Thèse de Doctorat en science de la Terre et de l'Univers

Exploration du potentiel de données d'observations de terrain pour caractériser ou cartographier des propriétés ou des comportements des sols

Anne Richer de Forges

Membres du Jury

Mr Hocine BOURENANNE, Ingénieur de Recherche (HDR), INRAE Info&Sols, directeur de thèse
Mr Dominique ARROUAYS, Ingénieur de Recherche, INRAE Info&Sols, co-directeur de thèse
Mr David MONTAGNE, Maître de Conférences, AgroParisTech, UMR Ecosys, rapporteur
Mme Catherine KELLER, Professeure, CEREGE, rapportrice
Mr Ary BRUAND, Professeur émérite, Université d'Orléans
Mr Etienne DAMBRINE, Directeur de Recherche, INRAE
Mme Cécile GOMEZ, Directrice de Recherche, IRD, UMR Lisah
Mr Christian WALTER, Professeur, Institut Agro, UMR SAS

ACADÉMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE

23 septembre 2026

Introduction

Acquisition

Observations de terrain
Descriptions des sols
Analyses

Base de données des sols de France (DoneSol)

Données quantitatives 32 %

Données qualitatives 68 %

Introduction : questions de recherche

Acquisition

Observations de terrain
Descriptions des sols
Analyses

Base de données des sols de France (DoneSol)

Données quantitatives 32 %

Données qualitatives 68 %

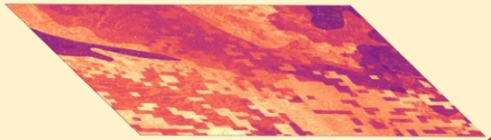
Cartographie des sols par modélisation statistique (DSM)

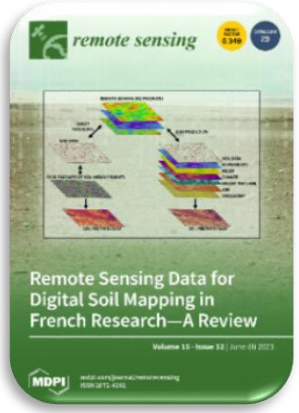
Données

MODELISATION

Cartes de prédiction de propriétés des sols

+ Cartographie des incertitudes

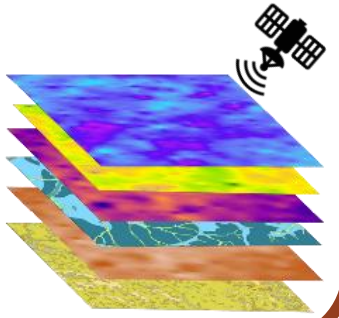




Richer-de-Forges A.C., Chen Q., Baghdadi N., Chen S., Gomez C., Jacquemoud S., Martelet G., Mulder V.L., Urbina-Salazar D., Vaudour E., Weiss M., Wigneron J.-P., Arrouays D. (2023). **Remote Sensing Data for Digital Soil Mapping in French Research - A review**. Remote Sensing. 15, 3070. https://doi.org/10.3390/rs15123070

Covariables environnementales

Sol
Climat
Végétation
Relief
Géologie
Temps



Introduction : questions de recherche

Acquisition

Observations de terrain
Descriptions des sols
Analyses

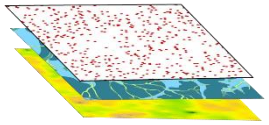
Base de données des sols de France (DoneSol)

Données quantitatives 32 %

Données qualitatives 68 %

très utilisées

- points
- polygones
- rasters



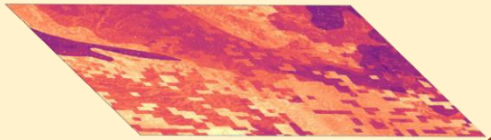
Cartographie des sols par modélisation statistique (DSM)

Données

MODELISATION

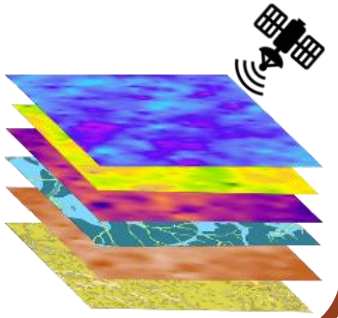
Cartes de prédiction de propriétés des sols

+ Cartographie des incertitudes



Covariables environnementales

Sol
Climat
Végétation
Relief
Géologie
Temps



Introduction : questions de recherche

Acquisition

Observations de terrain
Descriptions des sols
Analyses

Base de données des sols de France (DoneSol)

Données quantitatives 32 %

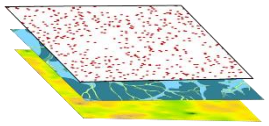
Données qualitatives 68 %

sous-utilisées

Comment mieux valoriser cette masse d'informations ?

très utilisées

- points
- polygones
- rasters



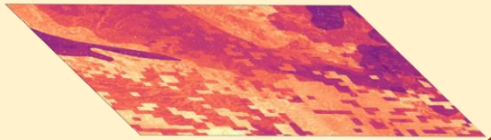
Cartographie des sols par modélisation statistique (DSM)

