

Surveillance des contaminants métalliques dans les sols de Nouvelle-Aquitaine

JOURNÉES RMQS 2026

BORDEAUX SCIENCES AGRO

12 FÉVRIER 2026

LIONEL SAVIGNAN,

PHILIPPE CHÉRY, FÉLIX COLIN, CLÉMENTINE DUVIGNEAU, STÉPHANIE
JALABERT, ALEXANDRE LEE, LOUISE PAUL (BORDEAUX SCIENCES AGRO)
GAËTANE LESPES, STEPHANE FAUCHER (UNIVERSITÉ DE PAU ET DES PAYS DE
L'ADOUR)



Introduction

- ▶ **Les sols** : soumis à des pressions et menaces, notamment les **pollutions et contaminations chimiques**
- ▶ De nature inorganique : **éléments trace**
- ▶ Les historiques : **Plomb (Pb), Cuivre (Cu)** [As, Cd, Ni]
- ▶ **Éléments trace émergents** Emergence dans l'environnement liée à des « nouvelles » utilisations comme dans les pots catalytiques (Pd, Pt, Rh), les nanoparticules (Ag, Ti), dans les composants électroniques (REE)...
 - ▶ **Argent (Ag)** [Pt, Pd, Rh]
- ▶ **Objectifs :**
 - ▶ Déterminer la distribution spatiale des éléments traces émergents dans les sols aquitains en s'appuyant sur le RMQS
 - ▶ Identifier les origines des éventuelles contaminations de ces éléments



Le plomb

- ❖ Abondance croûte terrestre : 17 mg/kg (Wedepohl, 1995)
- ❖ Métal très malléable et ductile
- ❖ Rare à l'état natif, minéral principal -> PbS (galène)



Photo de Wolfgang Moroder



- ❖ Utilisation très variée (depuis l'Antiquité jusqu'à aujourd'hui :
- ❖ Toiture, plomberie, munitions, batterie, antidétonant dans l'essence, radiographie, etc...
- ❖ Pollution diffuse globale
- ❖ Toxicité importante pour l'humain et l'environnement : **saturnisme**



Le cuivre

- ❖ Abondance croûte terrestre : 14,3 mg/kg (Wedepohl, 1995)
- ❖ Excellente conductivité thermique et électrique
- ❖ Gisements important à l'état natif et nombreux minerais
- ❖ Utilisation très variée (depuis le Néolithique jusqu'à aujourd'hui) :
- ❖ Ustensiles, ornementation, alliage (laiton), électronique, plomberie, fongicide
- ❖ Oligo-élément pour le vivant !
- ❖ Ecotoxicité de Cu^{2+} à haute dose



Photo de Jonathan Zander



L'argent

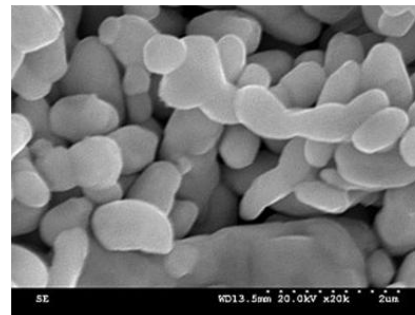


- ❖ Abondance croûte terrestre : 0,07 mg/kg (Wedepohl, 1995)
- ❖ Utilisation historique en photographie, bijouterie électronique, catalyse, soudure...
- ❖ Métal émergent ? Nanoparticules d'Ag (Ag-NPs) utilisées pour ses propriétés antimicrobiennes

- ❖ Principales sources de contaminations des sols : Décharges et boues d'épurations -> 50 % des apports anthropiques vers le sol (Eckelman et Graedel, 2007)
- ❖ Toxicité Ag^+ et Ag-NPs: végétaux et vie microbienne du sol ++

Fourchettes médianes sols (mg/kg)	Ag
Zone minière	0,2 - 132
Zone industrielle	0,5 - 1,55
Zone urbaine	0,28 - 60
Zone agricole	0,04 - 7,8

Argent nanoparticulaire



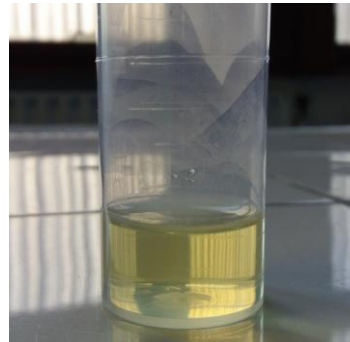
Theivasanthi, Wikimedia Commons



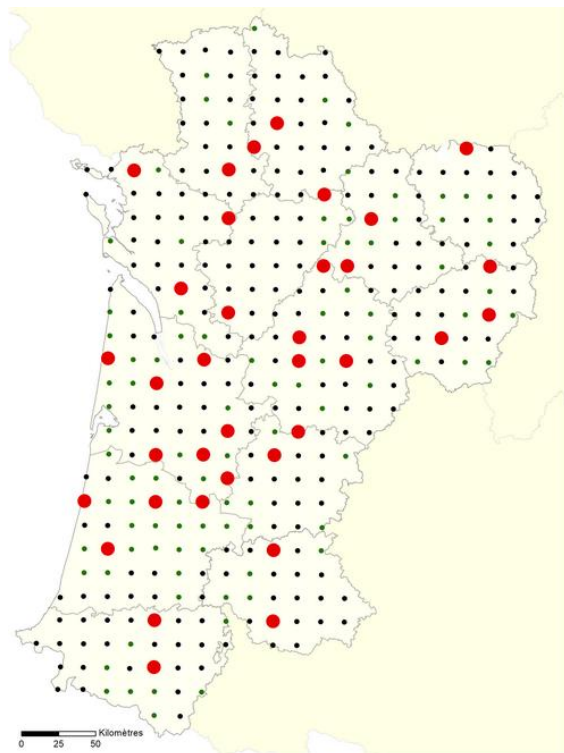
Zone d'étude, échantillonnage et méthodes analytiques



