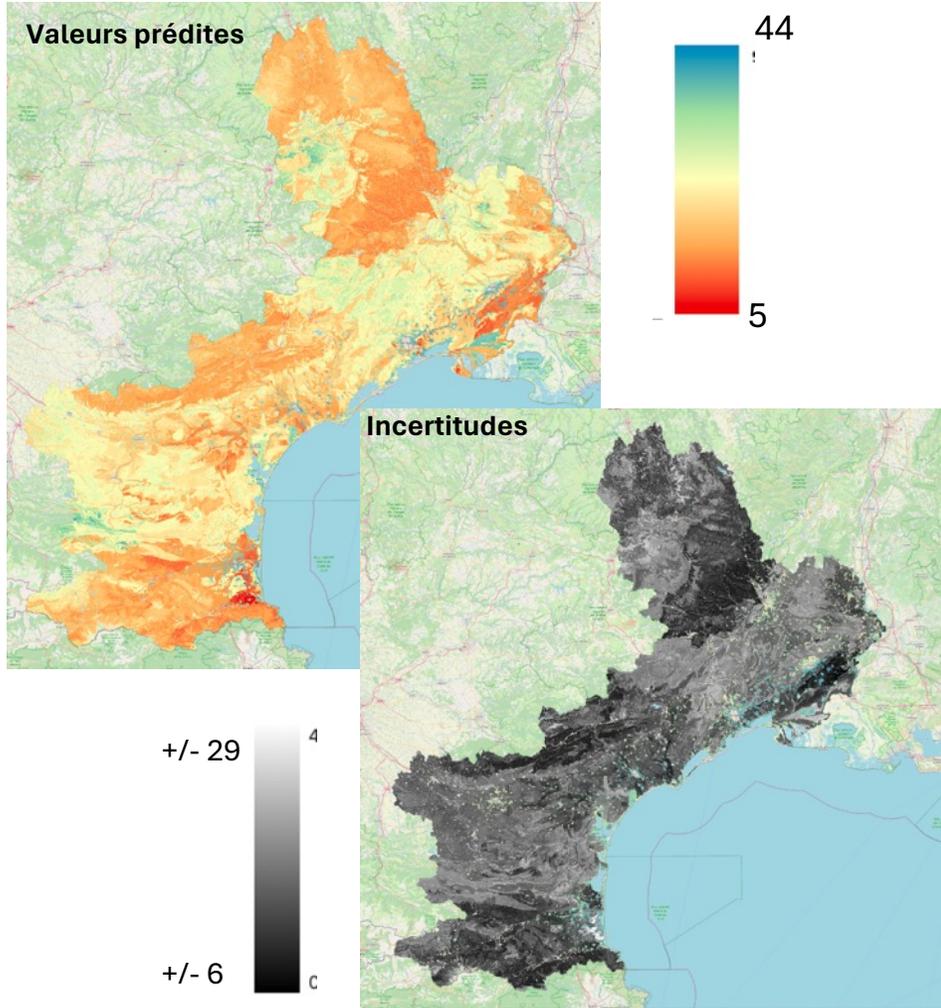


Algorithme:
Forêt de régression quantile

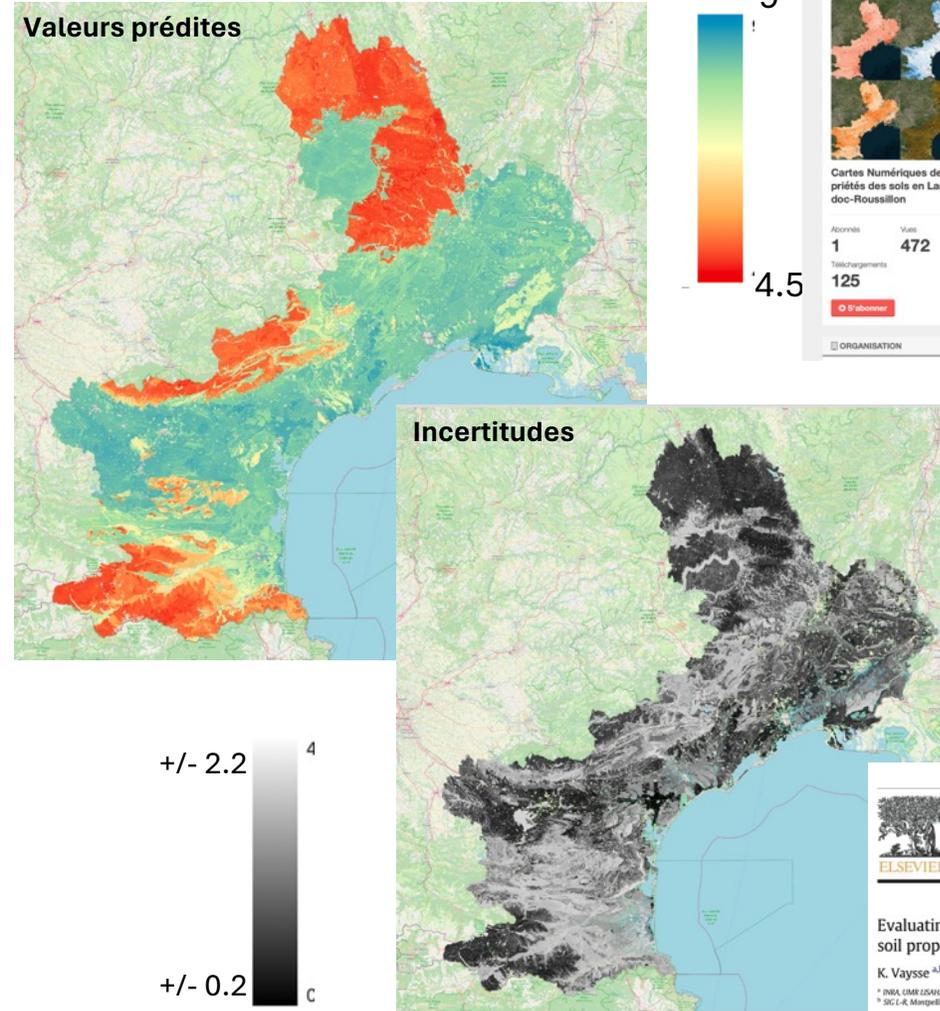


Exemples de produits GlobalSoilMap Languedoc-Roussillon

Taux d'argile 0-5 cm (%)



pH 30-60 cm

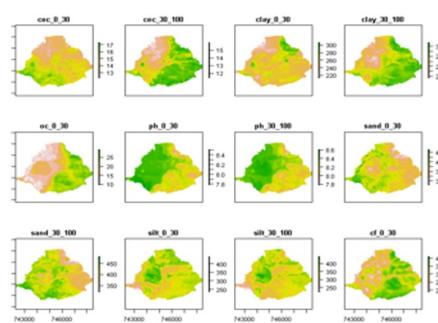


Cartographies d'indicateurs de sol pour l'aide à la décision

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



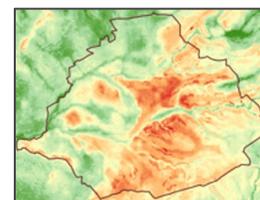
Spatialisations séparées de composants des indicateurs (propriétés de sol)



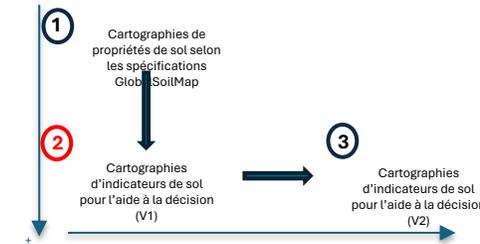
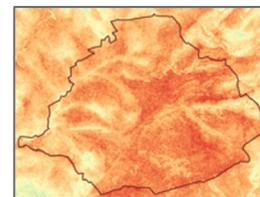
Calculs d'indicateurs