Données

MODELISATION

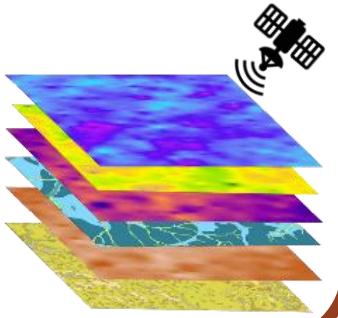
Cartes de prédiction de propriétés des sols

+ Cartographie des incertitudes



Covariables environnementales

Sol
Climat
Végétation
Relief
Géologie
Temps



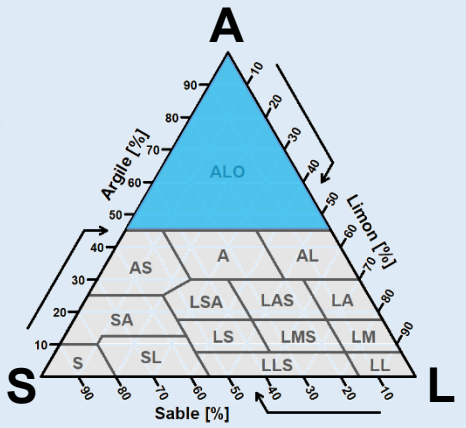
Exemple d'une variable qualitative en classes

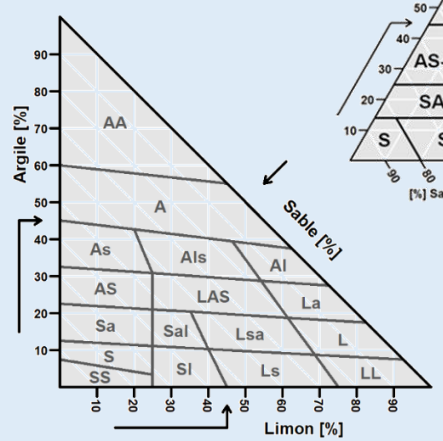
SOL

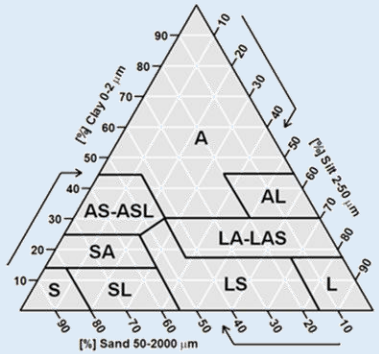
HFST « *Hand-Feel Soil Texture* »

Estimation de la classe de texture sur le terrain

Données qualitatives





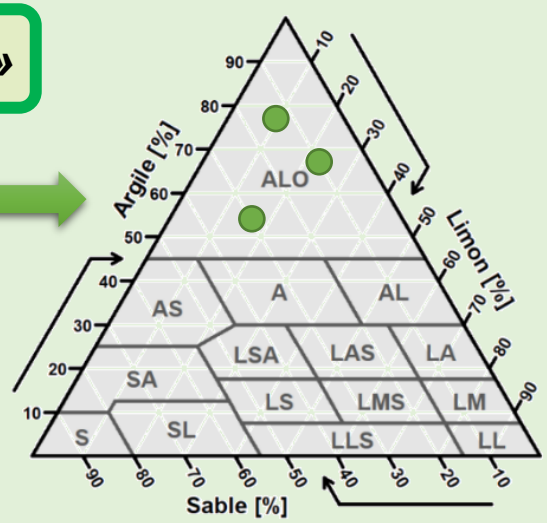


LAST « *Laboratory Analysis of Soil Texture* »

Analyse granulométrique en laboratoire

Données quantitatives en %

%argile + %limon + %sable = 100%



1 Peut-on utiliser l'estimation de la texture comme « proxy » de mesures granulométriques ?

➔ **Causes possibles d'incohérences**
➔ **Quantification de l'impact de cette utilisation sur les incertitudes obtenues**

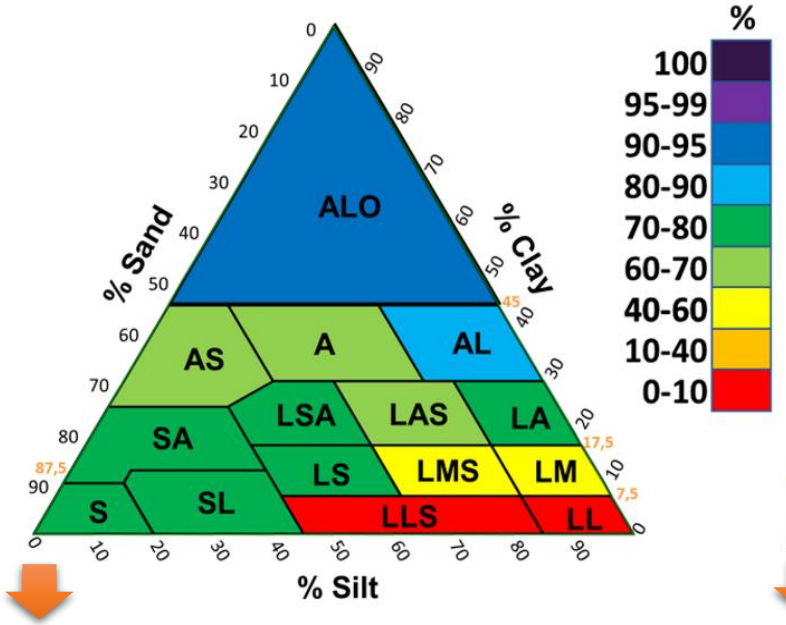
Matrice de confusion entre :

