

# JOURNÉE TECHNIQUE : RENATURER LES SOLS EN MILIEU URBAIN : C'EST POSSIBLE !

Avec quelle connaissance ? Quels diagnostics ?

Pierre-Alain MARON – Directeur de recherche – INRAE

Quentin VINCENT – Directeur Technique – EODD

**Mardi 1<sup>er</sup> avril 2025**

Académie du Climat - Paris

# Renaturation des sols urbains à l'échelle opérationnelle. Avec quelle connaissance? Quels diagnostics?

Maron Pierre-Alain & Lionel Ranjard

UMR Agroécologie

Institut Agro Dijon et INRAE Dijon



Agroécologie  
Dijon  
Unité de Recherche

INRAE

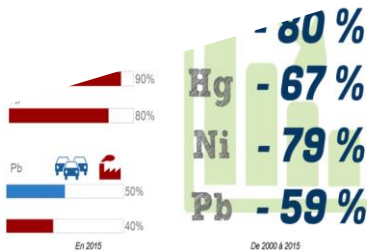
L'INSTITUT  
agro Dijon

# Contexte sociétal



## Dégradation de la qualité de vie en milieu urbain (santé physique et psychologique)

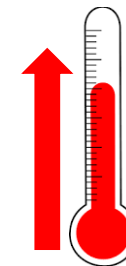
75 % des émissions de CO<sub>2</sub> totales  
(Marcotullio et al., 2013)



Importants niveaux de contamination en métaux lourds  
(Béchet et al., 2009)



Changements hydrologiques (ruissellement)  
(Erhenfeld, 2000)



Augmentation de la température en ville (ICU) et de surface  
(Oke et al., 1995)





# Contexte sociétal

Transition vers des modèles de « ville durable »



Retour de la nature en ville



## LE SOL :



Simple support  
inerte de  
production

➔ Principal support de la nature en ville et levier mobilisable pour :

- Améliorer la santé humaine et aspect récréatif
- Réduire l'empreinte environnementale
- Développer l'agriculture urbaine

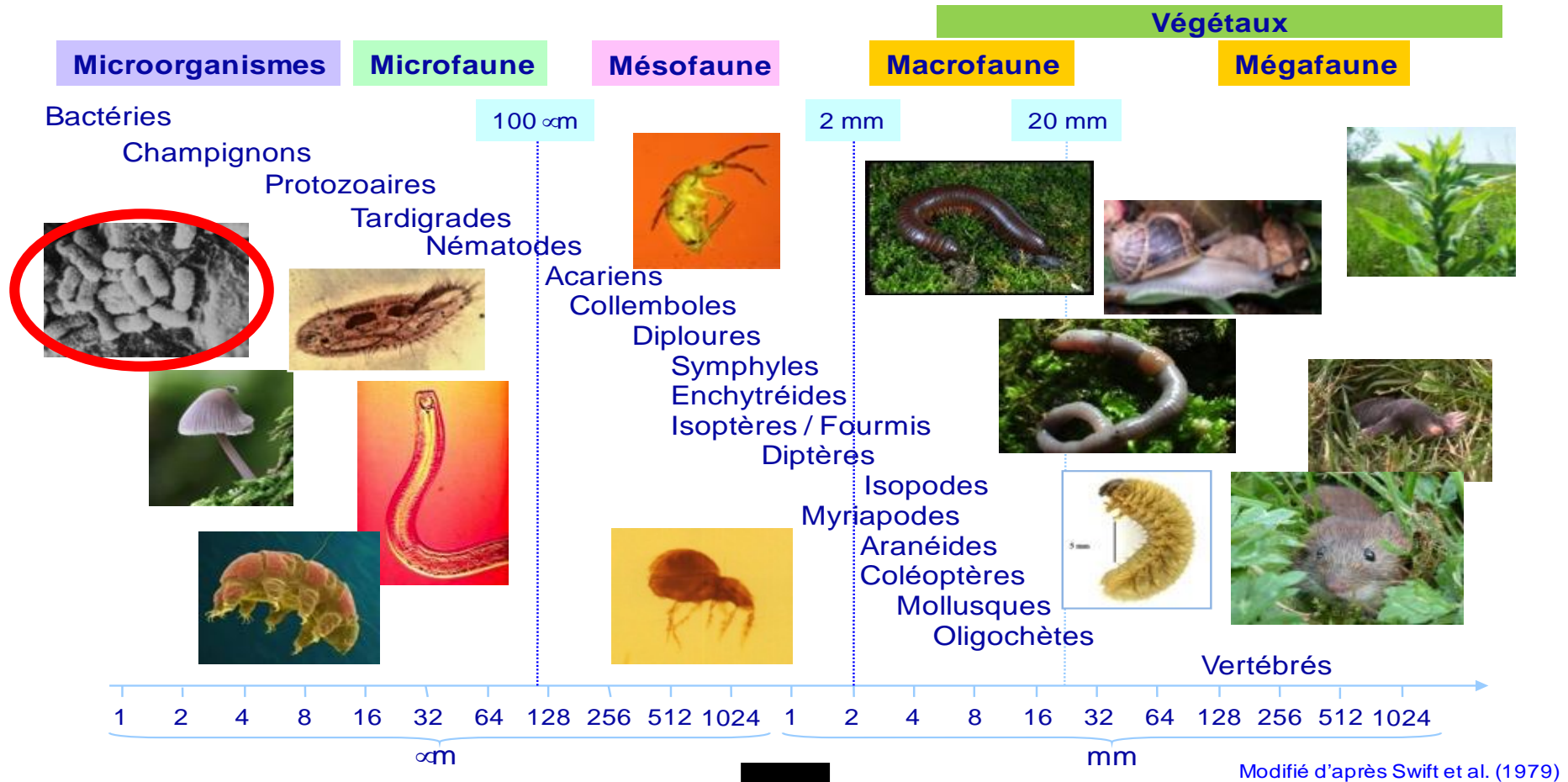


Ecosystème avec un **patrimoine biologique**  
à même de rendre des **services** pour les sociétés humaines



