



# Les activités enzymatiques : de nouveaux indicateurs pour évaluer la santé des sols ?

Christian Mougin, Erell Naslain, Françoise Poiroux, Jean-Pierre Pétraud, Amélie Trouvé, Thérèse de Caldas, Pierre Gosseume, Axelle de Pauw, UMR ECOSYS  
Matthieu Valé, Auréa AgroSciences  
Alexandre Wadoux, UMR LISAH  
Nicolas Saby, UR Info&Sols

Adebiotech, 25 juin 2025

# Contexte

- Des indicateurs fiables, mesurables et interprétables sont nécessaires pour évaluer le fonctionnement des sols, leur santé, et assurer les actions pour leur protection et leur gestion (ADEME Bioindicateurs)
  - Les activités enzymatiques, majoritairement exprimées par les microorganismes des sols, sont des indicateurs biochimiques mesurés depuis des dizaines d'années
  - Mais :
    - Les méthodes de mesure ont évolué et diffèrent en de nombreux points : validation ?
    - Les résultats sont exprimés sous différentes unités : comparaison ?
    - On ne compare souvent que des traitements parcellaires entre eux : référentiel ?
- Les activités enzymatiques sont-elles des indicateurs pertinents pour évaluer la santé des sols ?

# Notre stratégie

- 1. Considérer des descripteurs en lien avec les fonctions écologiques**
- 2. Offrir des méthodes sensibles, reproductibles, utilisables en routine > grand nombre de mesures à bas coût**
- 3. Construire des référentiels et lien avec les fonctions du sol > diagnostic**
- 4. Développer des outils d'interprétation > conseil**