Valeurs prédites



Incertitudes

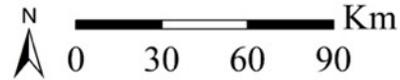
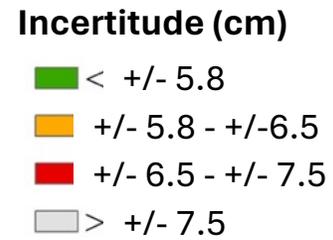
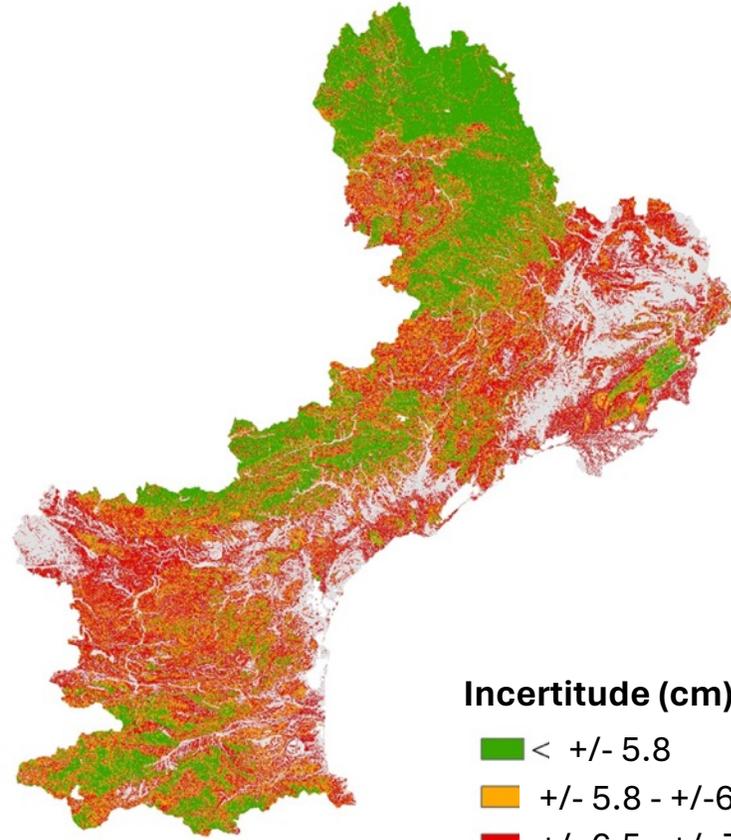
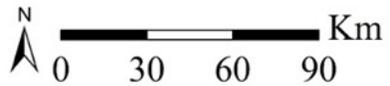
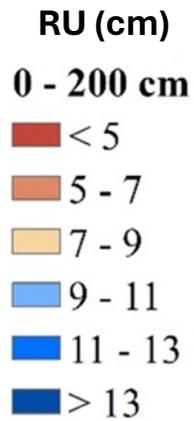
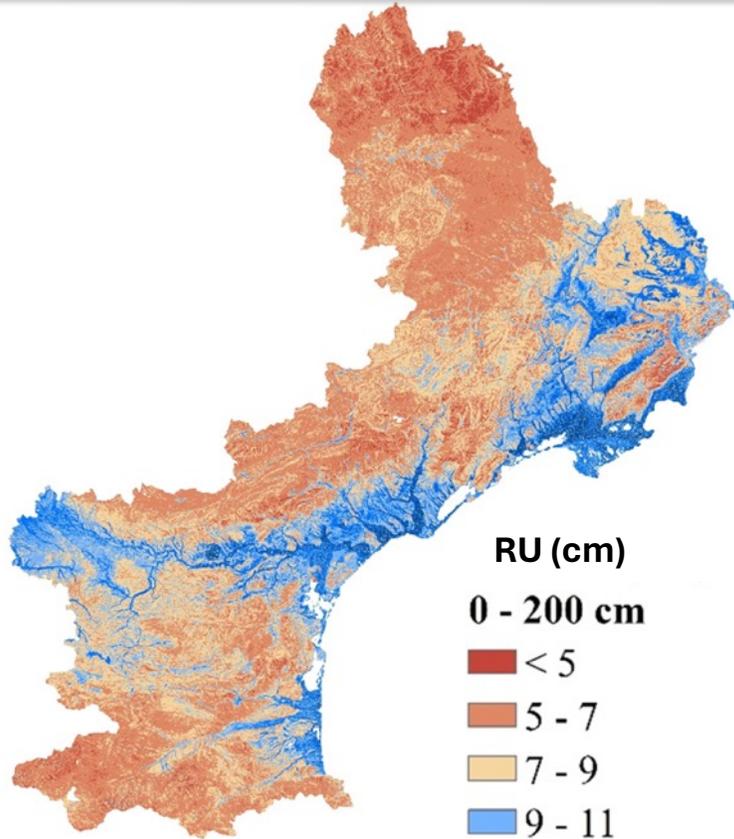
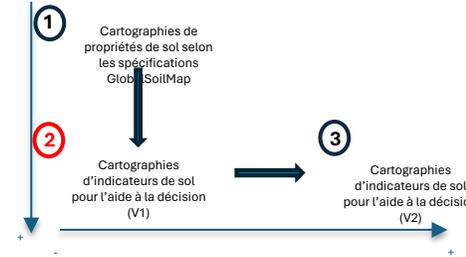


Défi méthodologique: propager correctement les incertitudes des cartes de propriétés de sol

- 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

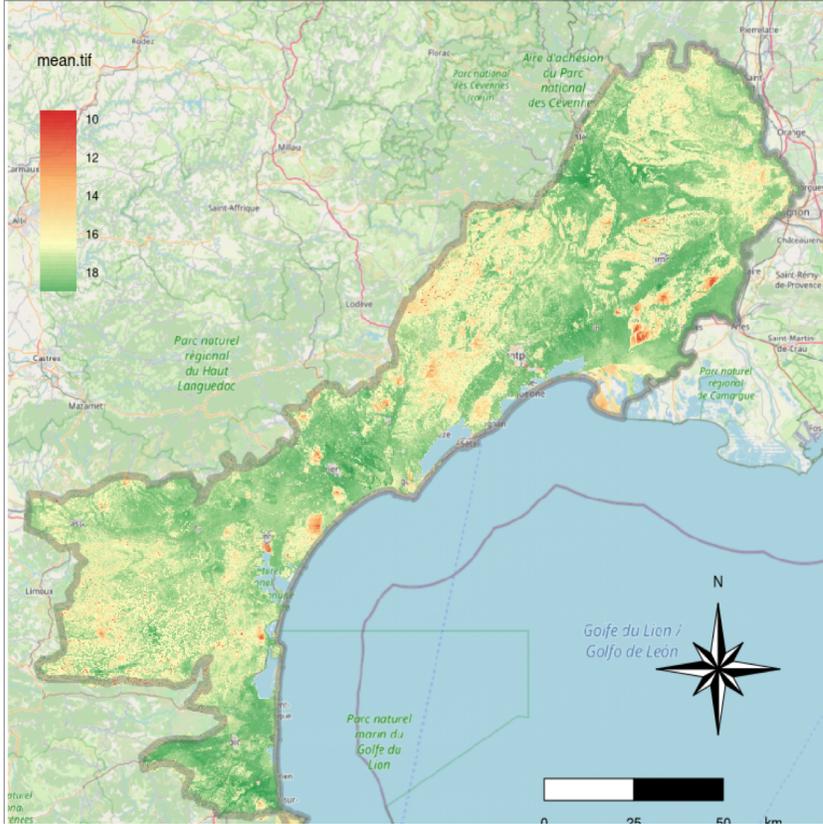
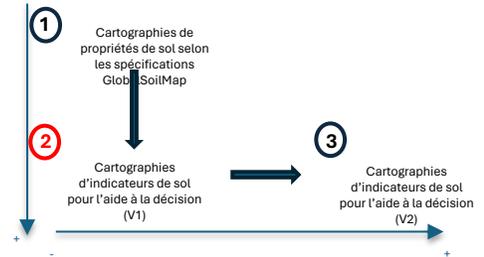


Uncertainty assessment of soil available water capacity using error propagation: A test in Languedoc-Roussillon

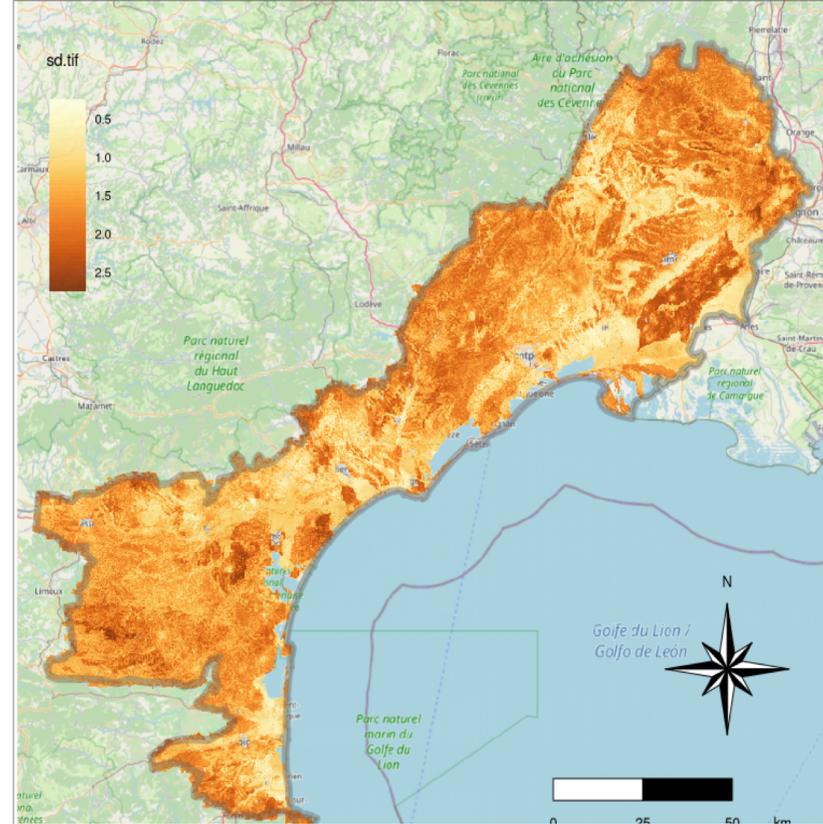
Styc Quentin^{a,b}, Lagacherie Philippe^{a,*}



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

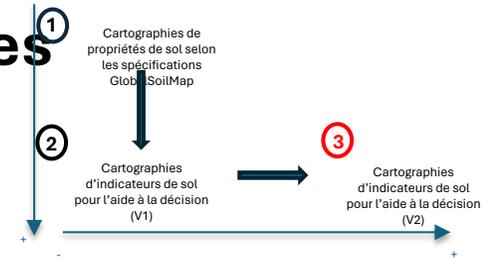


A multivariate approach for mapping a soil quality index and its uncertainty in southern France