Sol et biodiversité = Bras de levier  
pour le retour de la nature en ville

# La biodiversité du sol



**30% de la biodiversité totale  
10% des espèces connues !**



# Un patrimoine microbiologique gigantesque !

*Plus de microorganismes dans 1m<sup>2</sup> de sol que d'étoiles dans le ciel ! (H Reeves)*

Enorme abondance et diversité



10<sup>9</sup> bactéries  
10<sup>6</sup> espèces



**SOL**

10<sup>6</sup> champignons  
10<sup>3</sup> espèces



**= Réservoir de diversité microbienne de notre planète  
= patrimoine naturel**



**1.5 tonnes/ha**

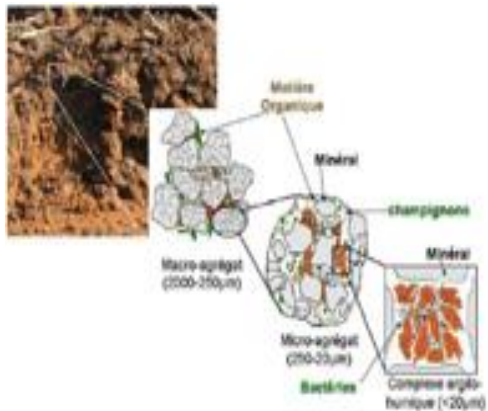
**3.5 tonnes/ha**

**≈ 10 UGB!!**

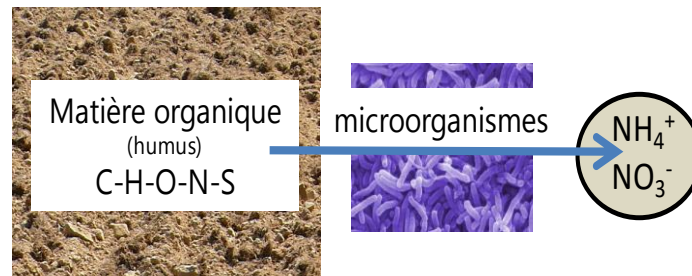


# Les microorganismes du sol: Acteurs du fonctionnement du sol

⇒ Implication dans de nombreuses fonctions d'intérêt pour le retour de la nature en ville



Structuration du sol



Minéralisation matière organique, recyclage carbone, nutriments



Dépollution du sol



Lutte contre pathogènes

# Illustration: lien diversité microbienne – stabilité structurale du sol



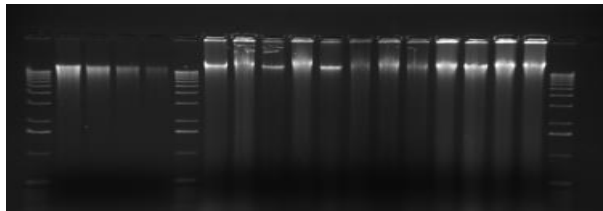


# Comment mesure-t-on l'abondance et la diversité microbienne des sols?



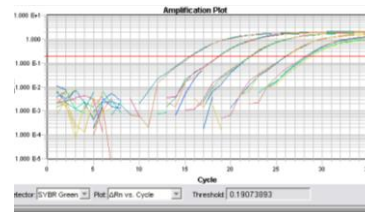
**De nouveaux outils: l'écologie moléculaire**  
Métagénome du sol = Ensemble des génomes de tous les micro-organismes

**Quantité d'ADN dans le sol**



**Biomasse moléculaire microbienne**  
**BIOMASSE MICROBIENNE**

**PCR quantitative**



**Densité microbienne**  
**Ratio champignons/bactéries**

**Séquençage**



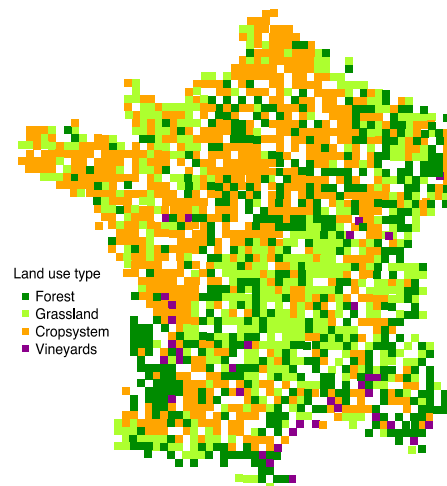
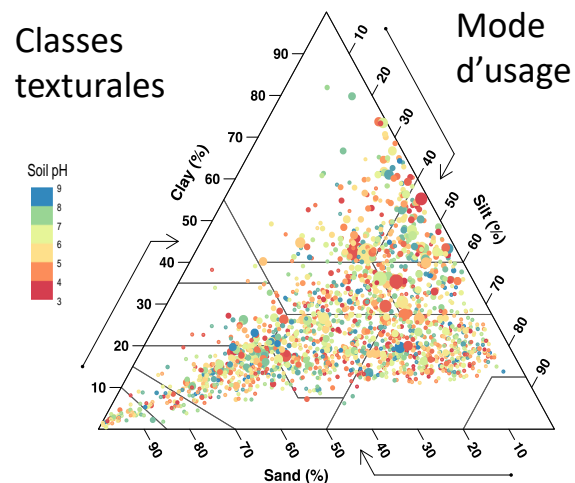
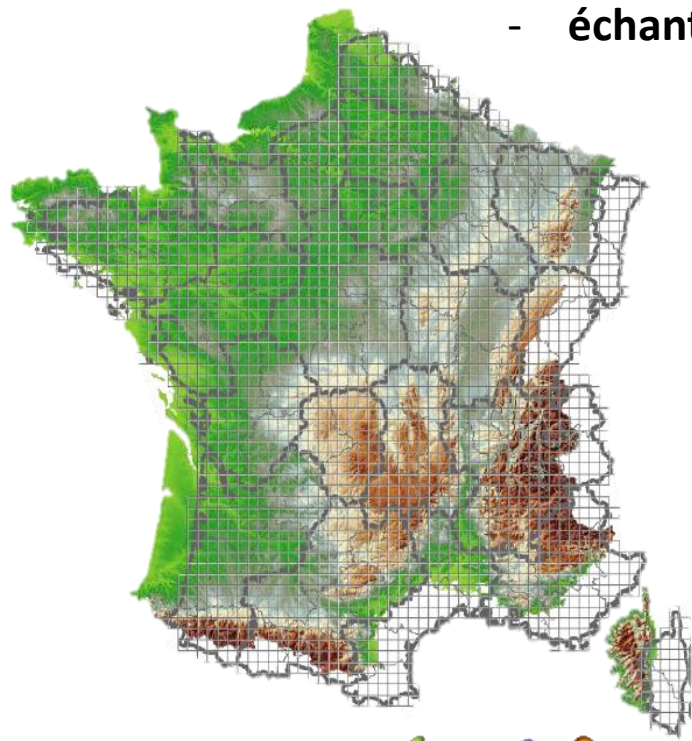
**Indices de diversité et inventaire des espèces**  
**DIVERSITÉ MICROBIENNE**  
**IDENTIFICATION DES ESPÈCES**