- **les classes issues des LAST (Analyse granulométrique en laboratoire)**

et

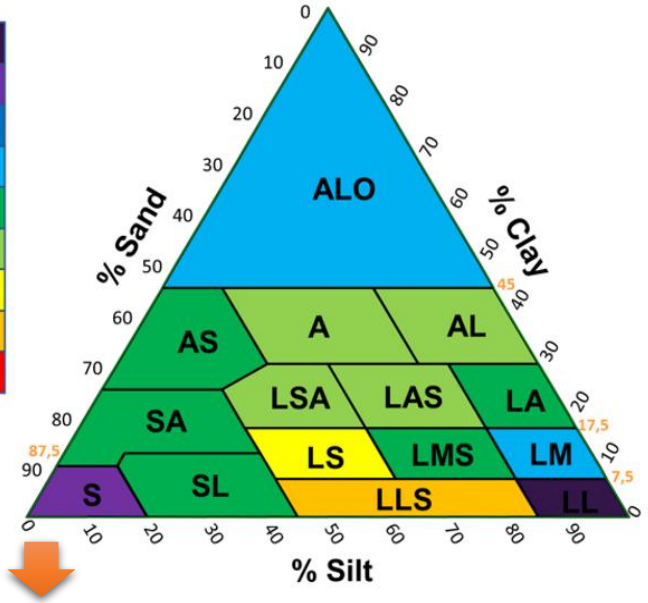
- **les HFST (Estimation de la classe de texture sur le terrain)**

Précision de l'utilisateur



Comment chaque classe HFST correspond à celle issue des LAST

Fiabilité du producteur



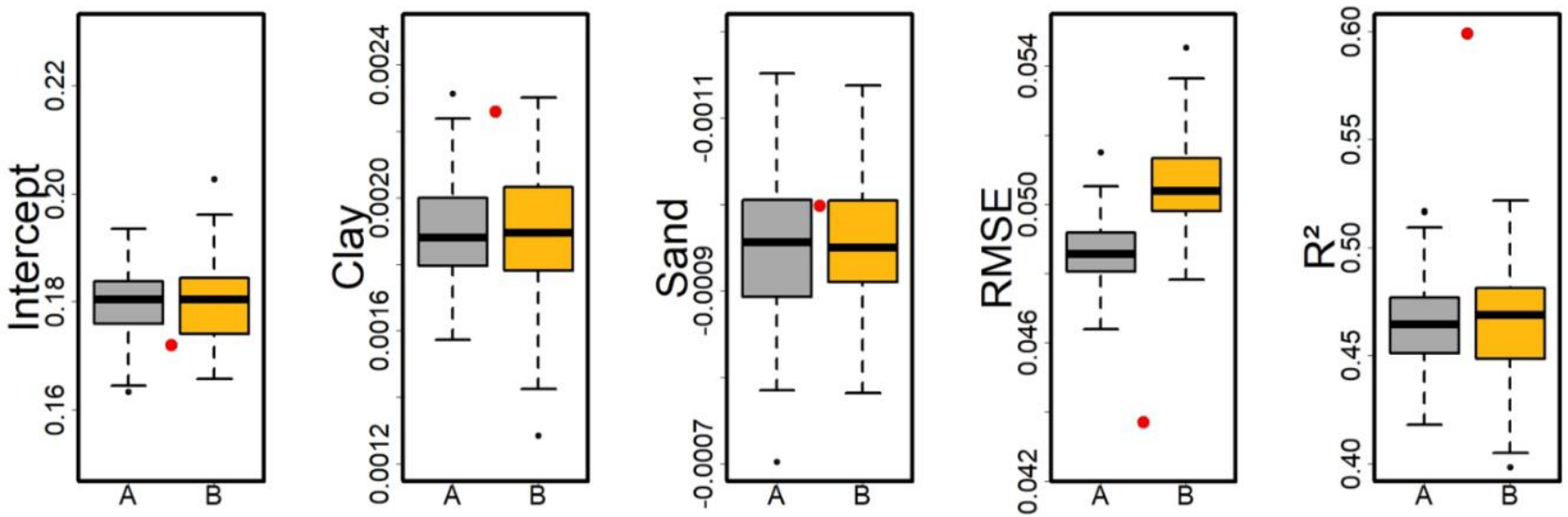
Comment chaque classe de texture issue des LAST correspond à la classe de texture HFST

Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Chen S., Román Dobarco M., Libohova Z., Roudier P., Minasny B., Bourennane H. (2022). **Hand-feel soil texture and particle-size distribution in central France. Relationships and implications.** CATENA 106155. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106155

1 Peut-on utiliser l'estimation de la texture comme « proxy » de mesures granulométriques ?

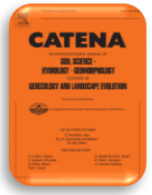
➔ Analyse de la propagation de l'incertitude dans une fonction de pédotransfert (PTF) de la rétention en eau