M. E. Angelini^{1,2} | G. B. M. Heuvelink^{3,4} | P. Lagacherie²



Enrichissement de la Base régionale de données de profils pédologiques

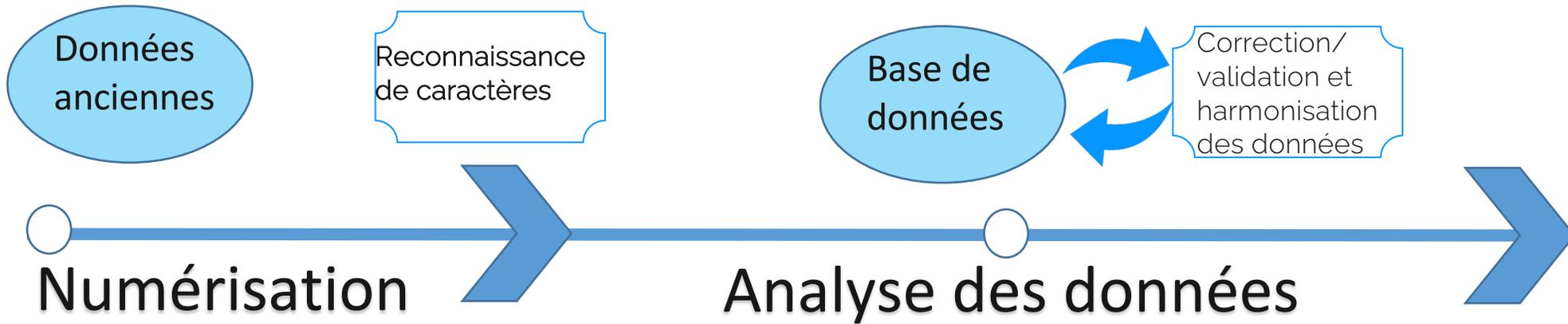


Etudes - projets	Nombre de profils	Auteurs	dates profils
Carte 1/100 000 Argelès	72	INRA, CNABRL	1960-65
Carte 1/100 000 Lodève	327	INRA-IFN	1969-85
Carte 1/25 000 BV Peyne	20	INRA	2000-10
Projet IGCS CAPVAL	71	GeoSOLEAU, ACH	1992-98
Projet IGCS 2021	1 192	SIGALES, GeoSOLEAU	1985-2006
Projet TerraOccitania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

SITUATION TOPOGRAPHIQUE Zone plaine
 INCLINAISON Nulle EXPOSITION
 RELIEF Ter à ondulé au Nord
 SIGNES D'ÉROSION Non apparents
 UTILISATION ACTUELLE Vigne (jeune 10-15) halle
 VÉGÉTATION SPONTANÉE Aristolochia clematitis, Stellaria media, grande oseille

ÉTAT DE LA SURFACE Mince-pollueuse argilo-sableuse (lisé de vin) déposée-récemment.
 GÉOLOGIE alluvions fines-sablonneuses de 1^{er} ordre
 DRAINAGE Régulier à occasion PLAN D'EAU 70 cm
 TYPE DE SOL alluvial

CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES Feuille N° 502

N° des échantillons	Profondeur	Pourcentage en poids				Vitesse de filtration			Δσ	C _u	C _l	Date
		P	G	S	S.L.	K ₁	K ₂	Végétale				
I 111	0-10	1	0	1	99				1,50		25	13,4
V 116	10-60	0	0	100		8,7·10 ⁻⁴	6,7·10 ⁻⁴	1,35		3	27	10,9
V 449	60-120	0	0	100		1,1·10 ⁻²	9,3·10 ⁻⁴	1,30		4	23	9,5

C.N.A.B.R.L. D.E.M.V. 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 rouilleuse lie de vin	4	Mince pollueuse argilo-sableuse		Friable ++		Horizon de labour. Rampe graviers.
2	60	50	brun rouilleuse lie de vin	4	Polyédrique à micropolyédrique		Friable ++		Exploité par racines et radicelles. Porosité bonne. Rampe débris de coquilles. Rampe graviers et galets noirs.
3	120	60	brun rouilleuse lie de vin	4	Polyédrique à micropolyédrique		Friable ++		Racines et radicelles. Porosité moyenne. Rampe débris de coquilles. Rampe graviers et galets colluvionnés. Gorgé d'eau.

Le niveau de la crue du 8 Novembre 62 a atteint ici 1 mètre.

ANALYSES Granulométrie (se reporter aux échantillons en % de terre sèche)

N°	Profondeur	Pourcentage en poids				Vitesse de filtration			Δσ	C _u	C _l	Date
		P	G	S	S.L.	K ₁	K ₂	Végétale				
I 669	0-20	0	3	3	97				1,55	16	7	
V 155	20-55	0	2	2	98	8,8x10 ⁻⁴	5,7x10 ⁻⁴	1,52		5	15	6
V 187	55-120	2	6	8	92	3,5x10 ⁻⁴	3,5x10 ⁻⁴	1,46		6	14	6

ANALYSE CHIMIQUE - COMPLEXE ABSORBANT - TESTS DES SOLS SALÉS

N°	Cote	pH	Cationes absorbantes (sur 100 g de S.F.)				Anions absorbantes (sur 100 g de S.F.)				C _u %	C _l %	C _{Na} %		
			Ca	Mg	K	Na	Cl	NO ₃	SO ₄	CO ₃					
1	4														
2	7														
3	5														
4															
5															

Notes: N° 1 - C: 1,36 % N: 0,14 % Eau de la roche

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

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

FICHE DE SOL

806 Be 3 Bn 1

CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

OBSERVATEUR JB/JV
 DATE PRÉLEVEMENT 25/5/58
 FEUILLE N° 23
 CARNET N° 69 FEUILLET N° 11
 LOCALITÉ BEZIERS-NORD
 CARTE 1/20.000 Béziers N° 3
 COORDONNÉES LAMBERT X: 864,650 Y: 118,180
 ALTITUDE 36 m

Situation topographique pente
 Inclinaison 16 gbra Exposition E.S.F.
 Relief uni
 Erosion non apparente
 Drainage assez bon Plan d'eau absent

ANALYSES Pour l'explication des titres de colonnes se reporter à la notice explicative

N° des échantillons	Profondeur	Pourcentage en poids				Vitesse de filtration			Δσ	C _u	C _l	Date
		P	G	S	S.L.	K ₁	K ₂	Végétale				
I 669	0-20	0	3	3	97				1,55	16	7	
V 155	20-55	0	2	2	98	8,8x10 ⁻⁴	5,7x10 ⁻⁴	1,52		5	15	6
V 187	55-120	2	6	8	92	3,5x10 ⁻⁴	3,5x10 ⁻⁴	1,46		6	14	6

ANALYSE CHIMIQUE - COMPLEXE ABSORBANT - TESTS DES SOLS SALÉS

Cote	pH	Cationes absorbantes (sur 100 g de S.F.)				Anions absorbantes (sur 100 g de S.F.)				C _u %	C _l %	C _{Na} %		
		Ca	Mg	K	Na	Cl	NO ₃	SO ₄	CO ₃					
1	18	1,5												
2	19	2												
3	12	1												
4														
5														

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

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

CARACTÉRISTIQUES PÉDOLOGIQUES

806 Be 3 Bn 1

CARACTÈRES DU SOL EN PLACE 806 Be 3 Bn 1

GÉOLOGIE Alluvion du Lirou
 USAGE ACTUEL vignes
 VÉGÉTATION SPONTANÉE

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

N° des horizons	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.

Remarque: à 150 rien à signaler

ANALYSES : granulométrie (résultats estimés en %, voir pour la durée dans l'annexe de notation)

Cote	pH	Cationes absorbantes (sur 100 g de S.F.)				Anions absorbantes (sur 100 g de S.F.)				C _u %	C _l %	C _{Na} %		
		Ca	Mg	K	Na	Cl	NO ₃	SO ₄	CO ₃					
1	18	1,5												
2	19	2												
3	12	1												
4														
5														

ANALYSE CHIMIQUE - COMPLEXE ABSORBANT - TESTS DES SOLS SALÉS

Cote	pH	Cationes absorbantes (sur 100 g de S.F.)				Anions absorbantes (sur 100 g de S.F.)				C _u %	C _l %	C _{Na} %		
		Ca	Mg	K	Na	Cl	NO ₃	SO ₄	CO ₃					
1	18	1,5												
2	19	2												
3	12	1												
4														
5														

Entraînement du modèle de reconnaissance du texte

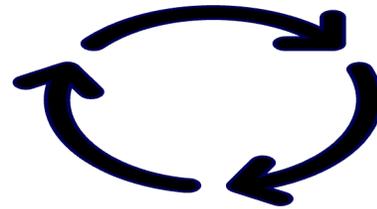
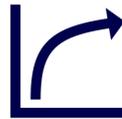
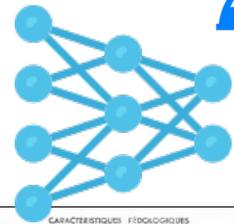


Soumission automatique des documents
scannés

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" with various fields filled out. A sidebar on the left contains navigation options like "Tâches", "Soumissions", "Les flux", "Une bibliothèque", "Rapports", "Utilisateurs", and "Administration". The right sidebar shows a list of 296 fields, with "observateur" selected, showing its value as "VIER".