Photo : Thomas Petillon

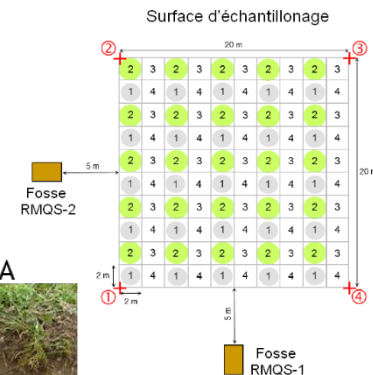


Echantillonnage : le RMQS en Nouvelle-Aquitaine



- ▶ Zone d'étude : Nouvelle Aquitaine + Gers (90 232 km²)
- ▶ 356 sites RMQS
- ▶ RMQS-1 : Base de données complètes sur la région
- ▶ RMQS-2 : 35 sites prélevés et analysés intégralement

- ▶ **Prélèvements sur site**
- ▶ **Prélèvements projet thèse → Fosse**
- ▶ **Horizon de surface organo-minéral**



Méthodes analytiques : *Analyses des sols*

- ▶ **Caractérisation élémentaire échantillons RMQS-1 : Cd, Cu, Pb**
 - ▶ Minéralisation HF (49 %)/HClO₄ (69 %) puis analyse par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (Laboratoire des sols Inrae, à Arras)
- ▶ **Caractérisation élémentaire échantillons RMQS-2 : Ag, Cd, Cu, Pb, Pd, Pt, Rh**
 - ▶ Minéralisation totale par micro-ondes : mélange acides HNO₃, HCl, HF / 200 °C pendant 20 min, puis détermination élémentaire par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICPMS, Agilent 7900)
 - ▶ Méthodologie développée et validée avec l'IPREM (Université de Pau et Pays de l'Adour)



Concentration totale $\neq$ concentration disponible pour la plante

Méthodes analytiques :

Analyses statistiques et spatiales

► Statistiques descriptives :

- Analyse exploratoire (Tukey, 1997)
- Quartiles et vibrisses (seuil d'anomalie)

► Matrice de corrélation et régression

► Bases de données SIG

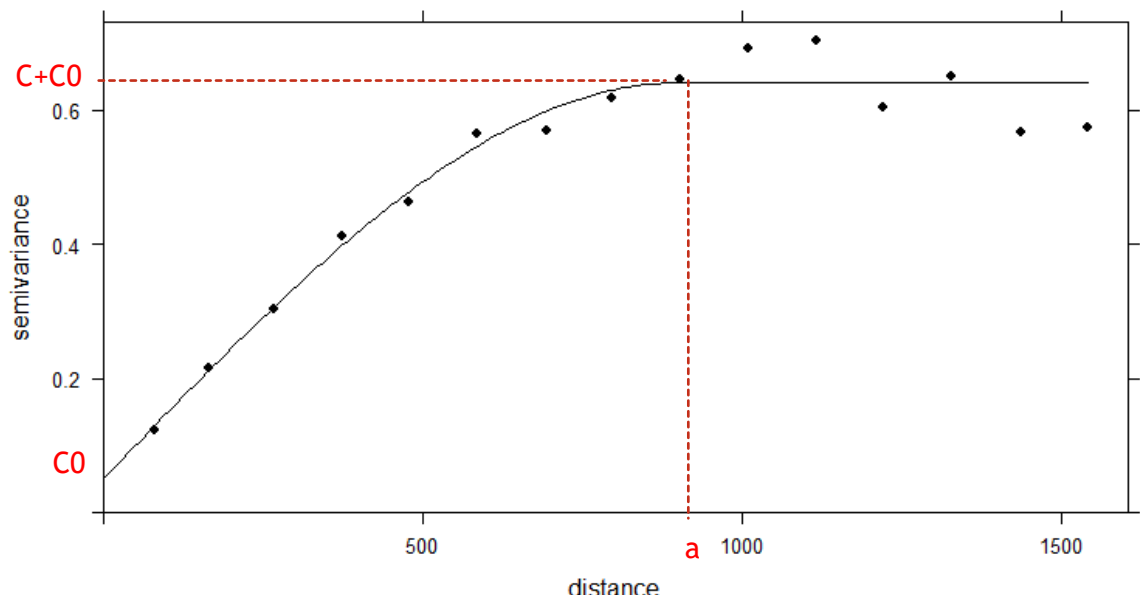
- Recensements (INSEE)
- SIG Mines France (BRGM)
- Cartes géologiques et BD CHARM 1:50 000 (BRGM)
- BD Routes 500 (IGN)
- Réseau de canons anti-grêle (ANELFA)

Méthodes analytiques :

Analyses spatiales et géostatistiques

- **Variogramme** : Estimer l'autocorrélation spatiale → les choses proches ont tendance à être plus semblables que celles qui sont plus éloignées

- $$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{[Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2\} \text{ (Matheron, 1963)}$$