# Le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, une opportunité stratégique!



RMQS

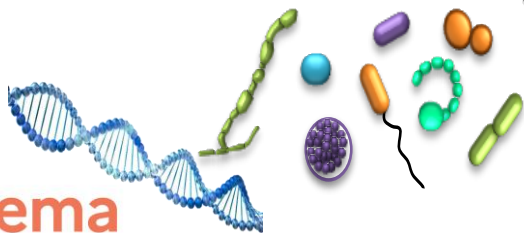
- mis en place en 2002 par l'INRA
- échantillonnage des sols français sur une grille de 16 x 16 km  
→ 2200 sites



Grande variabilité de types de sols et de modes d'usage



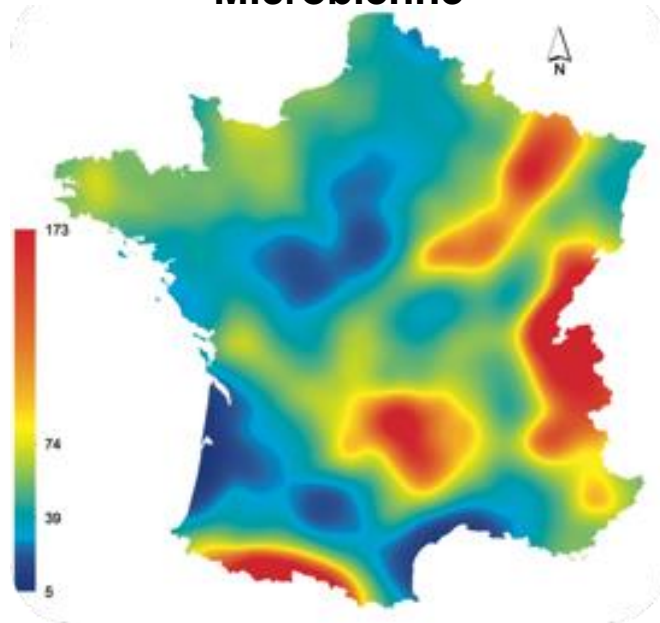
Application d'outils de microbiologie moléculaire  
Abondance, diversité des communautés microbiennes  
**Biogéographie Microbienne**



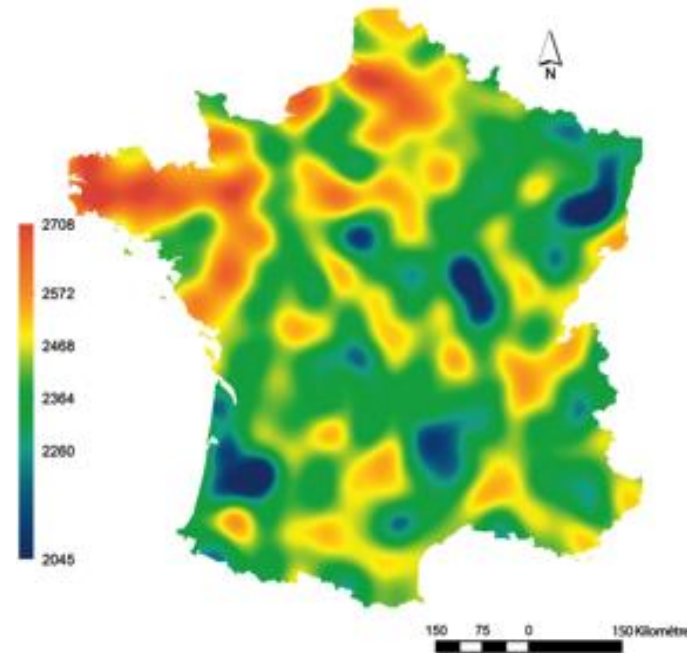


# *La France, 1er pays au monde à avoir des cartographies nationales de la microbiologie des sols*

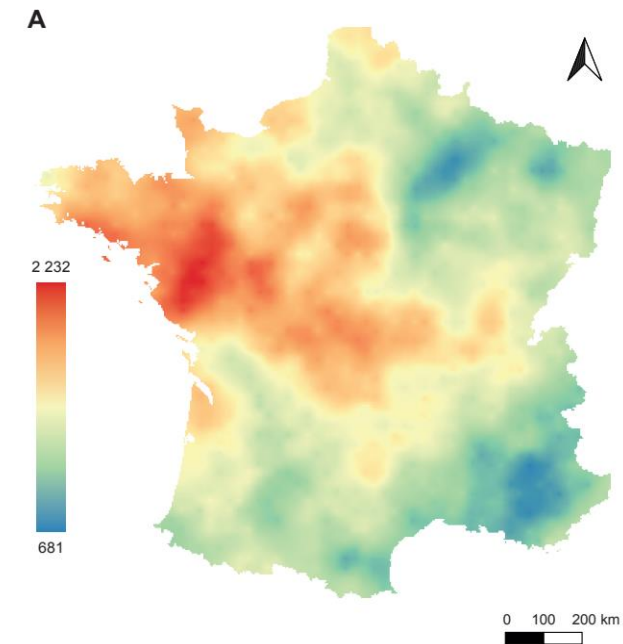
**Biomasse Moléculaire  
Microbienne**



**Diversité bactérienne**



**Diversité Champignons**



**Pas de sols morts !  
Mais des sols plus ou moins vivants !**

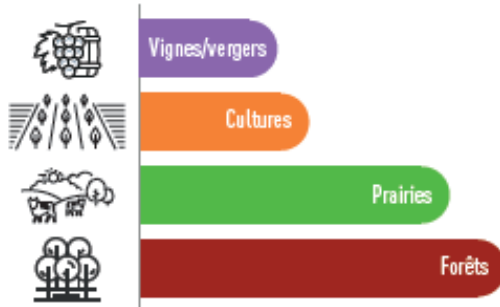
# Des causes naturelles et moins naturelles !