Field Name	Value
observateur	VIER
Normalized	VIER
Raw	VIER
Identified by	Machine
Transcribed by	sanee (Sanee Mourabit)
Data Type	Freeform Characters
date_prelevement	24.4.61
cartet_num	1
feuillelet_num	7
carte_1:50k	Blank
carte_1:20k	AGDE
numero	5
localite	VALRAS-PLAGE

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%
0.6-0.65	4	87		91	5047	87,6%	27	99,5%
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%
Grand Total		259	5503	5762				

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

Base de données

- 4 formats différents
- 6752 documents traités

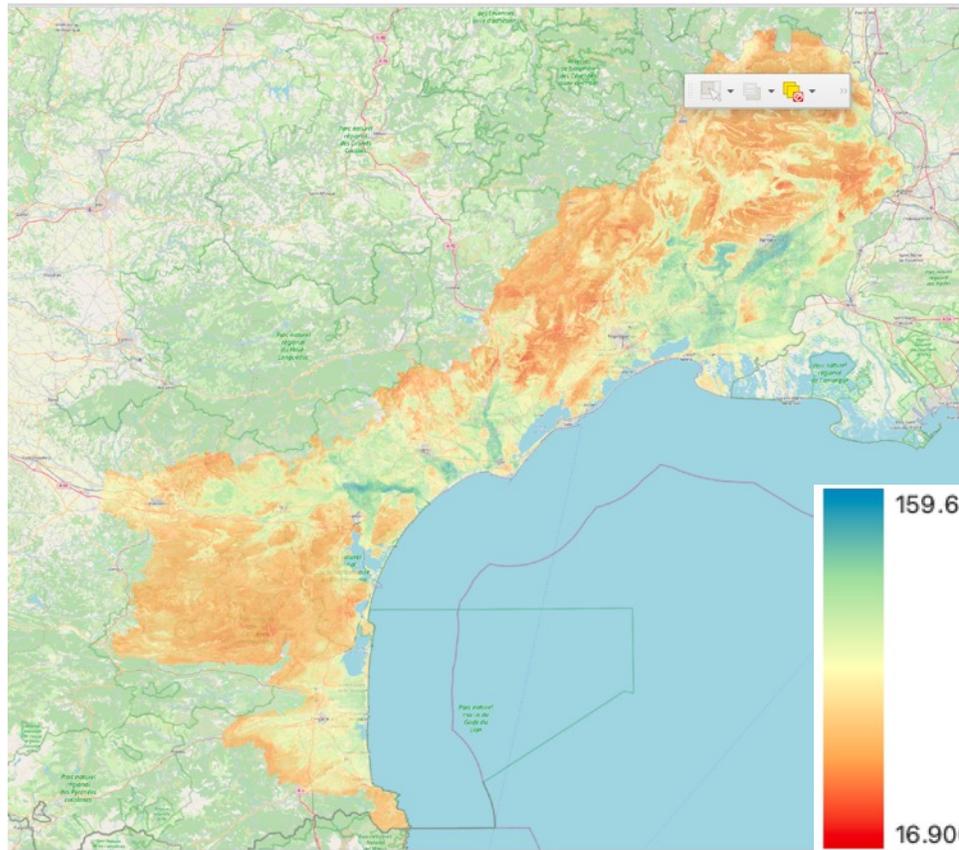
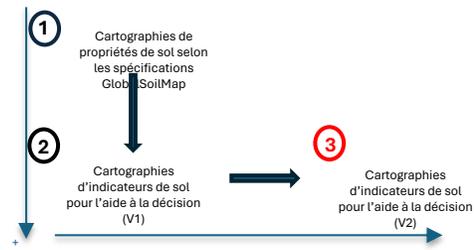
Implémentation of the system :

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

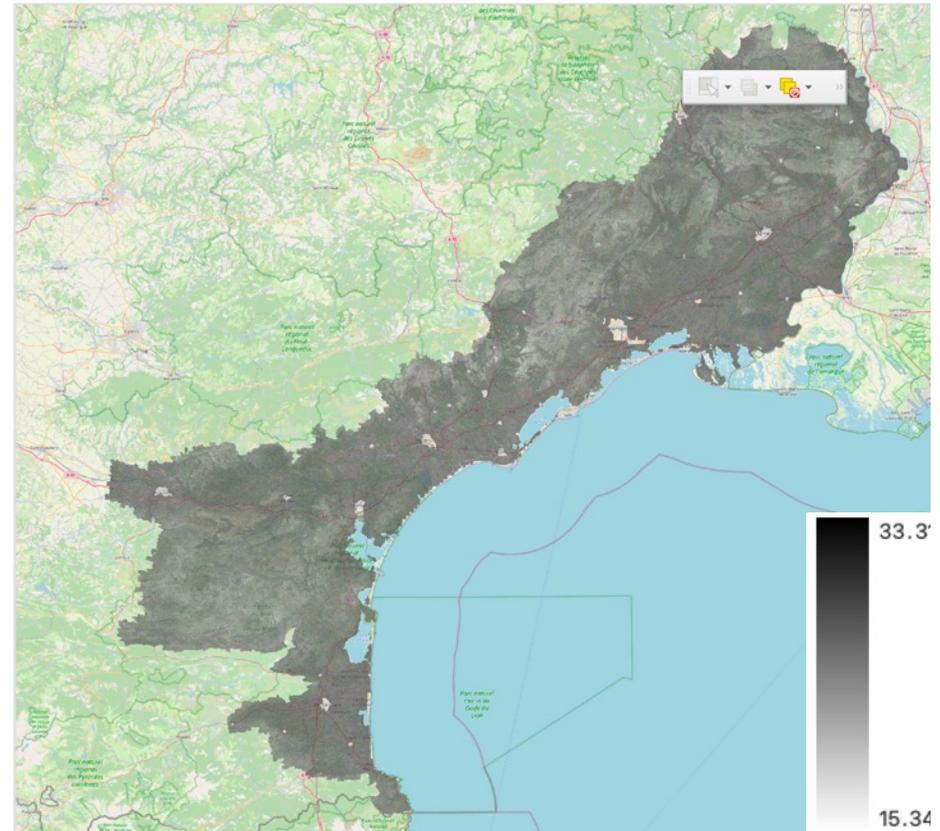
	Sans notre solution	Avec notre solution	Gain
1 fiche	13 minutes	3 minutes	10 minutes
6752 fiches	182 jours	57 jours	125 jours

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 km²)



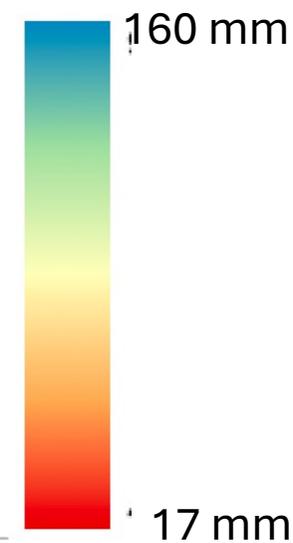
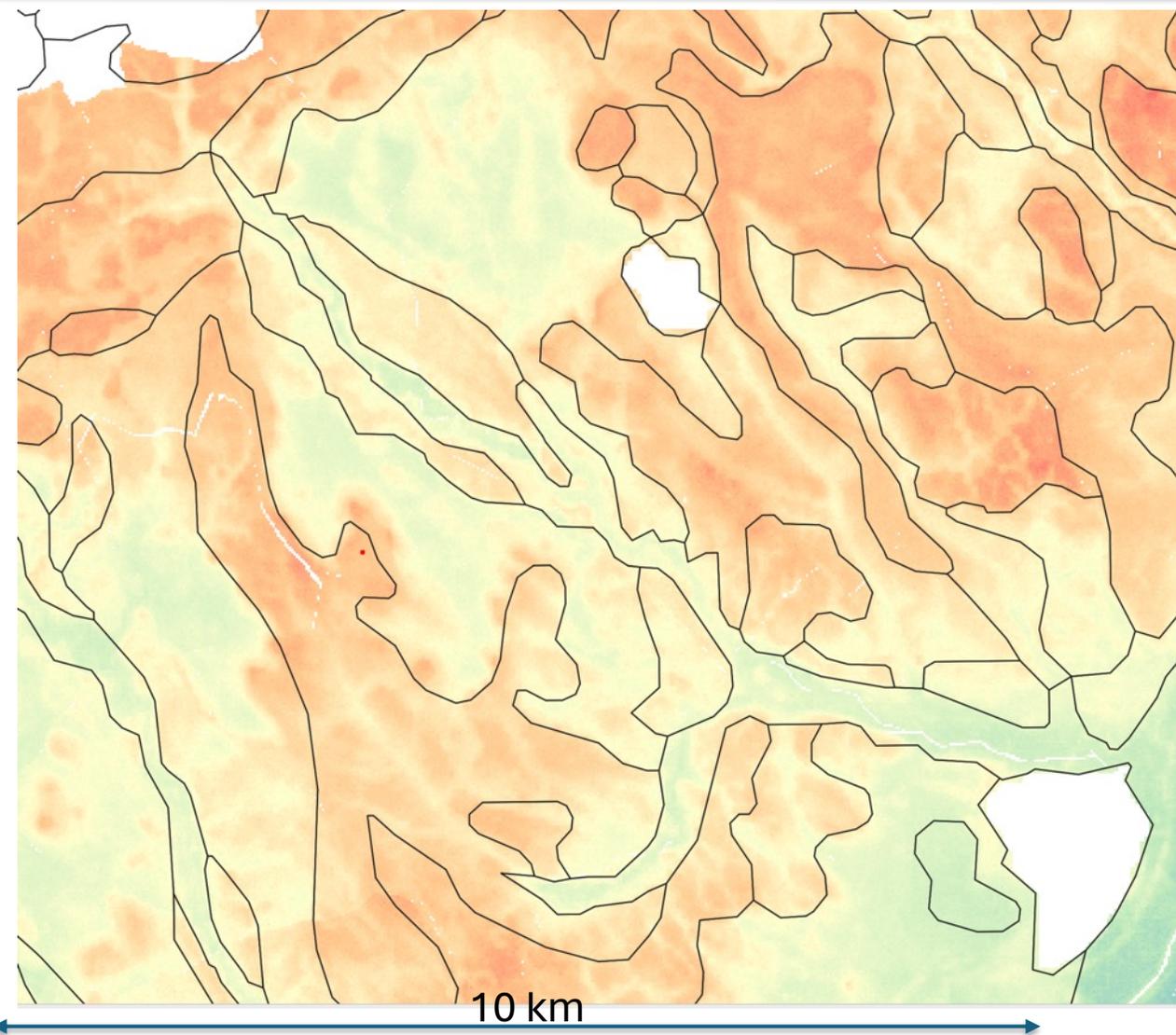
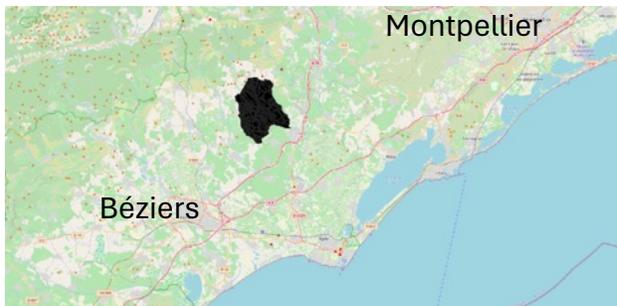
Valeurs prédites