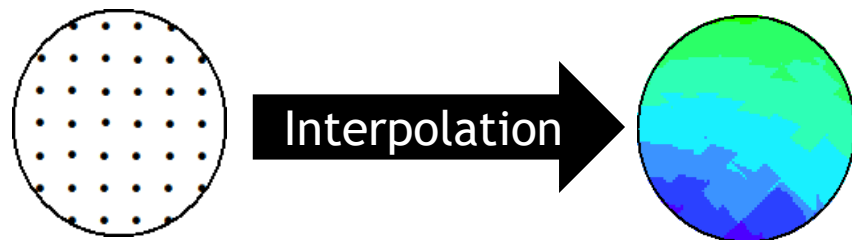
- **Modélisation :**

- Type de modèle
- Effet de pépite (C0)
- Palier (C+C0)
- Portée (a)

Méthodes analytiques :

Analyses spatiales et géostatistiques

- ▶ **Variogramme** → **Interpolation spatiale**
- ▶ Objectif : prédictions des valeurs des concentrations en tout point de la zone d'étude à partir des concentrations et localisations connues.



- ▶ Interpolation spatiale à partir du variogramme → krigeage
- ▶ Estimateur linéaire par pondération basée sur la distance entre les points et l'autocorrélation

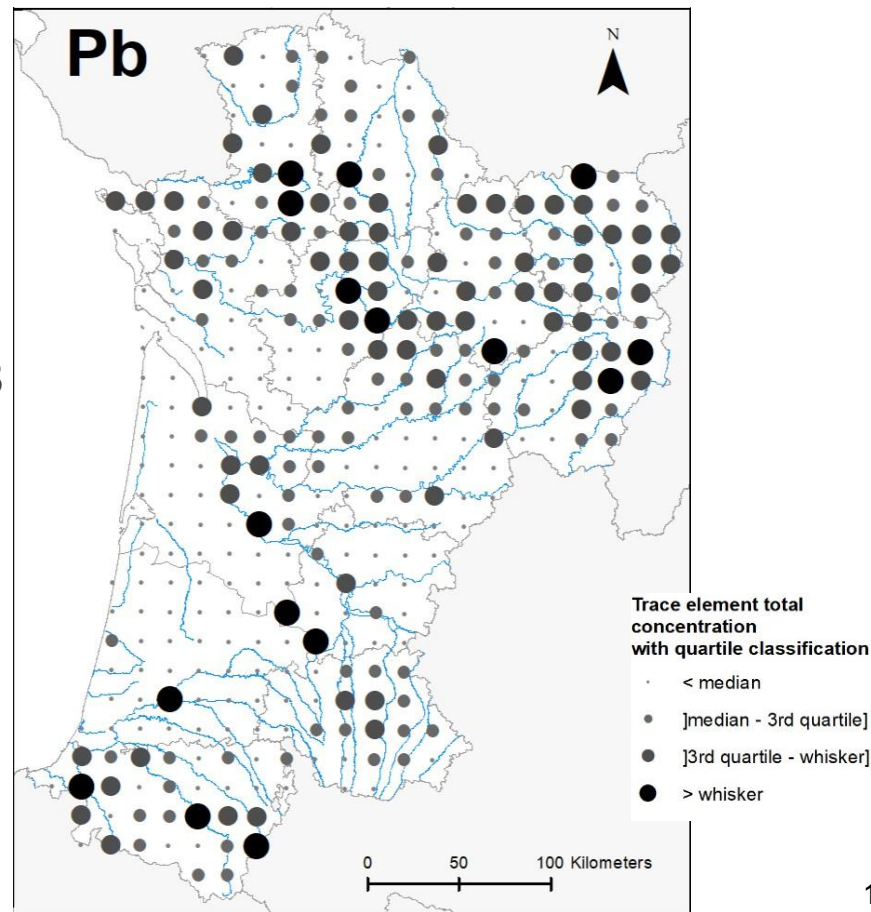
Distribution des éléments métalliques dans les sols néo-aquitains

Distribution des éléments métalliques dans les sols néo-aquitains

► Concentration éléments émergents : Pb (RMQS-1)

Élément	Pb
unité	mg/kg
Min	3,1
1 ^{er} quartile	19
Médiane	27,1
3 ^e quartile	37,9
Vibrisse supérieure	66,3
Max	261
Nombre sites	35
Nombre sites > vibrisse	16