- paramètres de la PTF d'origine
- paramètres de la PTF calibrée à partir des LAST estimées à partir des HFST
- paramètres de la PTF calibrée à partir des LAST estimées à partir des HFST avec prise en compte d'une mauvaise allocation des horizons à une classe HFST



PTF = Intercept + b Clay + c Sand

- **l'incertitude a augmenté et les performances ont diminuée avec la prise en compte de la fiabilité du producteur mais les écarts restent raisonnables**
- **Il est donc important de prendre en compte ces erreurs et ces confusions dans l'attribution des classes HFST pour leur utilisation dans des PTF**



Richer-de-Forges A.C., Chen S., Arrouays D., Bourennane H., Minasny B. (2024). **Hand-feel soil texture classes and particle-size distribution as predictors of soil water content at field capacity. Further insights into the sources of uncertainty.** CATENA. Volume 244, 108268 https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108268

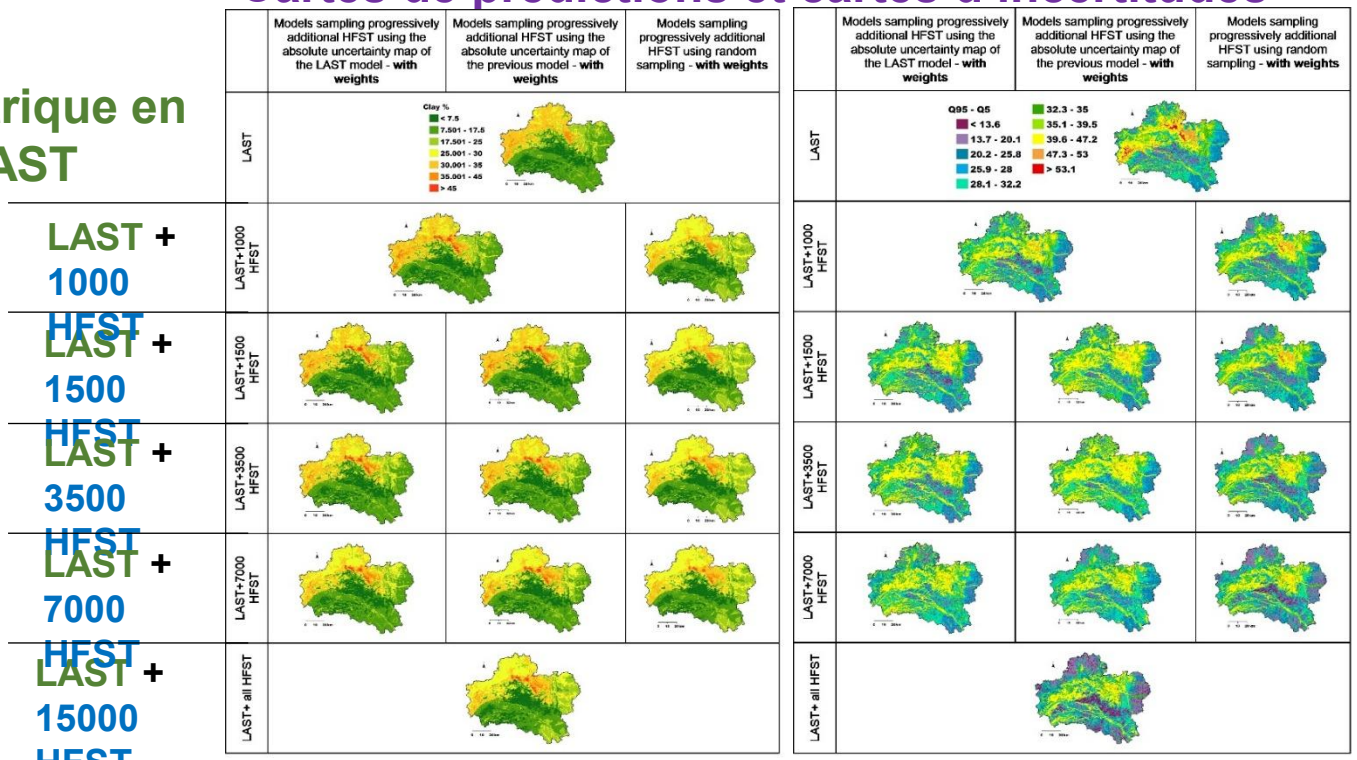
① Peut-on utiliser l'estimation de la texture comme « proxy » de mesures granulométriques ?

➔ Amélioration des prédictions de la teneur en argile par DSM par ajout de données qualitatives

Analyse granulométrique en laboratoire = LAST

Estimation de la classe de texture sur le terrain = HFST

Cartes de prédictions et cartes d'incertitudes



LAST + 1000 HFST

LAST + 1500 HFST

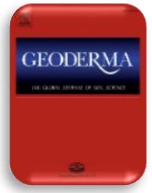
LAST + 3500 HFST

LAST + 7000 HFST

LAST + 15000 HFST

OUI mais l'incertitude dépend de la stratégie d'échantillonnage et des gammes de teneur en argile

➔ **le choix de la meilleure stratégie doit s'appuyer sur les objectifs de l'utilisateur**



Richer-de-Forges A.C., Chen S., Heuvelink G.B.M., van der Westhuizen S., Orton T.G., Bourennane H., Arrouays D. (2025). **Does digital soil mapping prediction performance of soil texture improve when adding uncertain field texture estimates? A study based on clay content**. Geoderma. 456 (2025) 117277. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117277

2 Peut-on utiliser des données qualitatives pour évaluer des prédictions par modélisation (DSM) de variables quantitatives ?