Incertitudes

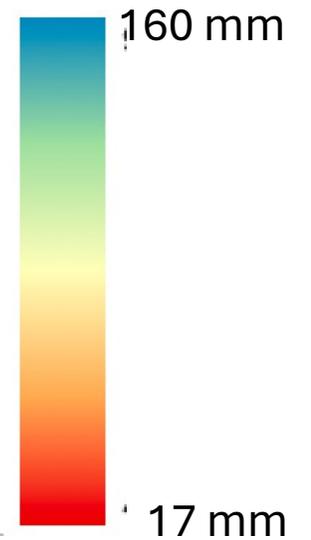
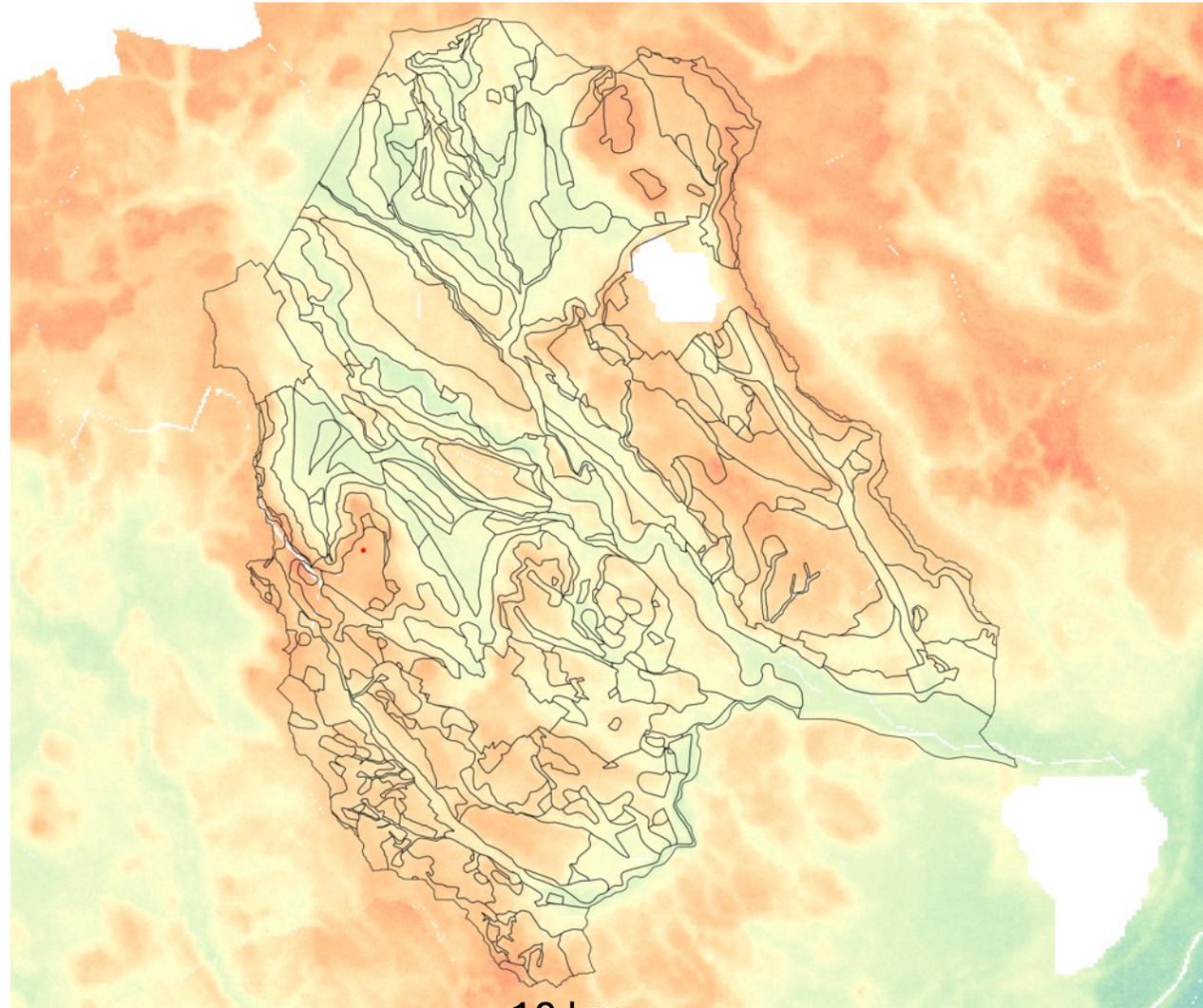
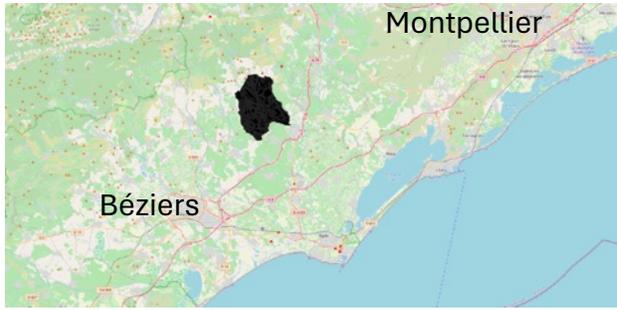
~30 % de variabilité de RU représentée

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)

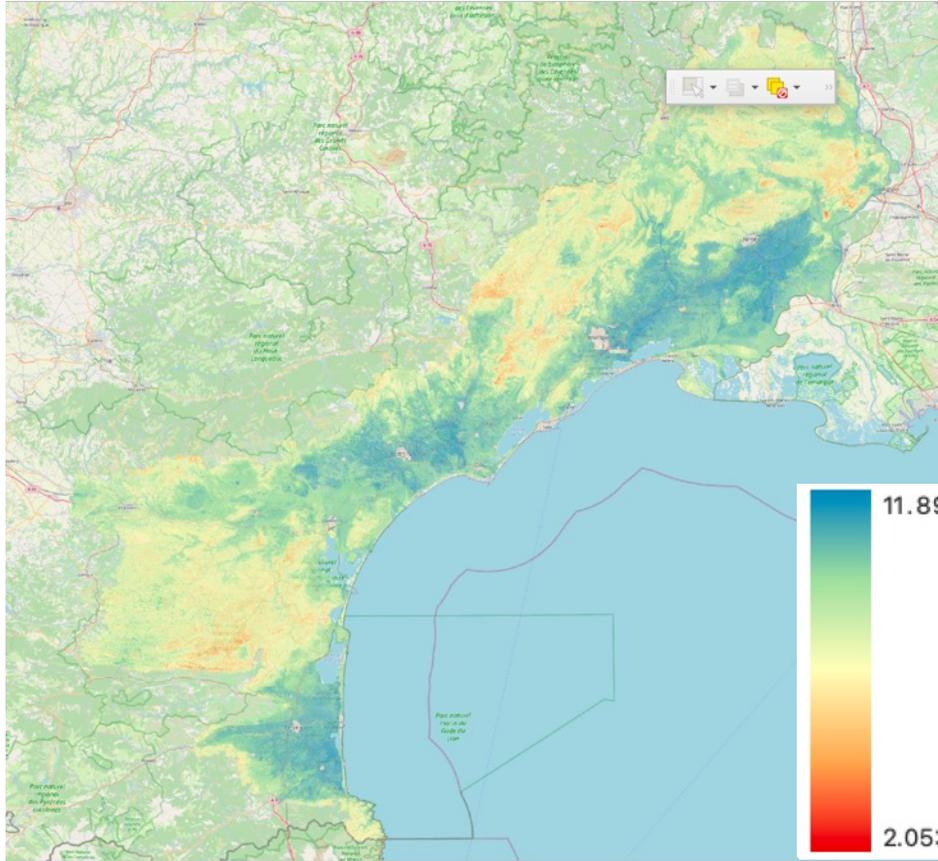
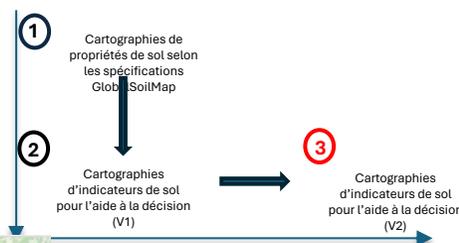