# 1. Une palette d'activités enzymatiques mesurables

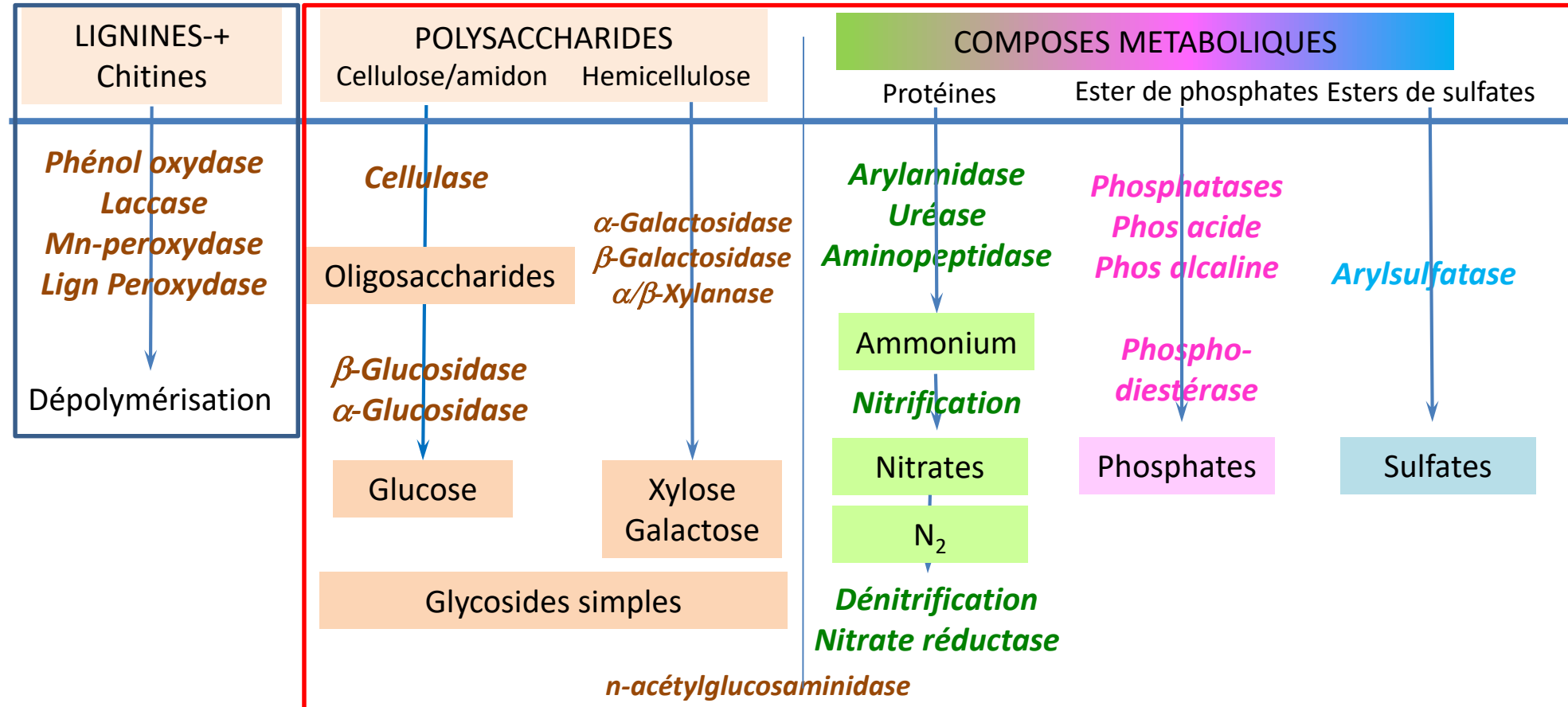
Carbone **C**

Azote **N**

Phosphore **P**

Soufre **S**

## MATIERES ORGANIQUES



## METABOLISME GENERAL

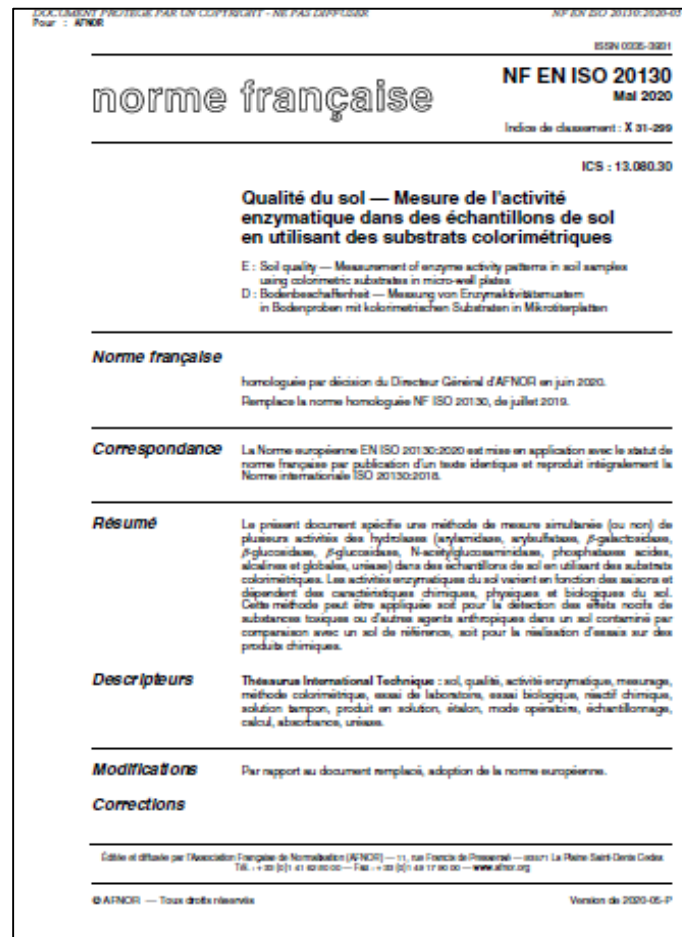
Deshydrogénase  
 Hydrolyse FDA  
 Microrespiration