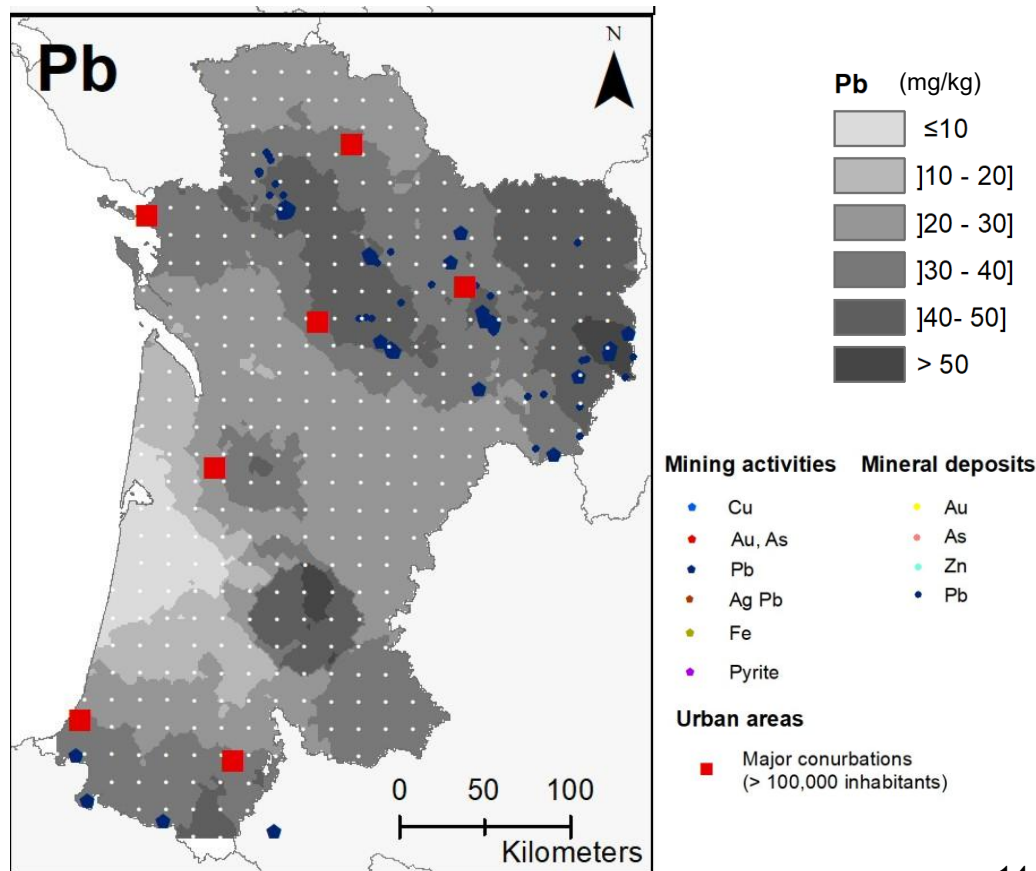
- Médiane nationale : 27,8 mg/kg
- Médiane peu éloignée



Distribution des éléments métalliques dans les sols néo-aquitains

► Spatialisation éléments métalliques : Pb (RMQS-1)

- Concentrations élevées au nord et nord est principalement d'origine géologique et minière
- Les concentrations élevées proche des grands centres urbains seraient vraisemblablement dus à la densité de circulation (essences plombées)
- Phénomène observée et étudié également en Ile de France (cf Saby et al. 2006)



Savignan, Lionel, Alexandre Lee, Alexandra Coynel, et al. 2021.
« Spatial Distribution of Trace Elements in the Soils of South-Western France and Identification of Natural and Anthropogenic Sources ». CATENA 205 (octobre): 105446.

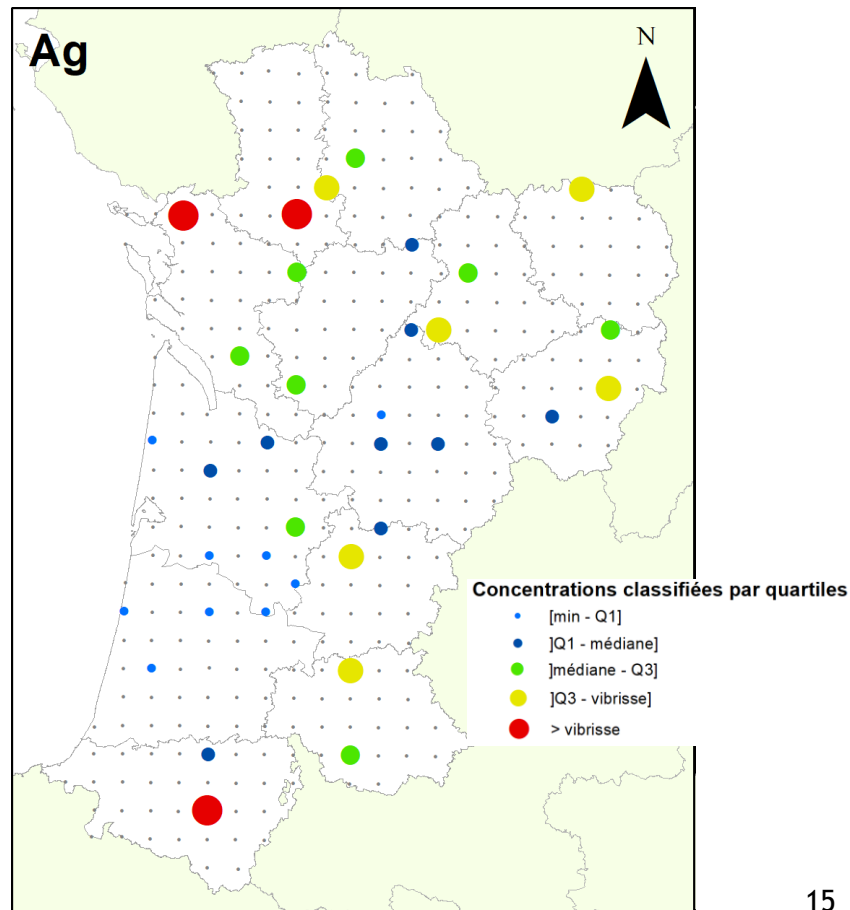
Distribution des éléments métalliques dans les sols néo-aquitains

► Concentration éléments émergents : Ag

Élément	Ag
unité	mg/kg
Min	0,015
1 ^{er} quartile	0,038
Médiane	0,081
3 ^e quartile	0,096
Vibrisse supérieure	0,182
Max	0,222
Nombre sites	35
Nombre sites > vibrisse	3