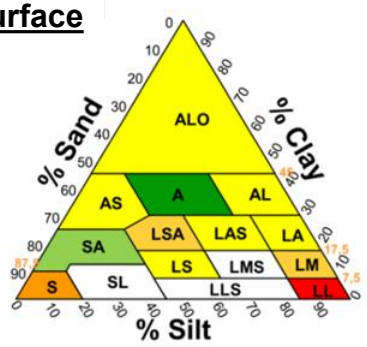
➔ **Pertinence d'utilisation de produits de modélisations de différentes étendues pour un usage local**

➔ **Evaluation de la performance des prédictions de la granulométrie avec l'estimation de terrain de la classe de texture**

Moyenne de la distance la plus proche entre la classe de texture estimée sur le terrain (HFST) et les granulométries prédites par modélisation des points appartenant à cette classe

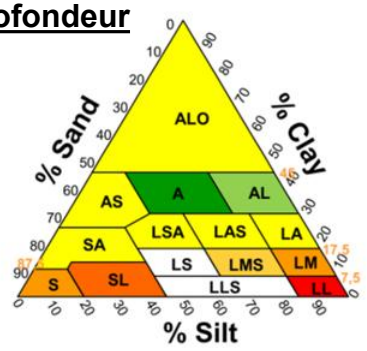
4 modèles :

En surface

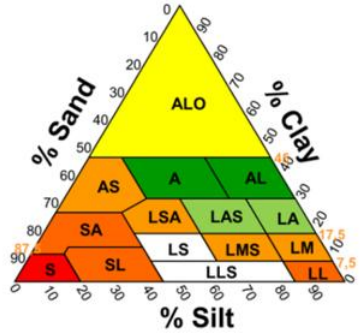


Regional model | *GlobalSoilmap*-France | LUCAS | SoilGrids

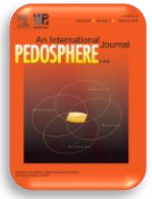
En profondeur



Regional model | *GlobalSoilmap*-France



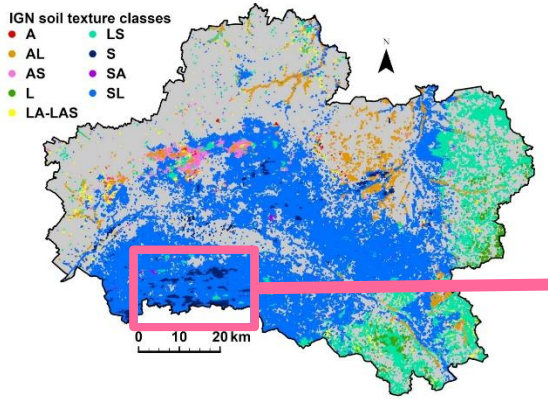
SoilGrids

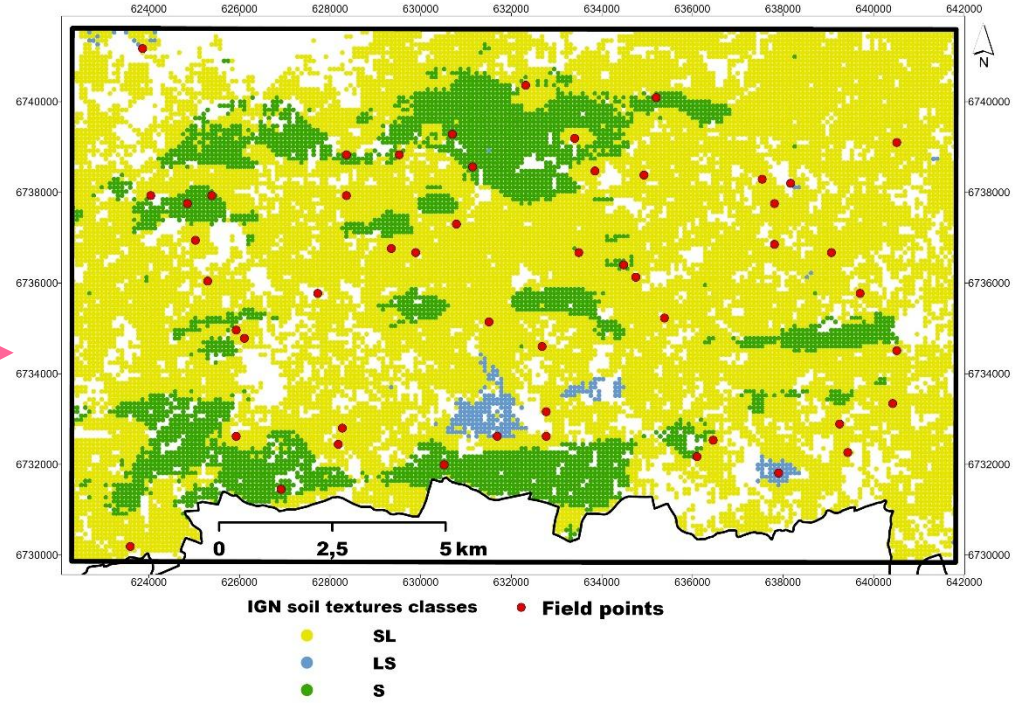


Richer-de-Forges A.C., *Arrouays D., Poggio L., Chen S., Lacoste M., Minasny B., Libohova Z., Roudier P., Mulder V.L., Nédélec H., Martelet G., Lemercier B., Lagacherie P., Bourennane H.* (2023). **Hand-feel soil texture observations to evaluate the accuracy of digital soil maps for local prediction of particle size distribution. A case study in central France**. Pedosphere. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.009