## Abondance des microorganismes

### Effet sol



### Effet mode d'usage

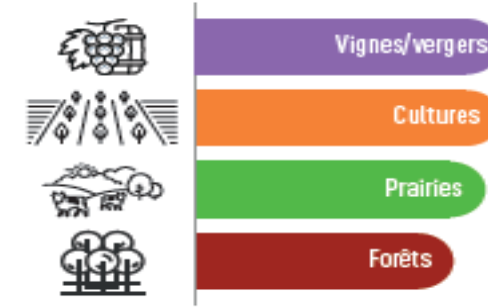


## Diversité bactérienne

### Effet sol



### Effet mode d'usage

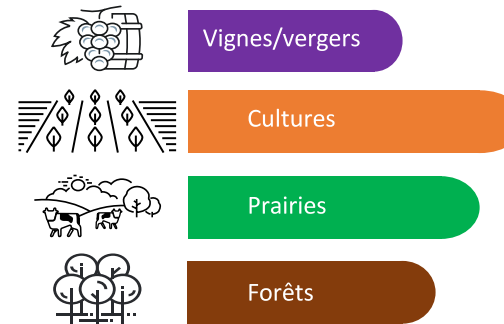


## Diversité champignons

### Effet sol



### Effet mode d'usage





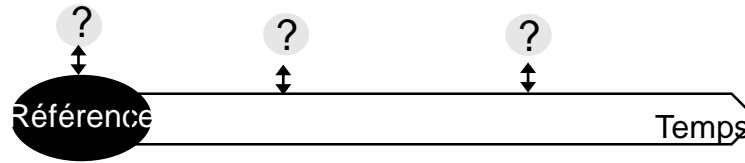
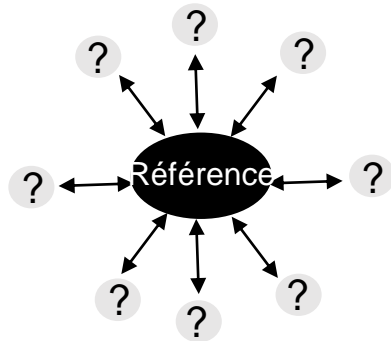
# Des outils de recherche qui deviennent des indicateurs



## Les bases du diagnostic

**I. Détection**  Permet un diagnostic  
 Se limite à une sortie binaire de type "présence/absence"

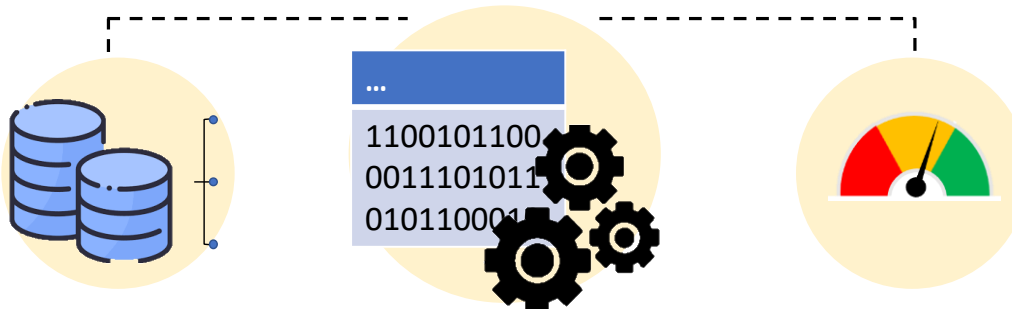
**II. Dire d'expert**   Permet un diagnostic  
 Repose sur l'expérience  
 Peut changer en fonction des experts !



**III. Comparatif**

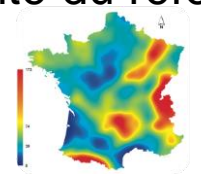


 Permet un diagnostic  
 Quid de l'état de la référence ??

**IV. Référentiel**

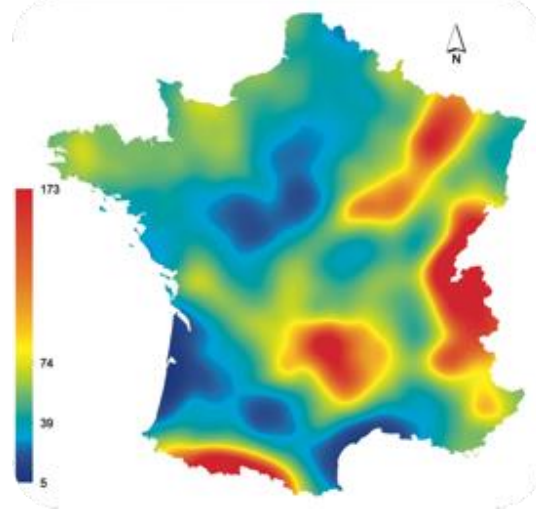


 Diagnostic objectif et générique  
 Dépend de la qualité du référentiel



# Des outils de recherche qui deviennent des indicateurs

## Abondance microbienne



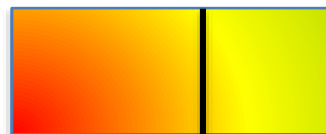
« Indicateur national sol »



Modèle  

$$Y = \beta_0 + \sum (\beta_j X_j + \epsilon_j)$$

Diagnostic qualité  
 Seuil critique  
 (-30% VR)



## LA MICROBIOLOGIE MOLÉCULAIRE AU SERVICE DU DIAGNOSTIC ENVIRONNEMENTAL

OCTOBRE  
 2017

Ouvrage coordonné par  
 L. Ranjard, P.-A. Maron,  
 P. Cuny et E. d'Oiron Verame



les sols

al sol »