# 1. Des activités en lien avec les fonctions écologiques des sols

|            |                                                                                                                       |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>F1</b>  | Régulation des échanges gazeux                                                                                        |
| <b>F2</b>  | Dissipation des contaminants dans les écosystèmes terrestres et aquatiques                                            |
| <b>F3</b>  | Résistance aux perturbations                                                                                          |
| <b>F4</b>  | Rétention d'eau dans les sols et les sédiments                                                                        |
| <b>F5</b>  | Régulation des flux d'eau                                                                                             |
| <b>F6</b>  | Albédo et réflexion                                                                                                   |
| <b>F7</b>  | Production et apport de matière organique dans les écosystèmes terrestres et aquatiques                               |
| <b>F8</b>  | Régulation des cycles de nutriments dans les écosystèmes terrestres et aquatiques                                     |
| <b>F9</b>  | Formation et maintien de la structure des sols et des sédiments                                                       |
| <b>F10</b> | Dispersion des propagules dans les écosystèmes terrestres et aquatiques                                               |
| <b>F11</b> | Fourniture et maintien de la biodiversité et des interactions biotiques dans les écosystèmes terrestres et aquatiques |
| <b>F12</b> | Fourniture et maintien des habitats et biotopes dans les écosystèmes terrestres et aquatiques                         |



- Régulation des flux de nutriments
- Dissipation des contaminants
- Régulation des échanges gazeux
- Structure des sols



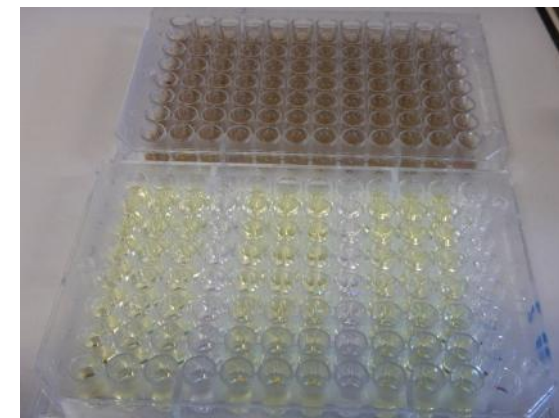
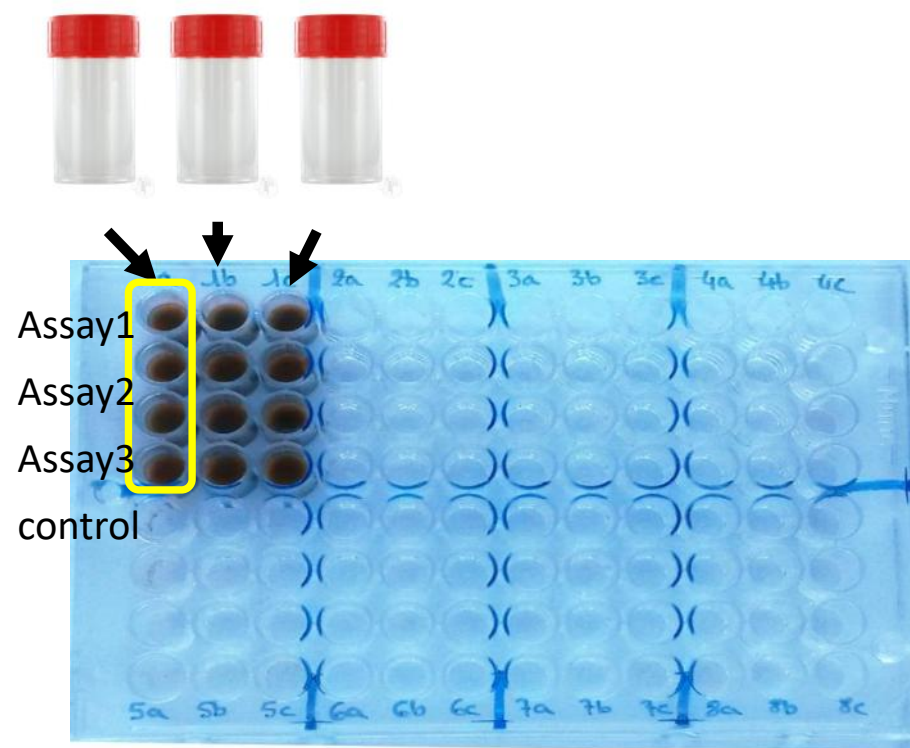
- 