3 Peut-on utiliser conjointement des données de sources hétérogènes acquises dans des référentiels différents ?

- **Utilisation de données qualitatives comme calibration de modèle**
- **Utilisation conjointe de données qualitatives hétérogènes en modélisation**
- **Utilisation conjointe des covariables issues de télédétection et des données qualitatives sol**





OUI mais sous certaines conditions :

- **des observations fidèles (même biaisées) pour identifier des structures spatiales**

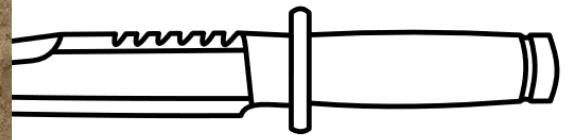
Eymard A., Richer-de-Forges A.C., Martelet G., Tissoux H., Bialkoswki A., Dalmasso M., Chrétien F., Belletier D., Ledemé G., Laloua D., Josière O., Commagnac L., Bourennane H., Arrouays D. (2024). **Exploring the untapped potential of hand-feel soil texture data for enhancing digital soil mapping: Revealing hidden spatial patterns from field observations**. Geoderma. Vol. 441, 116769. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116769

Variable qualitative ordonnée

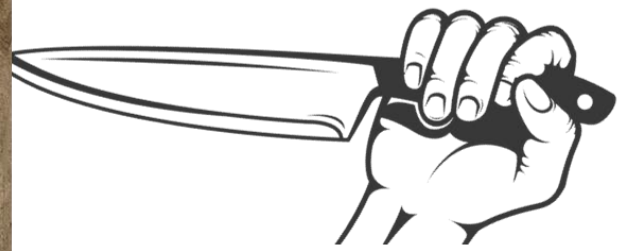
Données qualitatives ordonnées : le test de compacité sur le terrain

Horizon peu compact (SCC-1)
➔ pénétration sans effort, le sol est meuble

Horizon légèrement compact (SCC-2)
➔ pénétration avec un léger effort

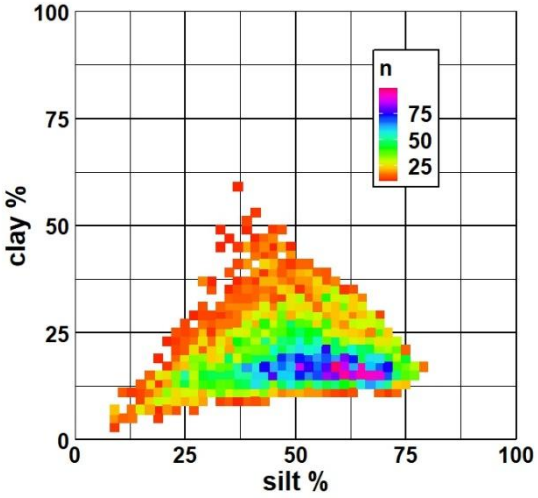


Horizon compact (SCC-3)
➔ pas de pénétration complète même avec un effort important