Polygones carte
1/25 000

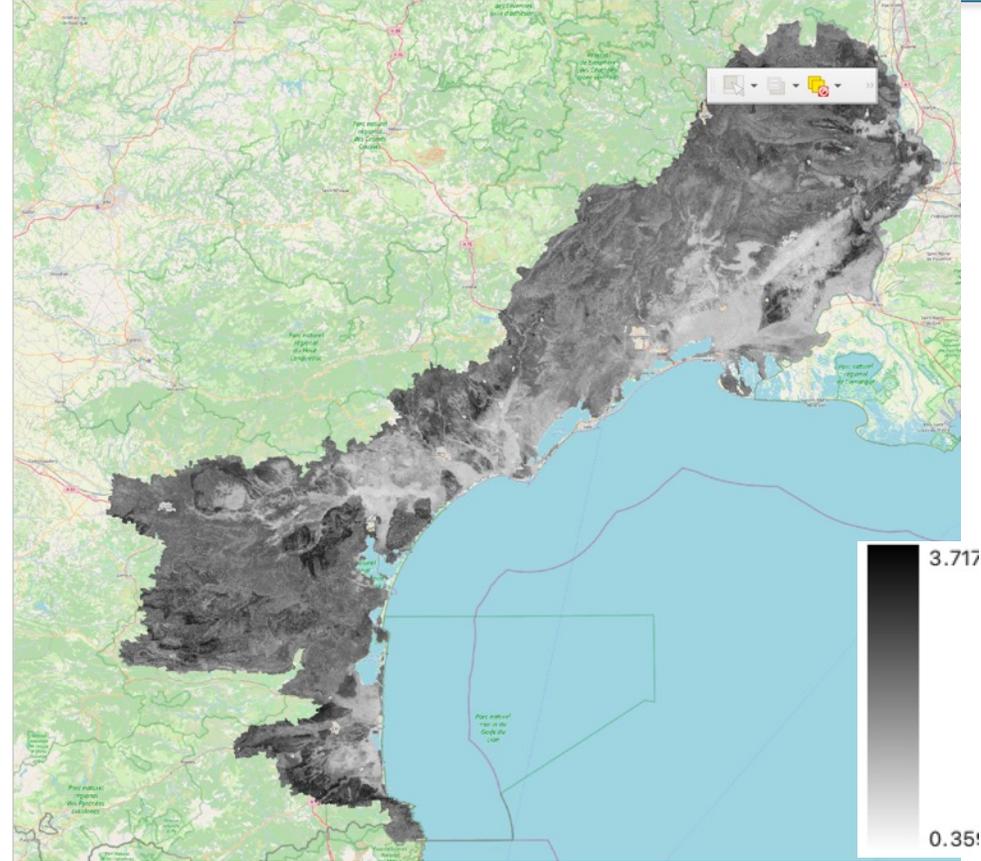
10 km

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

Modèle CSMS construit avec 9135 profils de sols (1 profil / 1.3 km²)



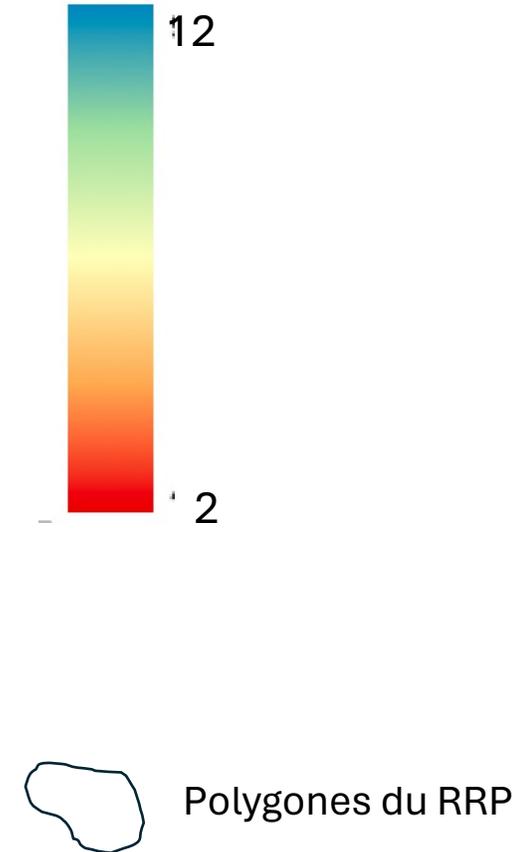
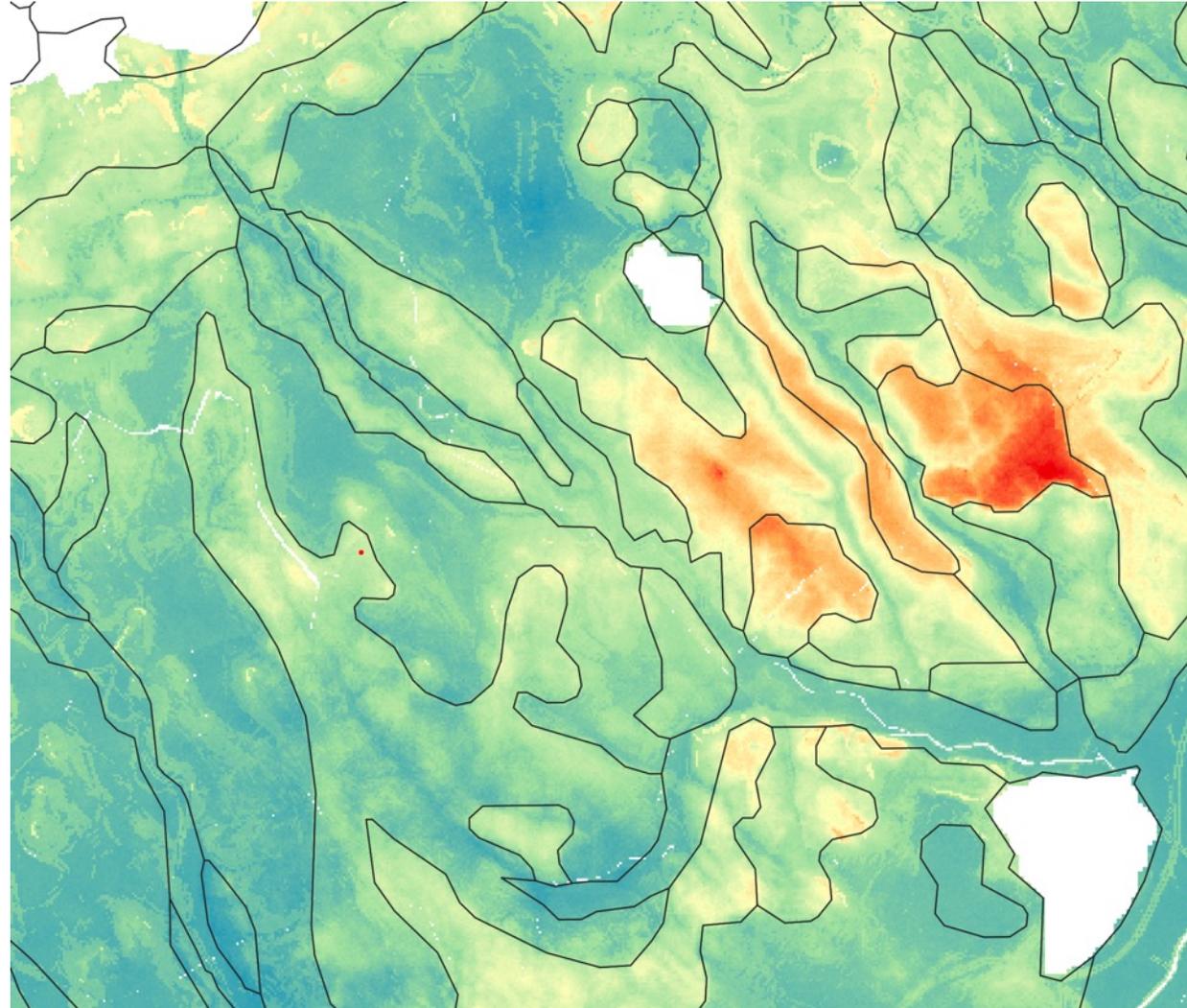
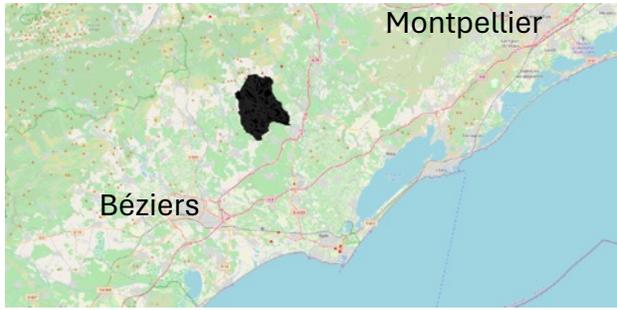
Valeurs prédites