**afnor**  
NORMALISATION

- p. 6

## 2. Des méthodes de mesure automatisables



### 3. Des référentiels de données au niveau national

- **Depuis 2013, plus de 10000 échantillons de sols ont été analysés**
  - **Grands programmes : (Bioindicateurs), GISSOL RMQS, PIA AGRO-ECO SOL, INRAE SysSols, OFB Indigualsols...**
  - **Suivi de sites expérimentaux : SOERE PRO (Efele, Qualiagro, La Mare), ACBB...**
  - **Unités expérimentales INRAE...**
- **Des référentiels en cours de développement avec près de 75000 données (analyses) : localisation, physico-chimie, occupation du sol, pratiques agricoles...**

### 3. Exemple du RMQS2

- Depuis 2016, plus de 1500 points analysés pour 10 activités enzymatiques (RMQS2 et biodiversité)

|           |                 | Arable crop | Meadow     | Vineyard and orchard | Forest     | Natural media | Wasteland | Parc and garden | Fallow   | MIN  | MEDIAN | MAX    |
|-----------|-----------------|-------------|------------|----------------------|------------|---------------|-----------|-----------------|----------|------|--------|--------|
|           | <b>Total NB</b> | <b>591</b>  | <b>350</b> | <b>45</b>            | <b>396</b> | <b>49</b>     | <b>12</b> | <b>1</b>        | <b>4</b> |      |        |        |
| 2016-2024 | <b>HUM</b>      | 17,75       | 20,70      | 13,06                | 19,72      | 20,52         | 12,26     | 9,11            | 13,70    | 1,00 | 18,81  | 69,04  |
|           | <b>PHOS</b>     | 39,26       | 80,93      | 24,17                | 66,45      | 91,97         | 31,49     | 51,50           | 39,01    | 0,22 | 48,06  | 474,81 |
|           | <b>GLU</b>      | 15,82       | 21,24      | 12,12                | 14,50      | 22,58         | 13,45     | 6,28            | 12,07    | 0,04 | 14,43  | 89,00  |
|           | <b>ARS</b>      | 6,74        | 19,23      | 4,13                 | 16,91      | 18,39         | 4,53      | 1,03            | 6,18     | 0,00 | 7,89   | 162,66 |
|           | <b>URE</b>      | 8,34        | 12,04      | 7,50                 | 10,94      | 10,00         | 8,81      | 0,16            | 8,41     | 0,00 | 8,98   | 39,80  |
|           | <b>ARN</b>      | 9,27        | 11,91      | 12,53                | 6,84       | 6,97          | 18,21     | 2,58            | 14,48    | 0,00 | 6,19   | 69,72  |
| 2018-2024 | <b>PAK</b>      | 33,27       | 54,68      | 22,99                | 36,61      | 46,17         | 38,95     | 10,24           | 33,39    | 0,00 | 30,59  | 317,05 |
|           | <b>PDE</b>      | 13,13       | 18,02      | 8,07                 | 14,15      | 14,02         | 14,43     | 1,42            | 16,57    | 0,02 | 10,15  | 120,22 |
|           | <b>aGLU</b>     | 3,78        | 4,63       | 2,44                 | 3,19       | 3,38          | 4,04      | 1,81            | 2,90     | 0,00 | 3,05   | 23,88  |
|           | <b>GAL</b>      | 2,12        | 3,39       | 1,53                 | 2,43       | 3,77          | 1,55      | 1,51            | 3,77     | 0,01 | 2,19   | 18,06  |
|           | <b>NAG</b>      | 4,60        | 9,50       | 4,29                 | 8,84       | 10,51         | 2,95      | 4,15            | 3,24     | 0,04 | 5,64   | 57,03  |

- En cours RMQS outre-mer

Mougin Christian, Cheviron Nathalie, Naslain Erell, Poiroux Françoise, Gosseaume Pierre, 2024. Preliminary mean, minimal, median and maximal values of enzymatic activities in french soils from the RMQS2 (2016-2024 period) sampled from 0 to 20 cm.