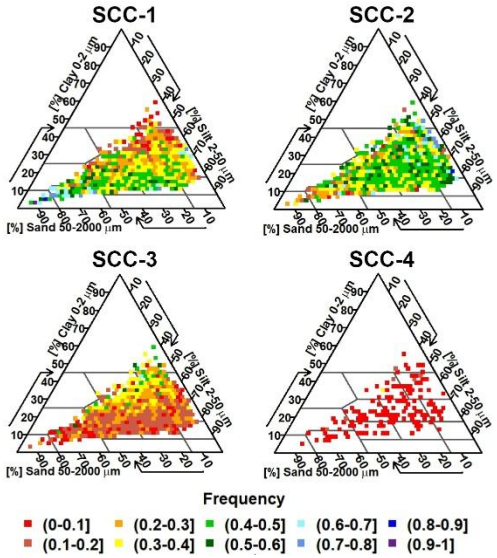


Horizon très compact (SCC-4)
➔ pénétration que de quelques millimètres

Cellules 2 x 2 % dans l'espace argile/limon

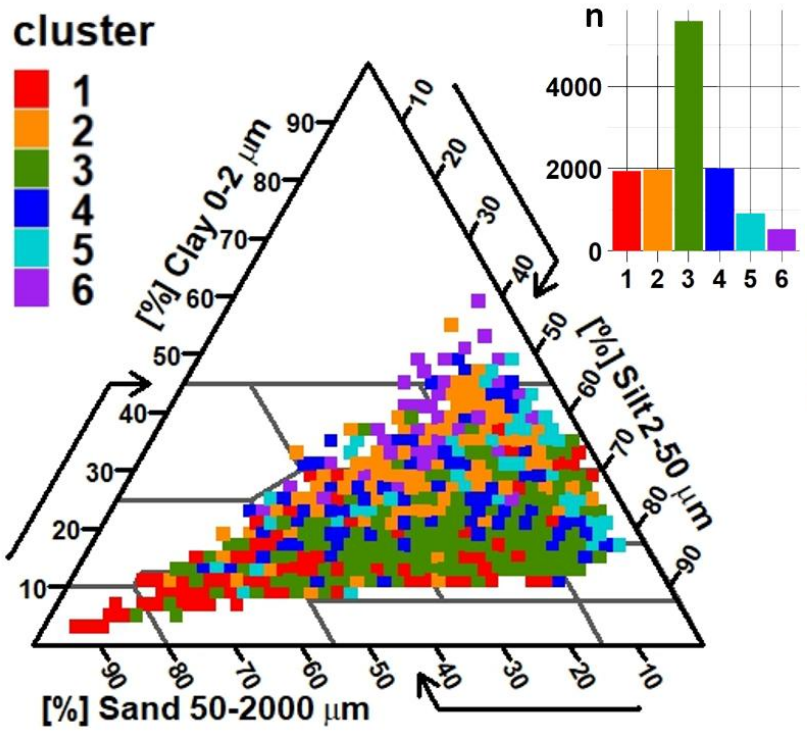


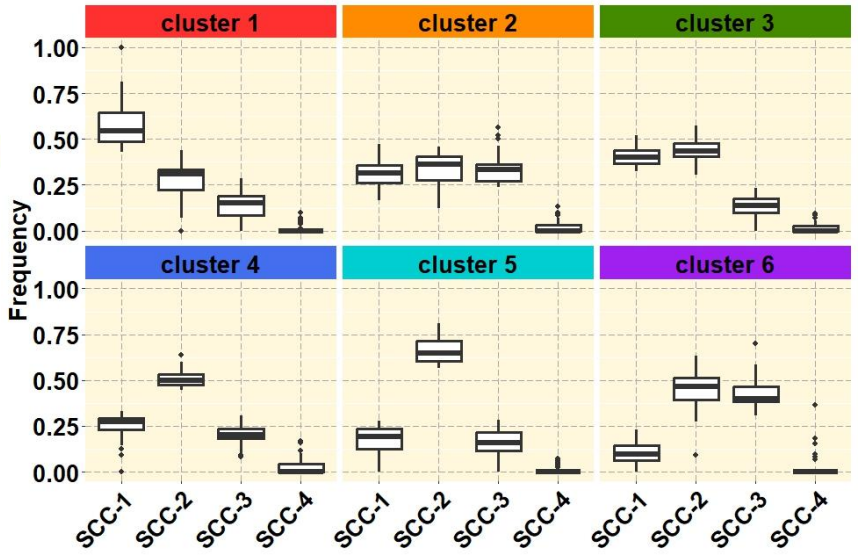
Fréquence des classes de compacité par cellule

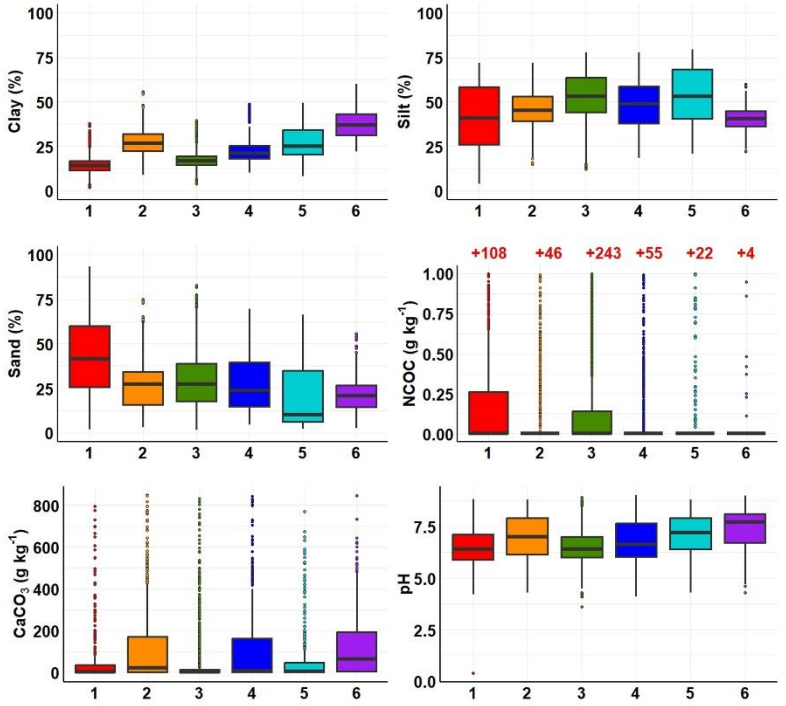


4 Peut-on identifier et interpréter des types de comportements à partir de données qualitatives ?

➔ **Détermination des relations entre des observations qualitatives et des indicateurs quantitatifs**
➔ **Mise en évidence de clusters de comportement des sols à partir d'une variable qualitative**