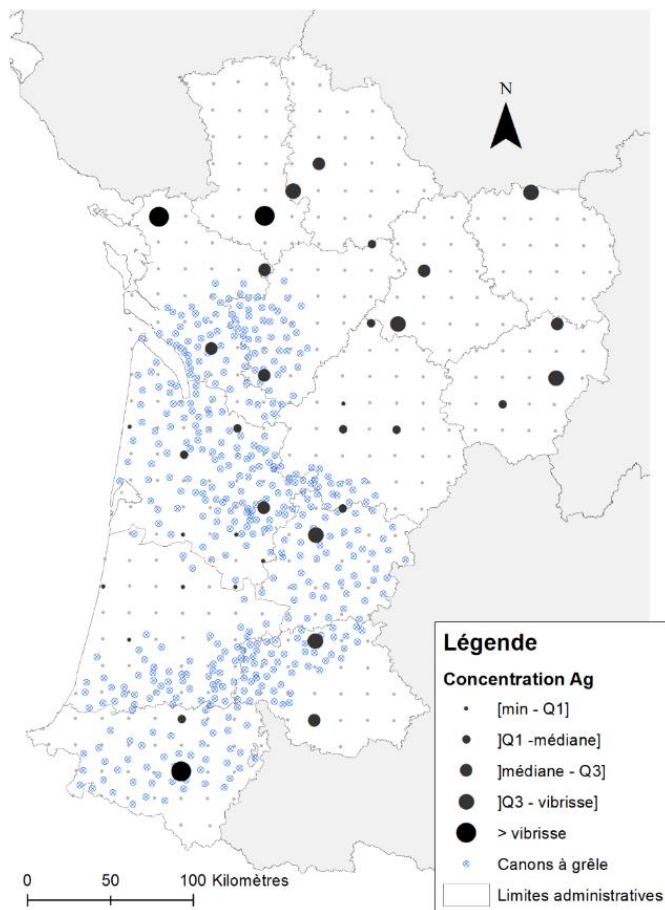
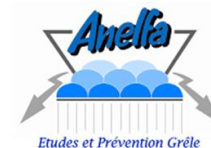
► Abondance croûte terrestre : 0,07 mg/kg

► Médiane peu éloignée



Distribution des éléments trace émergents dans les sols aquitains

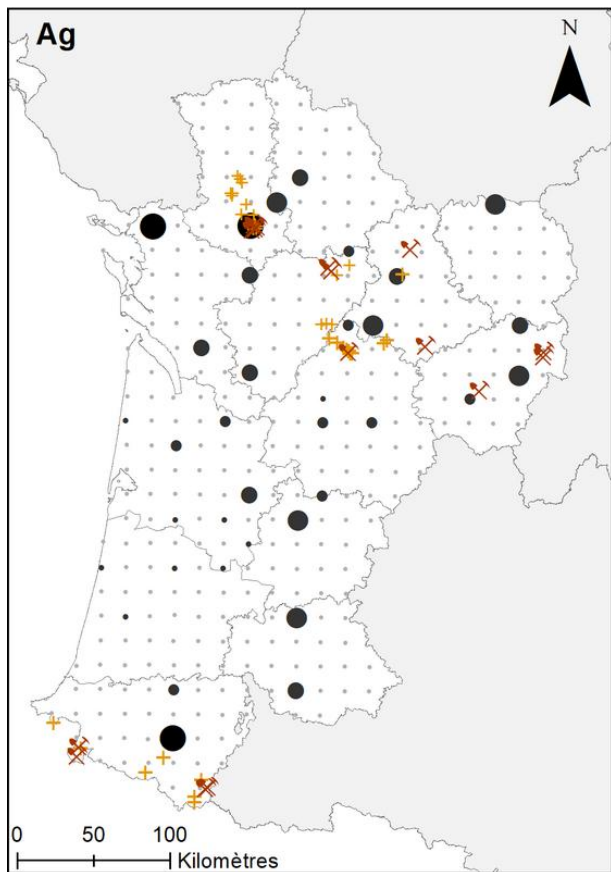
- Origine Ag : pas d'influence notable des canons anti-grêle



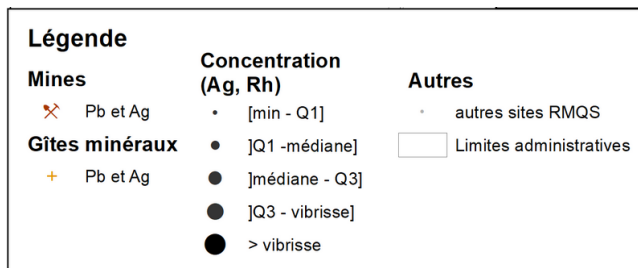
- 450 canons répartis sur la zone d'étude (en 2020)
- Iodure d'argent dispersé dans l'atmosphère
- Quantité Ag consommée : 9 g/L/h
- Portée théorique : 10 km
- Utilisation annuelle variable selon les conditions météorologiques (~30 jours / an)

Distribution des éléments trace émergents dans les sols aquitains

- Origine Ag, Rh : liées à la géologie régionale ?