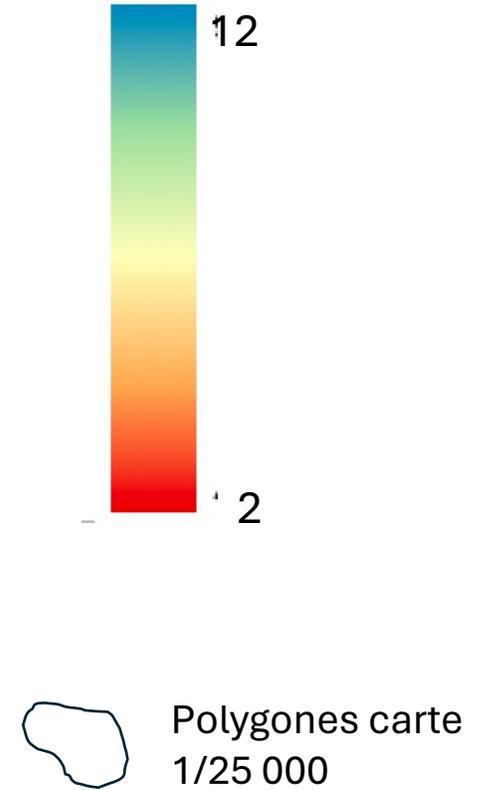
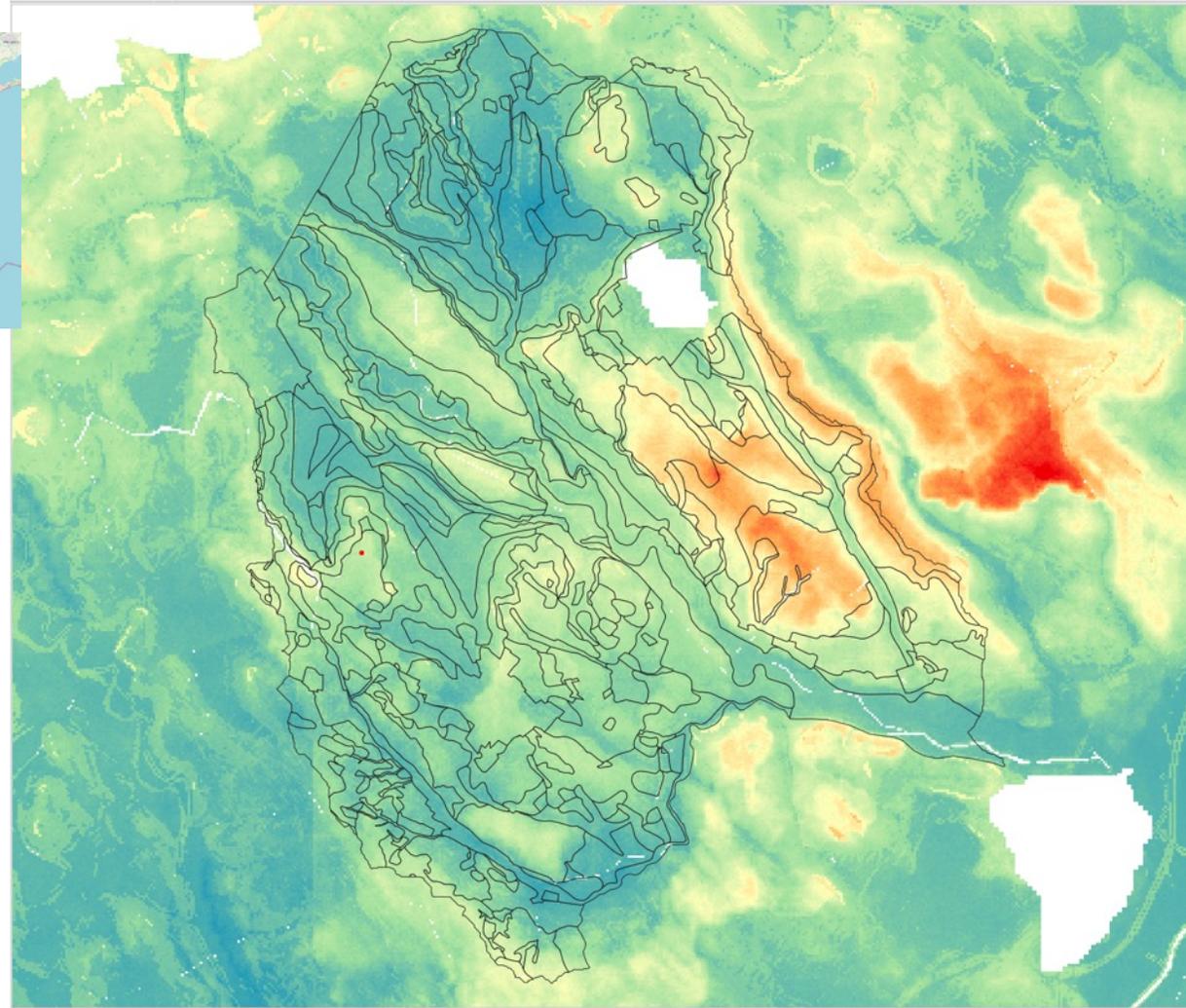
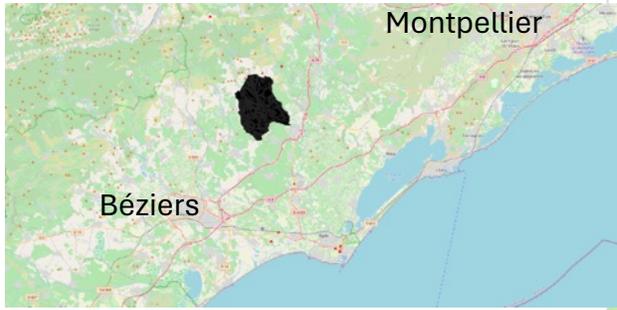
Incertitudes

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

Cartes d'Indice de Multifonctionnalité et 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

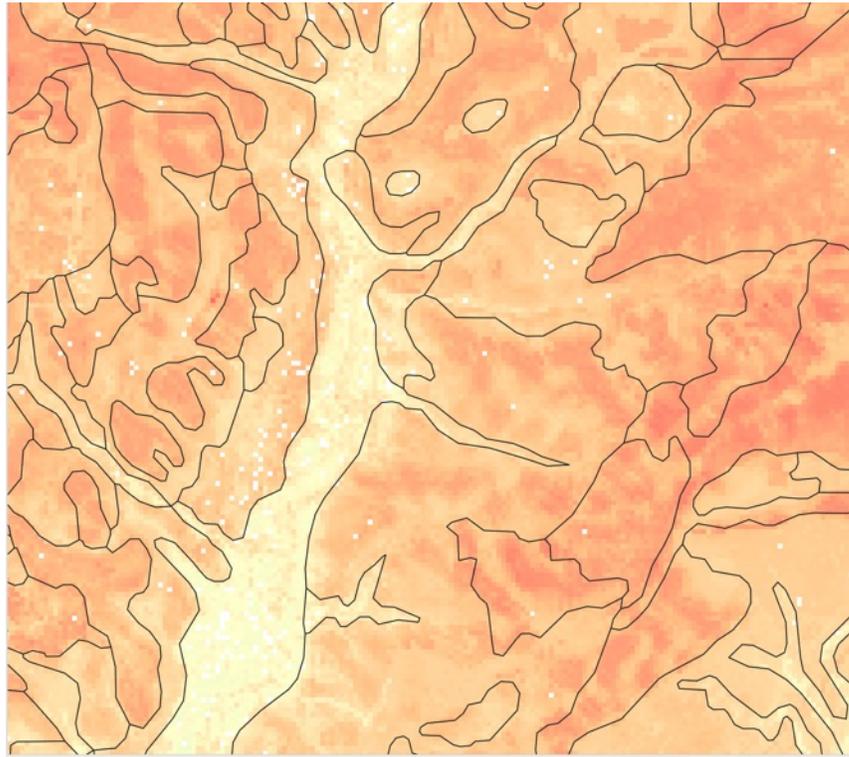
Retrouvez toutes les présentations pour le Séminaire
LA CONNAISSANCE DES SOLS AU SERVICE DES PROJETS DE TERRITOIRES

Sur [lien de la page](#)