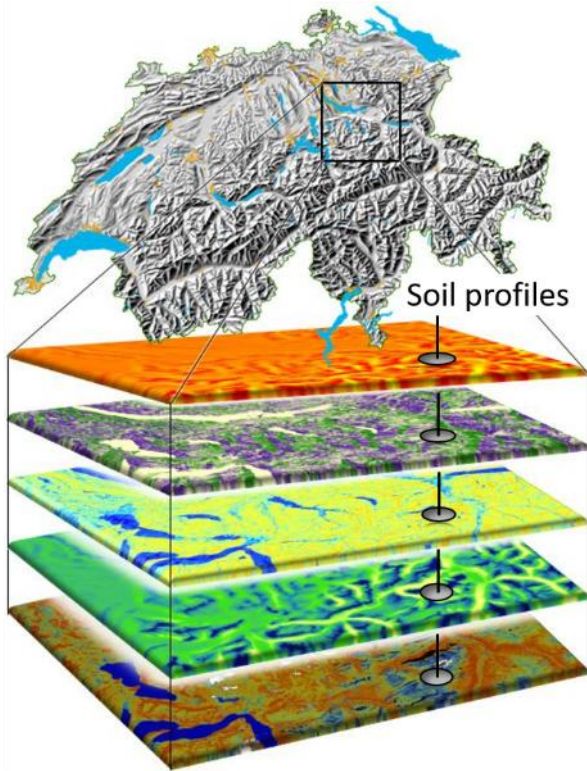
13 nov. 2024



Mougin, Christian; Cheviron, Nathalie; Naslain, Erell; Poiroux, Françoise; Gosseaume, Pierre, 2024, "Mougin Christian, Cheviron Nathalie, Naslain Erell, Poiroux Françoise, Gosseaume Pierre, 2024. Preliminary mean, minimal, median and maximal values of enzymatic activities in french soils from the RMQS2 (2016-2024 period) sampled from 0 to 20 cm.", <https://doi.org/10.57745/SDTD9U>, Recherche Data Gouv, V1

The files provide preliminary mean, median, minimum and maximum values for enzyme activities measured in soil samples taken between 0 and 20 cm, over the period 2016-2024, as part of RMQS2, according to land use type. Measurements were carried out in accordance with ISO20130:2018...