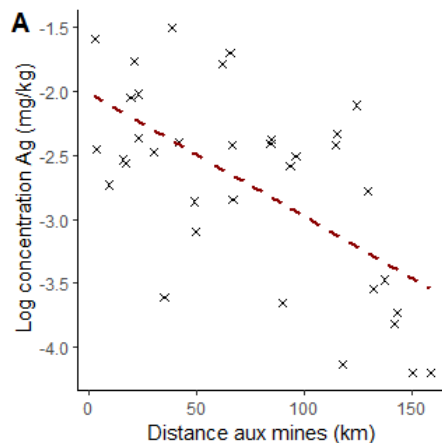


- SIG Mines France (BRGM) : base de données de l'inventaire minier
- la galène ou plomb argentifère (PbS)



Distribution des éléments trace émergents dans les sols aquitains

► Origine Ag : liée aux gisements et mines Pb

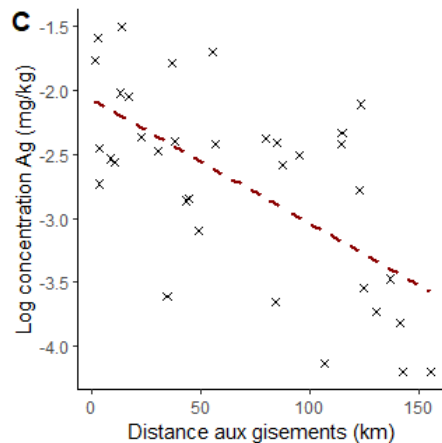


► Modèle exponentiel

► $p < 0,001$ test de Fischer

► Concentration log en fonction de la *Distance aux mines*

► Ag : $R^2 = 0,385$ / $r = 0,62$ / DDL : 33



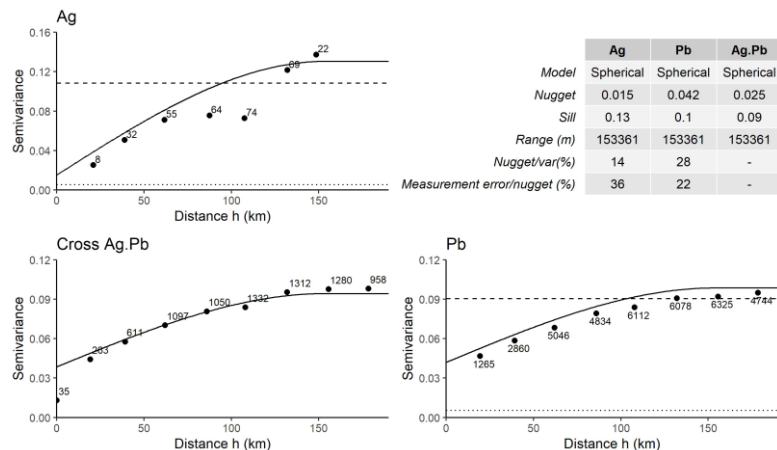
► Concentration log en fonction de la *Distance aux gisements*

► Ag : $R^2 = 0,404$ / $r = 0,64$ / DDL : 33

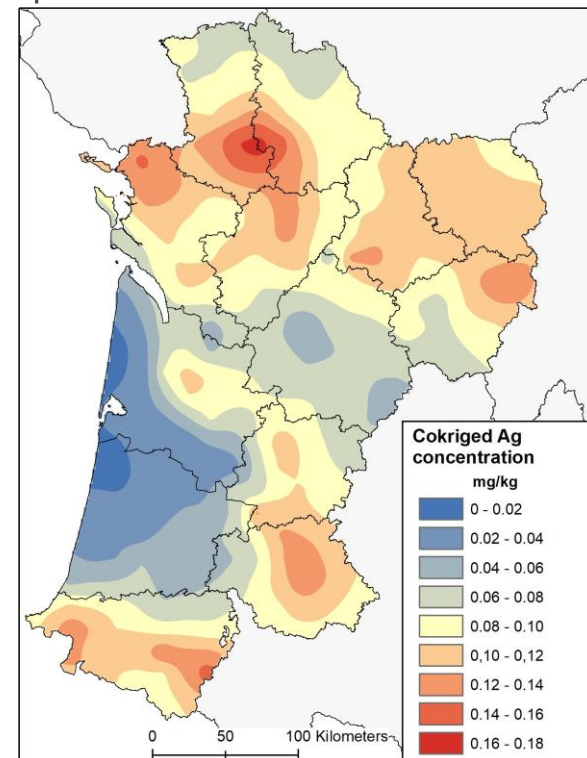
Distribution des éléments métalliques dans les sols néo-aquitains

- Spatialisation de Ag : seulement 35 analyses, comment faire ?
 - Corrélation en Ag et Pb ($r = 0,92$)
 - Utilisation de Pb comme variable secondaire pour estimer les points manquants

- Variogramme croisée Ag - Pb (356 points issu du RMQS-1)



CO-KRIGEAGE



Savignan, Lionel, Stéphane Faucher, Stéphanie Jalabert, Alexandre Lee, Gaëtane Lespes, et Philippe Chéry. 2023. « Silver Origins and Spatial Distribution in Soils of Southwestern France: A First Assessment with Cokriging ». CATENA 224 (mai): 106992.