# Le projet ProDij (Territoire d'Innovation)



DIJON ALIMENTATION DURABLE 2030  
Mieux produire | Mieux manger

- Food Légumineuses (I)
- Feed Légumineuses (I)

- Accompagnement transition (S)
- Consom'acteur, santé et territoire (S)
- Perception usagers (S)
- Foodle (I)
- Bruges II (I)

- Sols expert (S)
- Sols mutation (S)
- Seeds (I)

Plateforme Ferments (I)

**Impact sur la  
qualité des  
Sols**



- Ressources génétiques légumineuses (S)

Compétences formation (S)

Label DijonAgroécologie (S)

Open Food System (S)

Plateforme Data alimentation (I)

- Aliments sains pour tous (S)
- Foodintech 2 (S)
- Prog. Malin (S)

Observatoire (S)

- Restauration hors foyer durable (S)
- Via Terroirs (S)

Living Lab (S)

Kura (I)



# Action Sols Expert

## Objectif

Diagnostiquer de façon exhaustive la qualité physique, chimique et biologique des sols de l'aire urbaine de Dijon Métropole

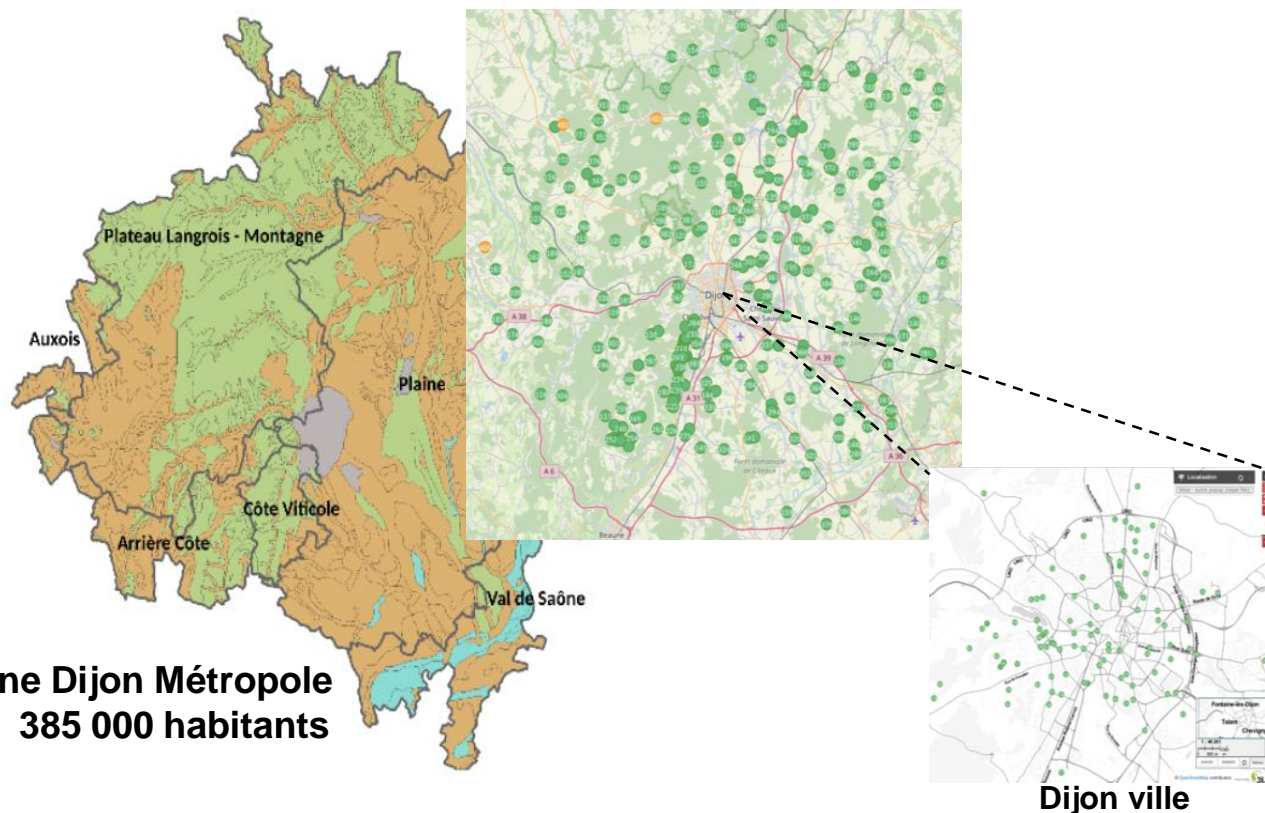


Tableau de bord d'indicateurs



# Le tableau de bord d'indicateurs ProDij



Densité apparente  
Stabilité structurale



Teneur en C, N  
Eléments nutritifs (N,P,K)  
pH, texture  
**Stabilité/stock de carbone**  
Polluants organiques/chimiques

Chimique

physique

Biologique

Tableau de  
bord  
indicateurs



## Macrofaune

- Vers de terre
- Autre macrofaune

## Mésafaune

- collemboles

## Microfaune

- Nématodes

## Microorganismes

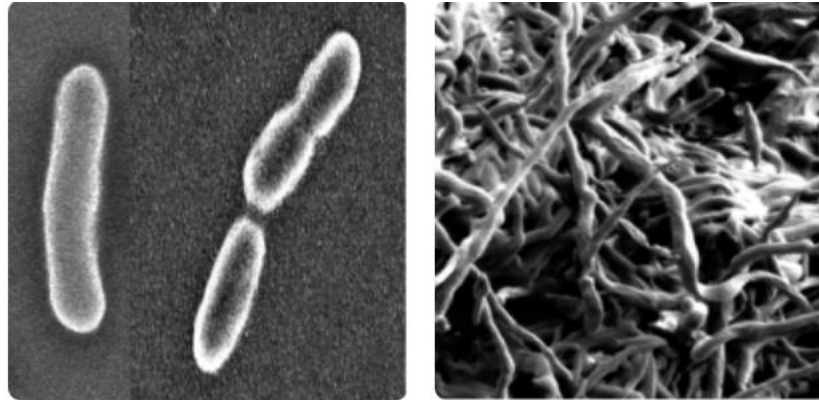
- Bactéries
- Champignons



Diagnostic robuste de la qualité écologique des sols de la métropole !