Comparaison des versions de cartes de Réservoir Utile du sol

2019

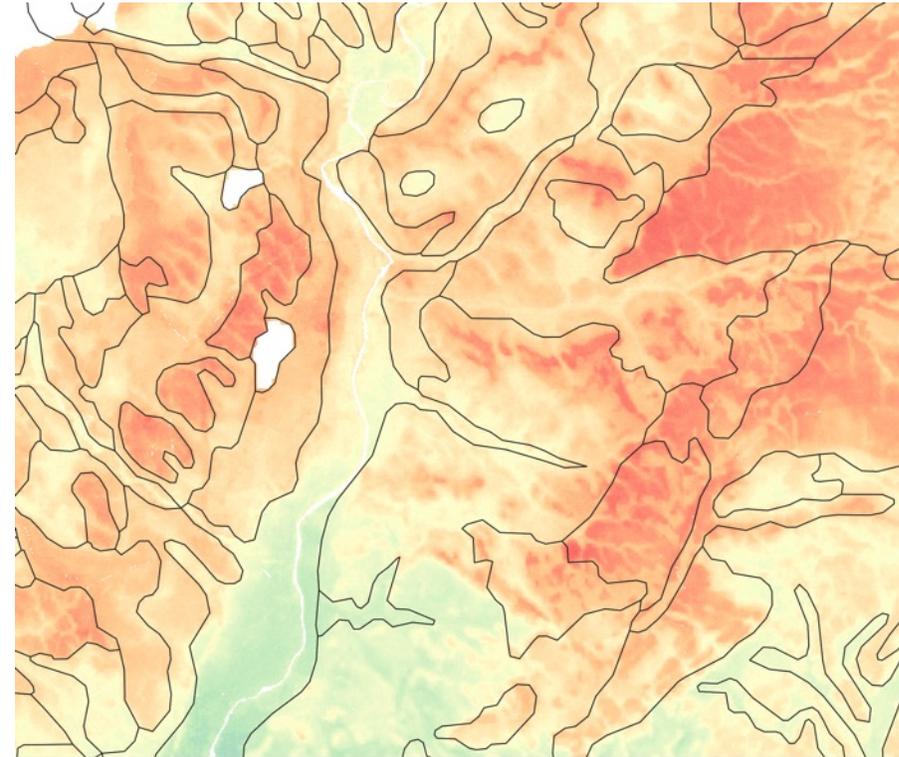
1 profil / 13.5 km²



10 km

2024

1 profil / 1.3 km²



Comparaison des versions de cartes de Réservoir Utile du sol

2019

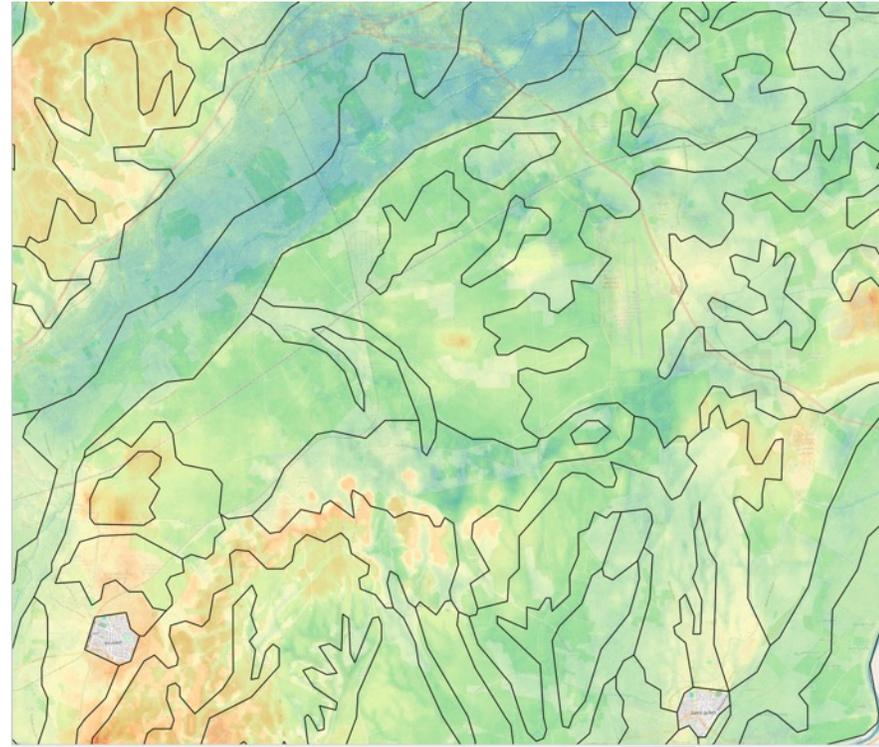
1 profil / 13.5 km²



10 km

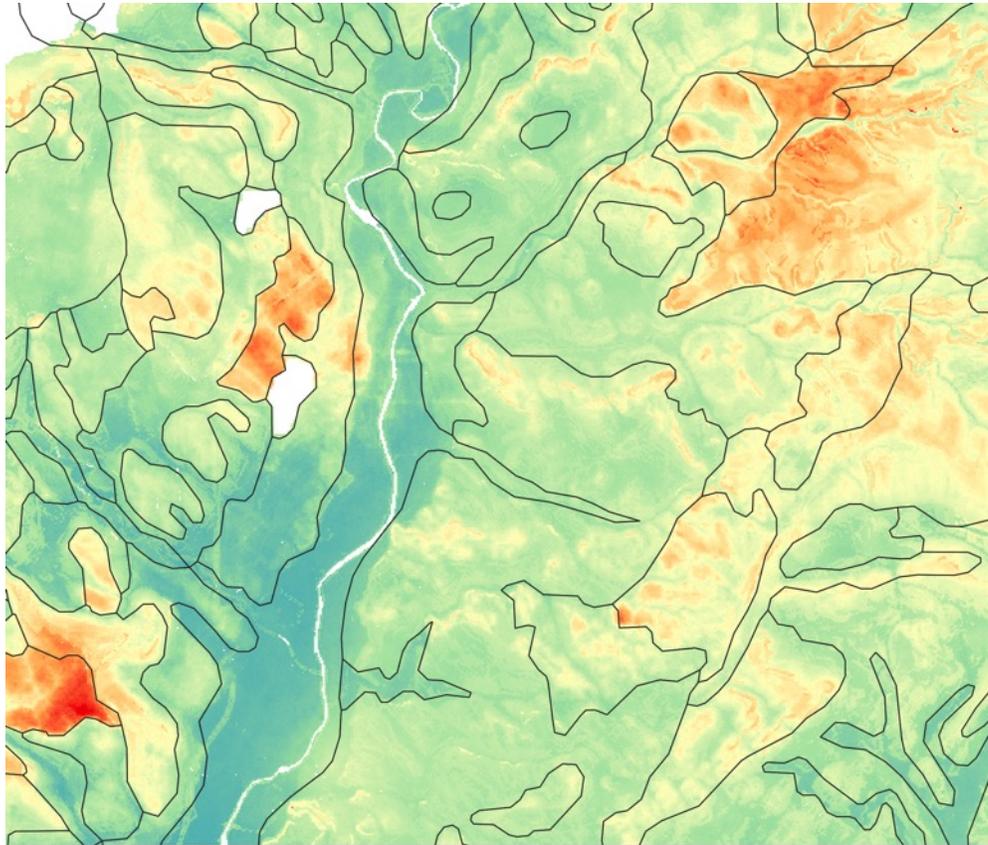
2024

1 profil / 1.3 km²



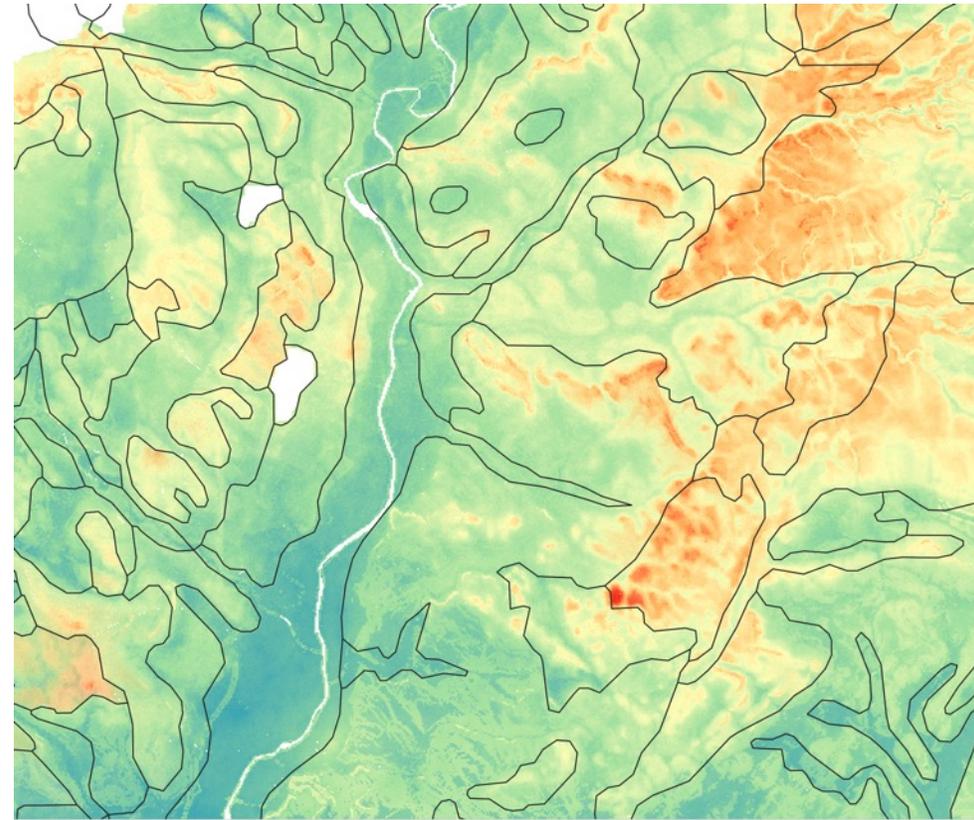
Comparaison des versions de cartes d'indice de multifonctionnalité des sols

2022
1 profil / 9,9 km²

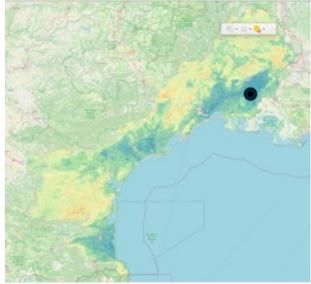


10 km

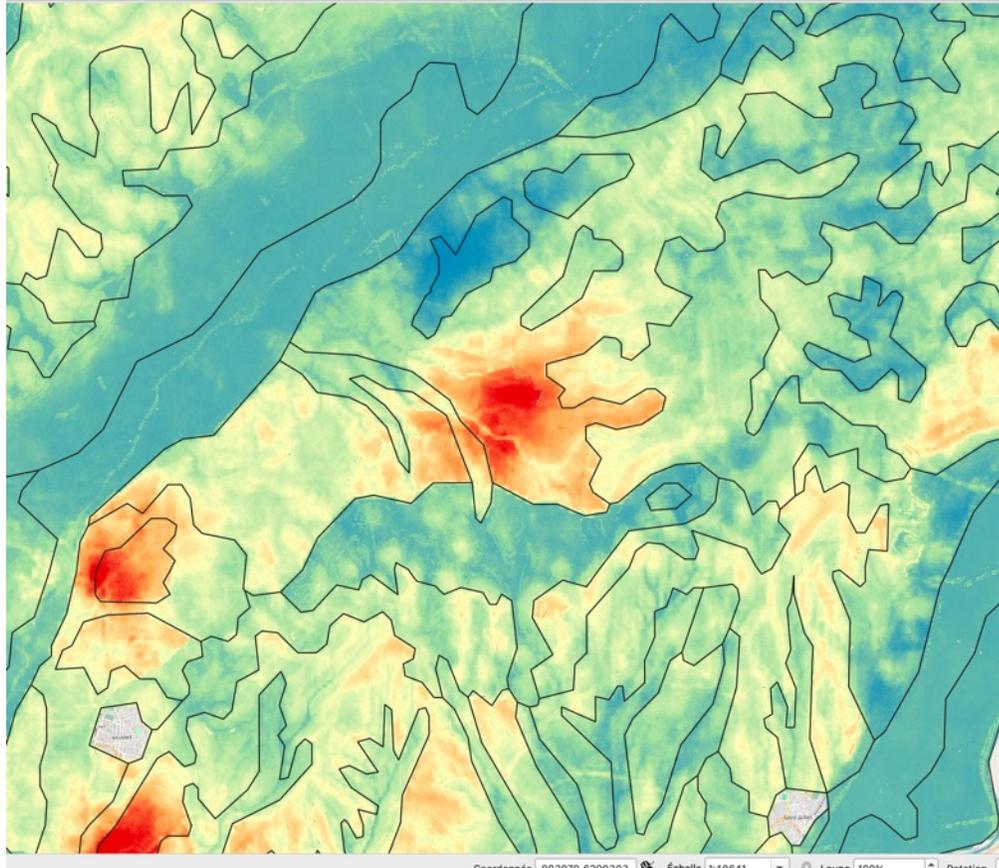
2024
1 profil / 1.3 km²



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



2022
1 profil / 9,9 km²



2024
1 profil / 1.3 km²