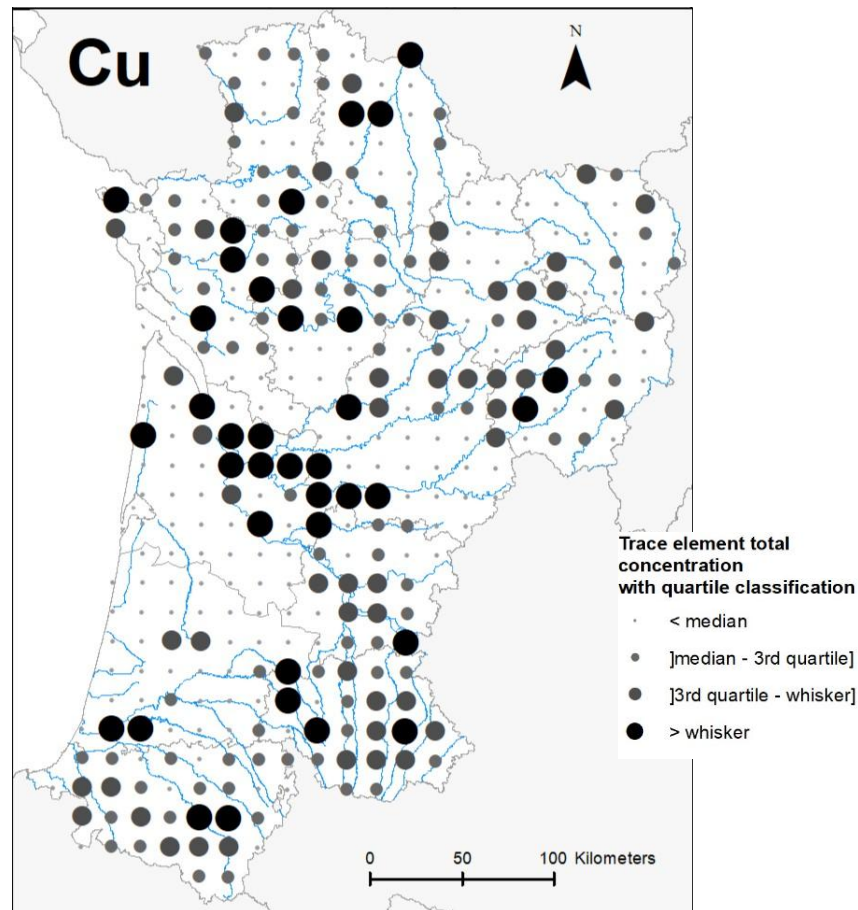
Distribution des éléments métalliques dans les sols néo-aquitains

► Concentration éléments métalliques : Cu (RMQS-1)

Élément	Ag
unité	mg/kg
Min	0,5
1 ^{er} quartile	6,0
Médiane	13,1
3 ^e quartile	22,9
Vibrisse supérieure	48,3
Max	491
Nombre sites	356
Nombre sites > vibrisse	36