Renaturation des sols urbains à l'échelle opérationnelle.  
Avec quelle connaissance? Quels diagnostics?

# Diagnostic microbiologique des sols urbains de Dijon Métropole





# Échantillonnage urbain: typologie des espaces

## Accompagnement de voirie

Voirie tramway



Bords de route



Ronds-Points



## Sites récréatifs

Prairies



Ecoles



Parcs



Squares



## Agriculture urbaine

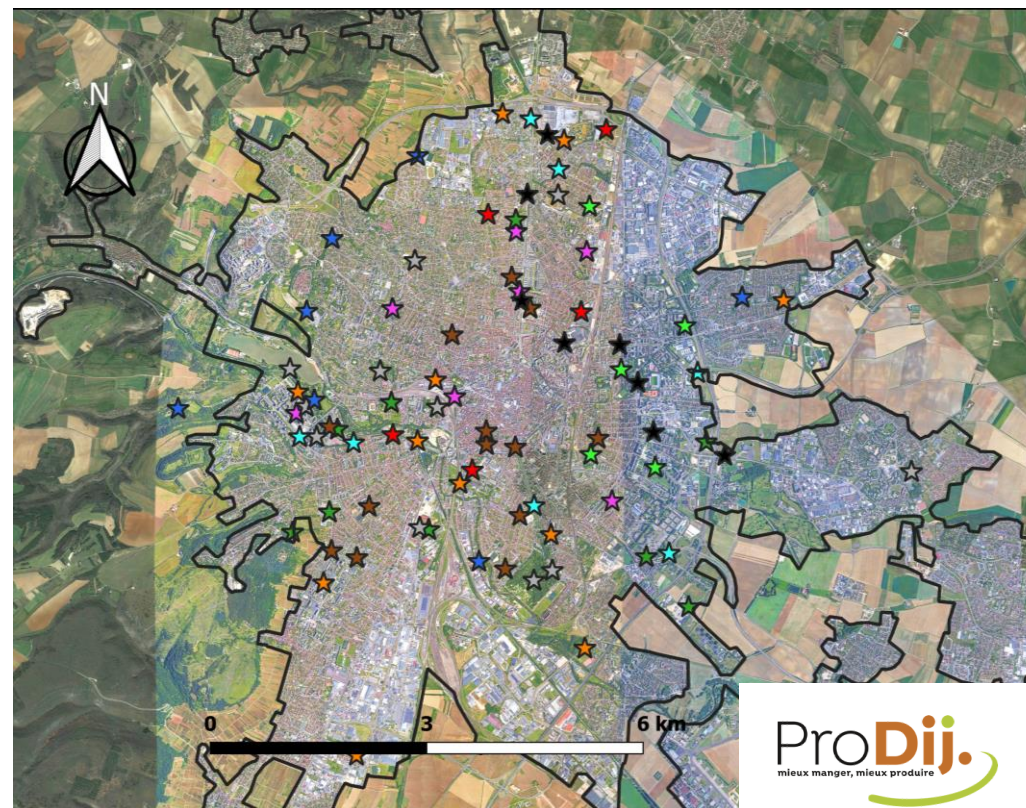
Jardins familiaux



Jardins partagés



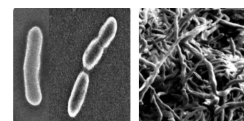
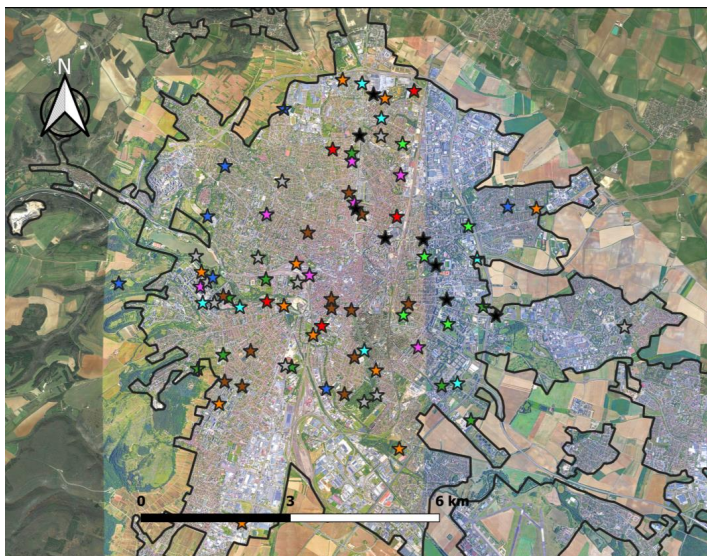
78 sites