# 4. Cartographie des Sols par Modélisation Statistique



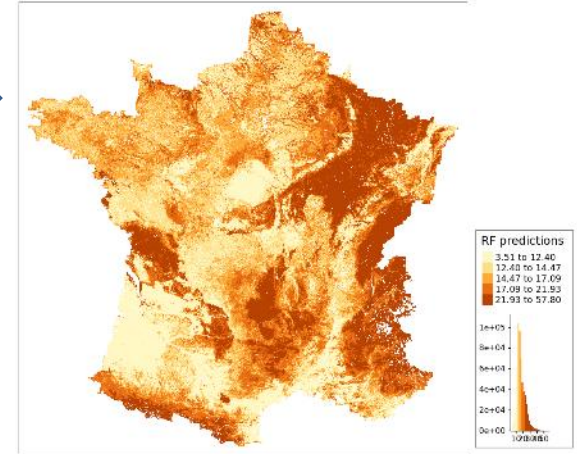
Intel. Art  
Random forest

Prédictions  
spécialisées avec  
intervalle de confiance

Sélection de  
variables

Calibration et réglage  
de l'IA

Validation croisée

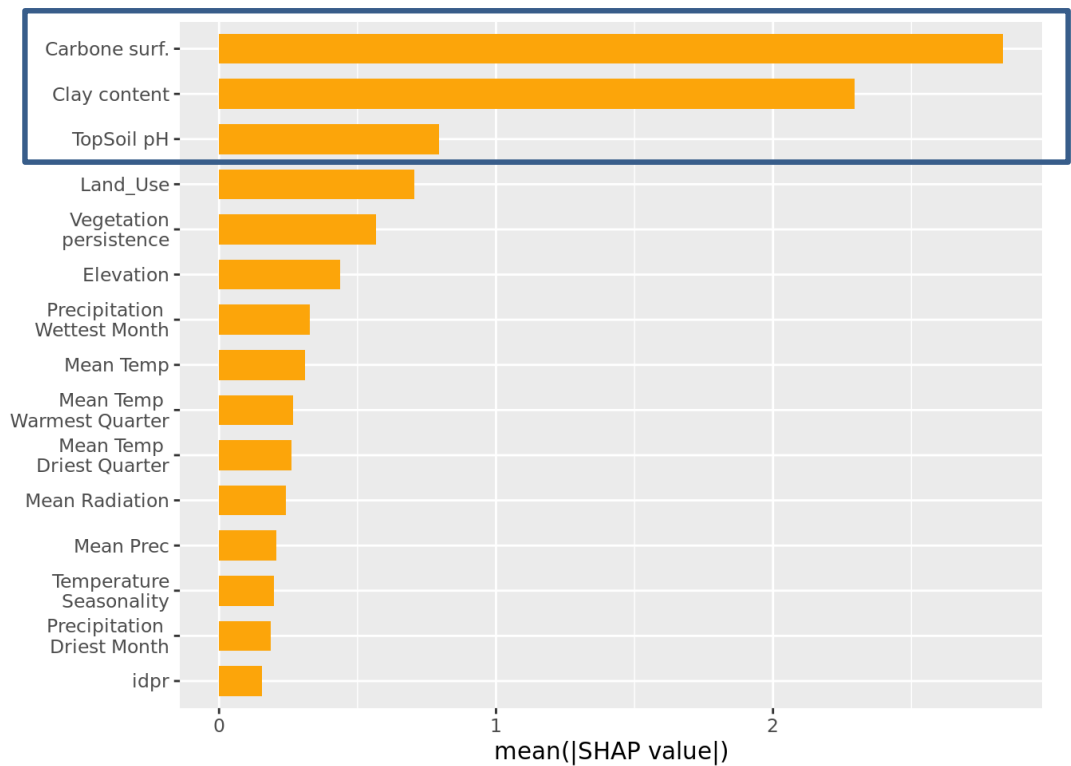


Shapley:  
Comprendre  
comment le  
modèle réalise les  
prédictions

S: Soil legacy data C: Climate O: Organism, Vegetation  
R: Relief P: Parent material, lithology

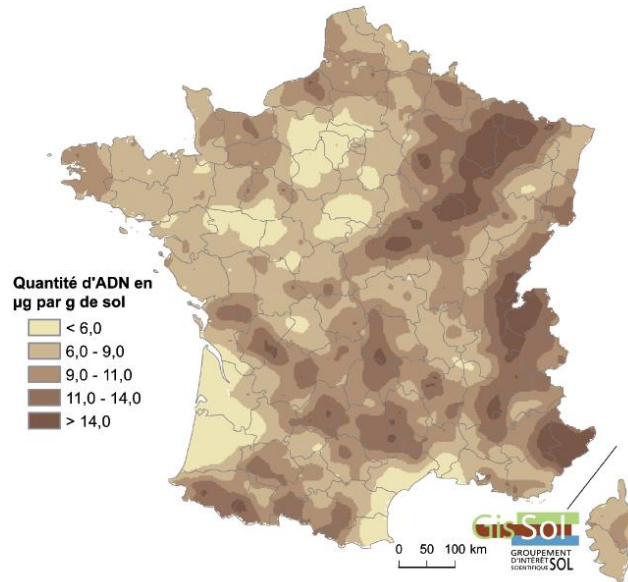
<https://www.wsl.ch/en/projects/high-resolution-soil-maps-for-the-swiss-forest/>