► Abondance croûte terrestre : 0,07 mg/kg

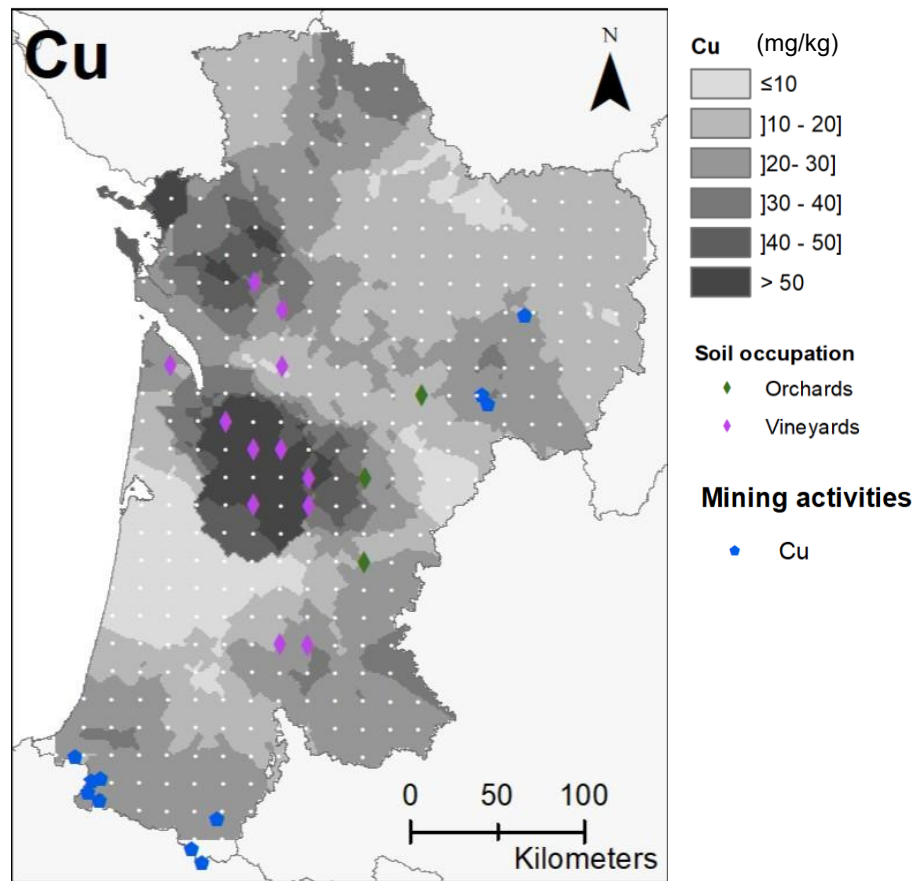
► Médiane peu éloignée



Distribution des éléments métalliques dans les sols néo-aquitains

► Spatialisation éléments métalliques : Cu

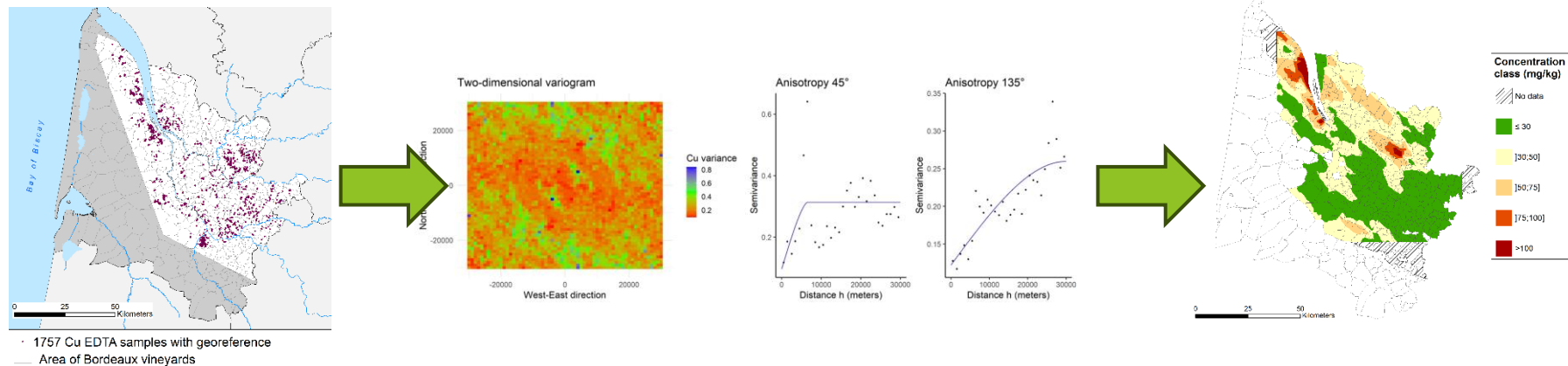
- Concentrations élevées dans les zones viticoles de Gironde et Charente
- Diffusion liée à l'utilisation liée à bouillie bordelaise, utilisée contre le mildiou
- Mais localement la concentration en Cu dépendra de la pression fongique et l'itinéraire technique



Savignan, Lionel, Alexandre Lee, Alexandra Coynel, et al. 2021.
« Spatial Distribution of Trace Elements in the Soils of South-Western France and Identification of Natural and Anthropogenic Sources ». CATENA 205 (octobre): 105446.

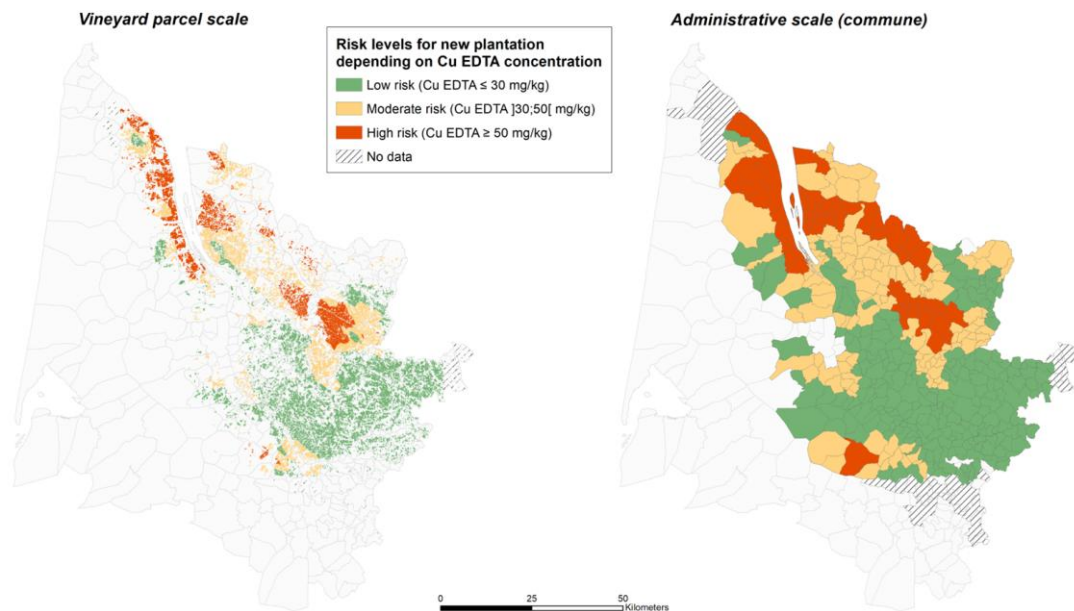
Perspectives sur la contamination en Cu

- Distribution spatiale du Cu (EDTA) à l'échelle de la zone viticole bordelaise
 - Base de données de 4496 horizons de sols (dont 2191 avec une mesure de Cu EDTA)
 - Développement de fonctions de pédotransferts pour estimer Cu EDTA (modèles linéaires et « machine learning »)
 - Analyse géostatistiques et krigeage



Perspectives sur la contamination en Cu

- Distribution spatiale du Cu (EDTA) à l'échelle de la zone viticole bordelaise
 - Croisement avec occupation du sol et seuils de risque pour la replantation



- 50 % de la surface en viticulture en risque modéré à fort (selon les seuils choisis)
- Les valeurs les plus élevées sont associées aux appellations les plus anciennes et prestigieuses



Limitation des résultats du aux erreurs de modélisations, données manquantes,...

Merci pour votre attention