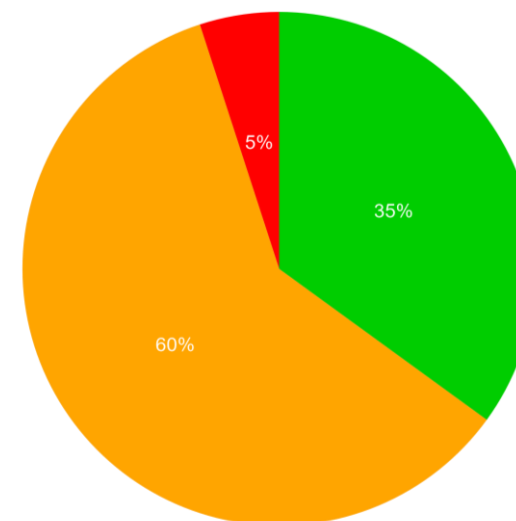
ProDij.  
mieux manger, mieux produire



# État globale des sols urbain de Dijon Métropole



## Diagnostic patrimoine microbiologique



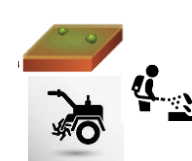
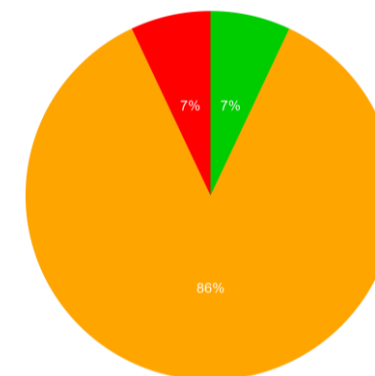
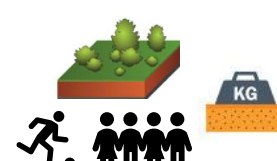
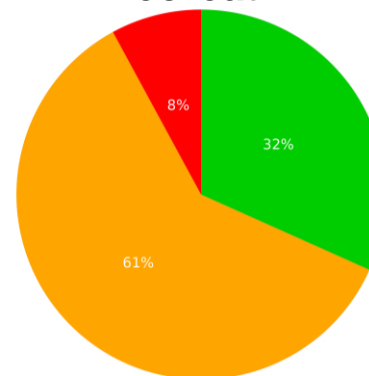
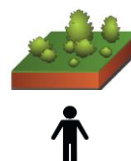
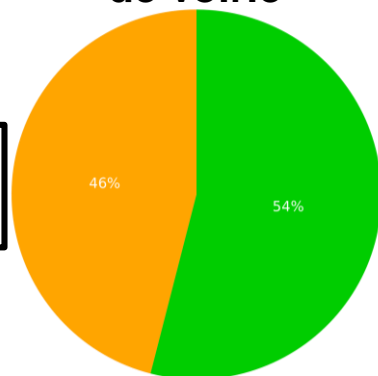
➡ Les sols urbains de Dijon Métropole présentent un état microbiologique globalement non critique mais à surveiller

# Effet des usages principaux

## Diagnostic microbiologique

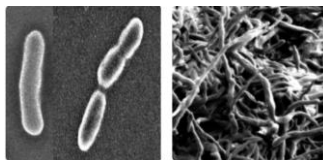


Diagnostic patrimoine  
microbiologique



➡ Les usages principaux impactent la qualité microbiologique des sols urbains

# Conclusions sur l'état microbiologique des sols de Dijon Métropole



- ➔ Des sols globalement dans un état non critique mais quand même affecté en termes de patrimoine et de fonctionnement microbiologique
- ➔ Les usages urbains des sols impactent la qualité microbiologique



Ecoles



Parcs



Squares



Prairies



Voies Tram



Jardins familiaux

- ➔ Réflexion sur les pratiques de gestion des sols





# Et maintenant !?

## Objectif Sol ! ...Quelques pistes:

- Développer les diagnostics opérationnels de la qualité écologique des sols, validé par la recherche académique
    - ⇒ Enjeu de construction de référentiels urbains
  - Impliquer les usagers et les citoyens dans les projets de recherche (recherches participatives)
  - Education, sensibilisation à la biosiversité du sol (programmes scolaires, formations agricoles, médiation scientifique...)
- ⇒ Sensibilisation et montée en compétences sur l'écologie du sol

⇒ Appropriation du diagnostic et développement du conseil
- Légitimer une valeur « qualité du sol » pour orienter les politiques publiques
    - ⇒ Développer des outils juridiques pour intégrer la qualité des sols dans les SCOT, PLU...documents d'urbanismes.
    - ⇒ Mettre en place une plus value foncière qui reconnaitrait la qualité des sols dans les échanges, les ventes et les successions de terre.

**Les indicateurs et les expertises existent pour cela !**

# Merci pour votre attention!



# JOURNÉE TECHNIQUE : RENATURER LES SOLS EN MILIEU URBAIN : C'EST POSSIBLE !

## Le diagnostic agro-pédologique et de la pollution

**Mardi 1 avril 2025**

Académie du Climat - Paris

**Quentin VINCENT** – *EODD Ingénieurs Conseils*



# Quels sont les diagnostics « sol »



**Diagnostic sites et sols pollués (SSP) dont amiante**



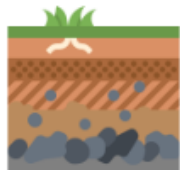
**Diagnostic géotechnique**



Ne concerne pas vraiment les projets de renaturation



**Diagnostic « zone humide »**



**Diagnostic agro-pédologique**

# Quels sont les diagnostics « sol » souhaités



## Diagnostic sites et sols pollués (SSP) dont amiante

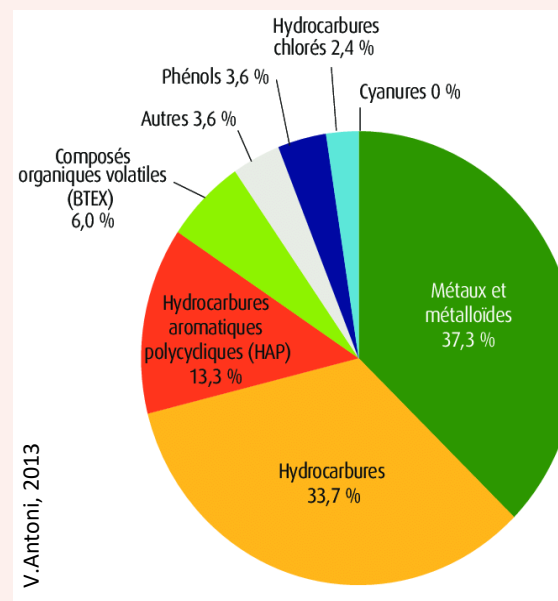


### Diagnostic amiante dans les enrobés nécessaire

La MOA doit fournir un rapport de diagnostic de repérage amiante sur enrobé.