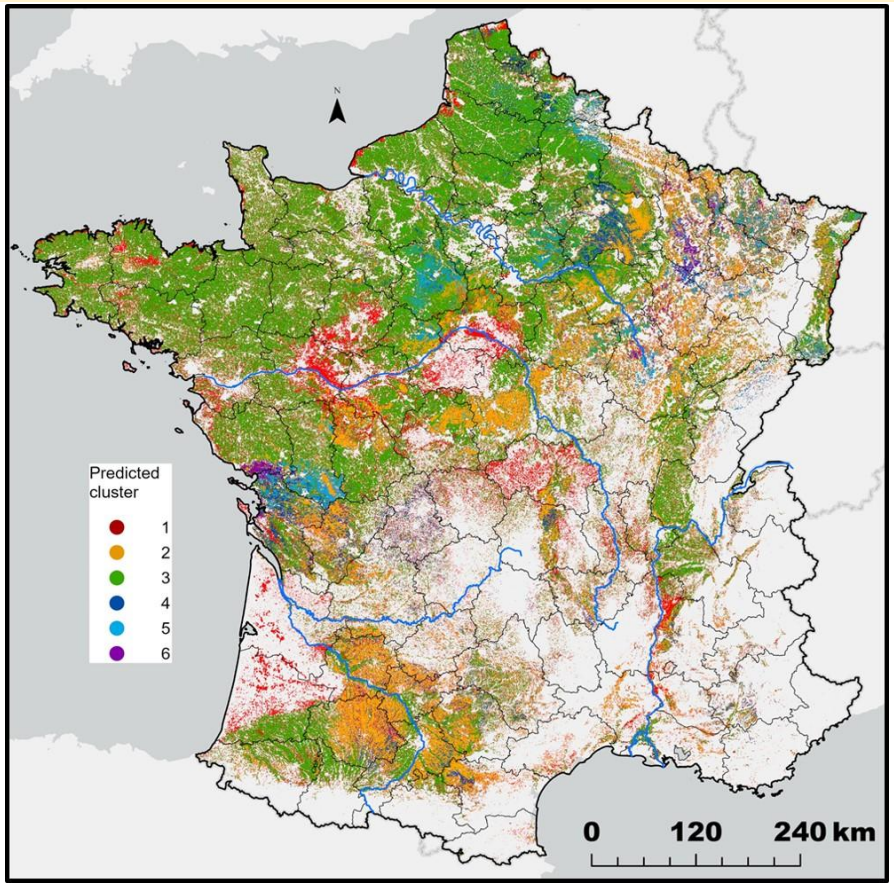


OUI mais l'application pratique de notre démonstration reste limitée car nous manquons d'informations sur les pressions externes

Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Libohova Z., Chen S., Beaudette D.E., Bourenanne H. (2024). **Revealing Topsoil Behavior to Compaction from Mining Field Observations**. Land. 13(7), 909. https://doi.org/10.3390/land13070909

5 Peut-on les spatialiser ?

➔ Spatialisation par DSM de ces clusters de comportements sur la France métropolitaine



- Cluster 1 ➔ Zones sableuses
- Cluster 2 ➔ textures AL souvent développées à partir de matériaux calcaires
- Cluster 3 ➔ domine dans les zones de textures limoneuses ou ternaires (LM, LMS, LS, LSA, LAS, LA)
- Cluster 4 ➔ conditions mal drainées (stagnosols, zones déprimées, anciens marais, sols à risque d'inondation…)
- Cluster 5 ➔ sols riches en limons fins ou sols développés à partir de calcaires tendres avec beaucoup de particules fines limoneuses
- Cluster 6 ➔ sols argileux et structures plutôt instables (marais côtiers, sols argileux sodiques, sols argileux mal drainés…)

OUI cette carte montre qu'un test très simple a un potentiel de valorisation comme donnée d'entrée de *Digital Soil Assessment*

Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Chen S., Libohova Z., Beaudette D.E., Bourenanne H. (2024). **Mapping Topsoil Behavior to Compaction at National Scale from an Analysis of Field Observations**. Land. 13(7), 1014. https://doi.org/10.3390/land13071014

CONCLUSION

68 % de données qualitatives dans la base de données France
➔ même constat dans d'autres pays
➔ contiennent des informations importantes
➔ intérêt de les valoriser
exemple : utilisation de l'estimation tactile de la texture comme proxy de fractions granulométriques

Mélange de données hétérogènes pour produire de la connaissance supplémentaire
➔ exemple : mise en évidence sous forêt de motifs spatiaux validés sur le terrain

Utilisation des données qualitatives pour identifier et interpréter des types de comportements des sols
➔ spatialisation des clusters de compacité sur la France
➔ un test de terrain très simple a un fort potentiel de valorisation

https://hal.inrae.fr/tel-05015008v1

Remerciements

Dominique

Hocine

Budiman

Songchao

Laura

Guillaume L.

Jean-Pierre

Hervé

Marine L.

Tom

Loïc

Jean

Stéphane

Diego

Didier L.

Stephan

Hélène

Blandine

Cécile

Titia

Alexandre

Marie

Gerard

Didier C.

Zamir

Fabrice

Philippe

Guillaume M.

Qianqian

Mercédès

David

Pierre

Anne

Laurent

Dylan

Christel

Nicolas

Olivier

Alex

Emmanuelle

Marine D.