# 4. Exemple de la $\beta$ -glucosidase : l'influence des covariables



## 4. Des concordances

**Biomasse microbienne**



**GisSol**

**INRAE**

**$\beta$ -glucosidase**



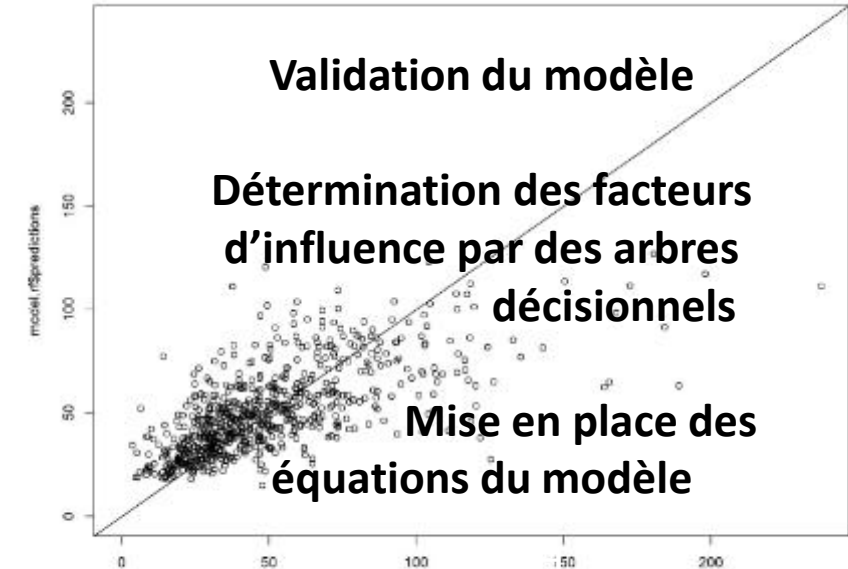
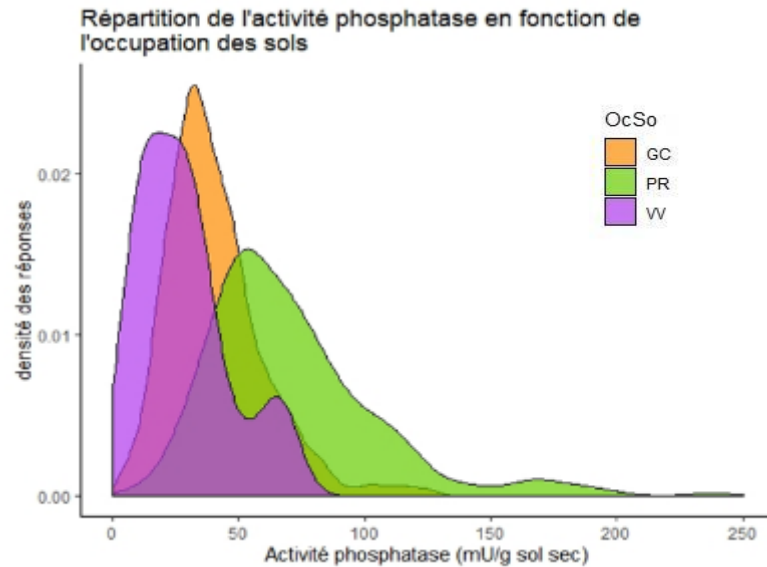
**Phosphatase**



### 3 déterminants majeurs

- Teneur en carbone
- Teneur en argile
- pH

## 4. Vers des outils de diagnostic

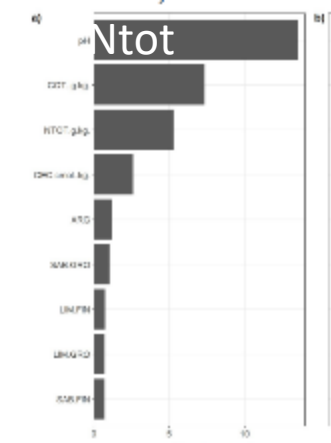


### Proposition de diagnostic

Valeur théorique calculée



Valeur mesurée



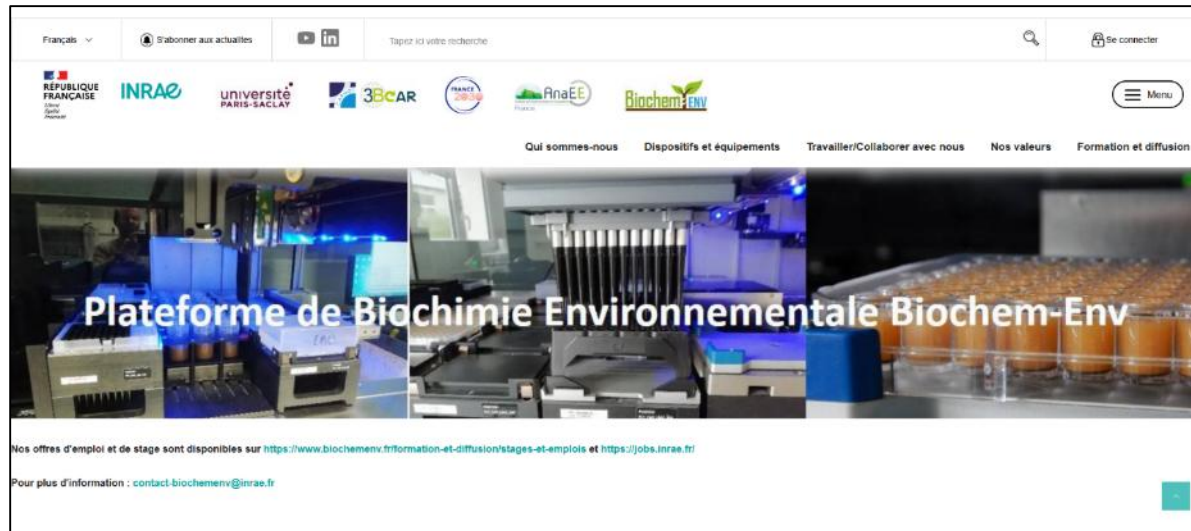
INRAE

# Conclusions

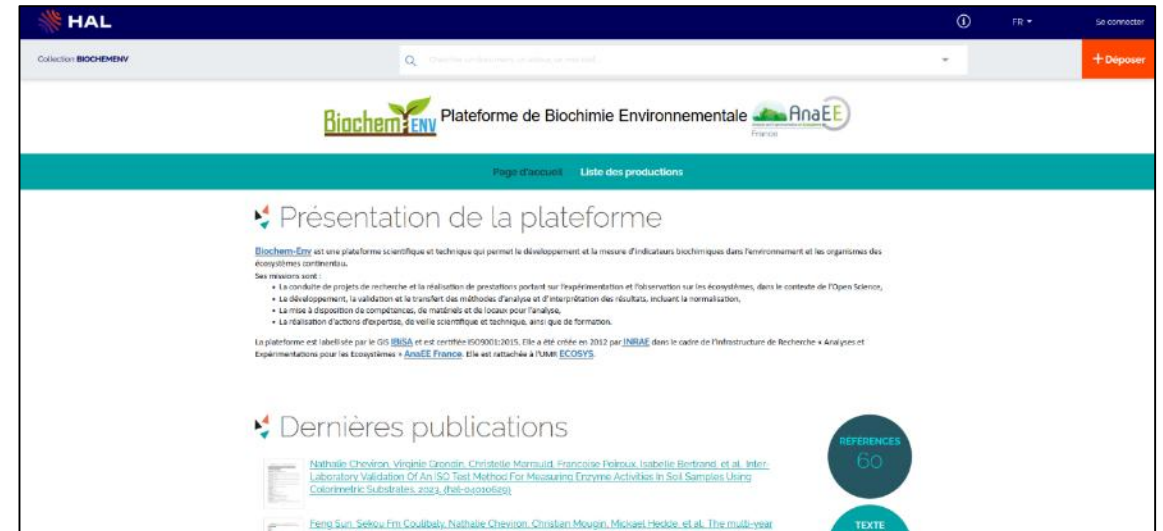
- **Les activités enzymatiques sont des indicateurs pertinents de la santé des sols (méthodes, référentiels, outils de diagnostic...)**
- **Elles viennent compléter, pour les aspects fonctionnels, la batterie d'indicateurs actuellement disponibles**
- **Données et métadonnées restent un vaste champ d'investigation !**

# Pour en savoir plus

<https://www.biochemenv.fr/>



<https://hal.inrae.fr/BIOCHEMENV/>





**Merci pour votre attention !**

[contact-biochemenv@inrae.fr](mailto:contact-biochemenv@inrae.fr)



Biochem-Env



**Merci à Nathalie Cheviron !**