- Si pas d'amiante dans l'enrobé: intervention sans conditions particulières
- Si présence d'amiante (ou que la MOA ne peut pas fournir pas le rapport): soit le sondage est déplacé hors zone d'enrobé, soit intervention avec un foreur habilité sous-section 4

### Diagnostics polluants

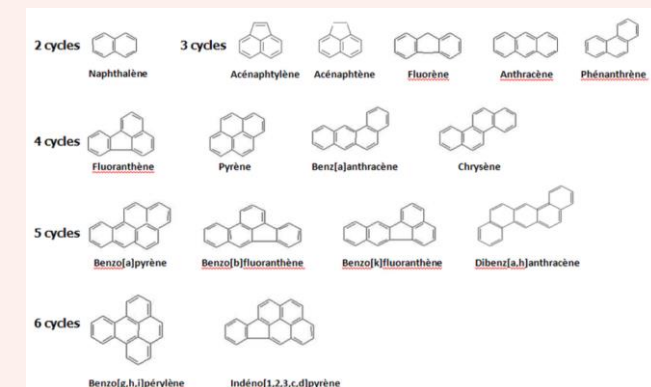


PS: Les ETM ne se dégradent pas

Cd
Cr
Cu
Ni
Pb
Zn

ETM (éléments traces métalliques)

### 16 HAP\* US-EPA



\*Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

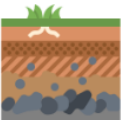
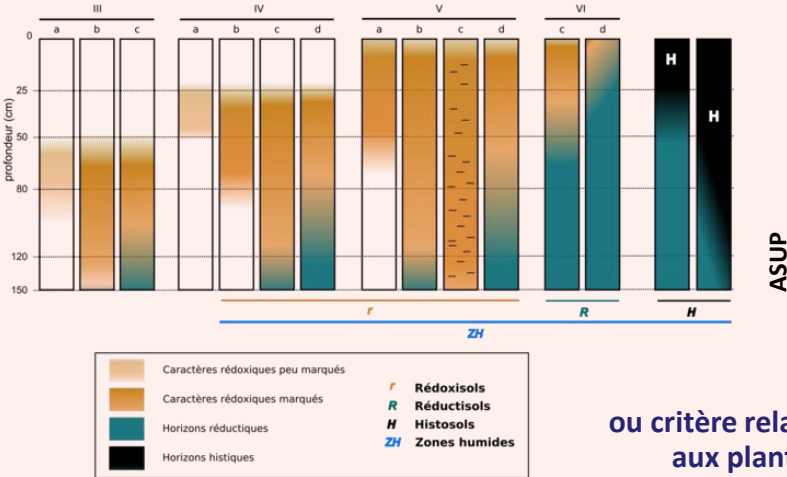
# Quels sont les diagnostics « sol » souhaités



## Diagnostic « zone humide »

Milieux caractérisés par la présence d'eau, qu'elle soit en surface ou dans le sol, de façon permanente ou temporaire. Ce sont des zones de transition, entre terre et eau.

Morphologie des sols correspondant à des "zones humides"  
(d'après classes d'hydromorphie du GEPPA, 1981)



## Diagnostic agro-pédologique



## Diagnostic pédologique



Ouverture de fosses pédo.



Sondages pédologiques



## Diagnostic agronomique

RESULTATS DES ANALYSES				Interprétations et commentaires		
PARAMETRE ANALYSE	Unite	RESULTAT	Unite	Faible	MOYEN	Eleve
ANALYSES PHYSIQUES ET DE CONSTITUTION DU SOL						
Capacité d'échange cationique CEC	cmol(+)kg <sup>-1</sup>	14,2	%			
Matières organiques (C x 1,72)	g/kg	2,32	%			
Argiles (0,2 à 2 µm)	%	25,6	%			
Limons fins (2 à 20 µm)	%	38,6	%			
Limons grossiers (20 à 50 µm)	%	27,7	%			
Sables fins (50 à 200 µm)	%	4,4	%			
Sables grossiers (200 à 2000 µm)	%	3,7	%			
Carbonates/calcaire total (CaCO <sub>3</sub> total)	g/kg	1,0	%			
Indice de battance (IB)	g/kg	1,4	%			
Carbone organique (COT)	g/kg	1,35	%			
Azote total Kjeldahl (NtK)	g/kg	0,14	%			
Rapport C/N		9,6				
ANALYSES CHIMIQUES/FERTILITE CHIMIQUE DU SOL						
pH eau		8,1				
Taux de saturation total (somme cat. act/CET)	g/kg	155,0	%			
Phosphore assimilable P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen	g/kg	0,020	g/kg			
Potasse échangeable K <sub>2</sub> O ech.	g/kg	0,212	g/kg			
Magnésium échangeable MgO ech.	g/kg	1,017	g/kg			
Chaux échangeable CaO ech.	g/kg	4,59	g/kg			
Oxyde de sodium échangeable Na <sub>2</sub> O ech.	g/kg	0,032	g/kg			
*not MgO/K <sub>2</sub> O	g/kg	4,81	g/kg			

Paramètres mesurés en laboratoire



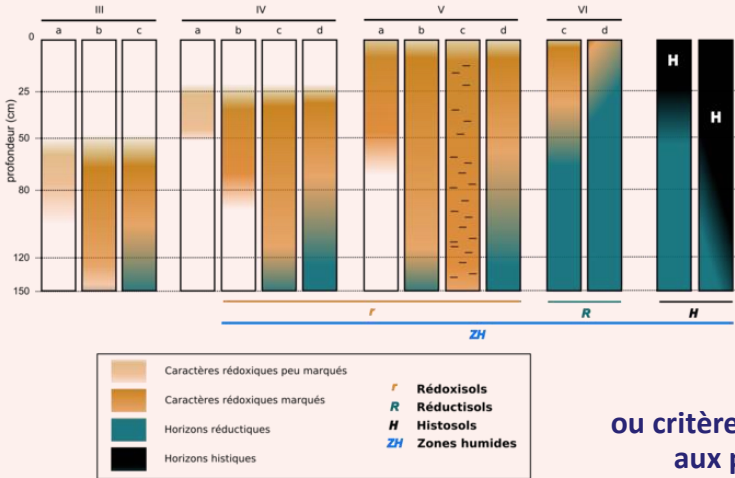
# Quels sont les diagnostics « sol » souhaités



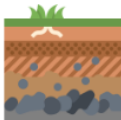
## Diagnostic « zone humide »

Milieux caractérisés par la présence d'eau, qu'elle soit en surface ou dans le sol, de façon permanente ou temporaire. Ce sont des zones de transition, entre terre et eau.

Morphologie des sols correspondant à des "zones humides" (d'après classes d'hydromorphie du GEPPA, 1981)



ou critère relatif aux plantes hygrophiles



## Diagnostic agro-pédologique



### Diagnostic pédologique



Ouverture de fosses pédo.



Sondages pédologiques



### Diagnostic agronomique

RÉSULTATS DES ANALYSES			
PARAMÈTRE ANALYSÉ	UNITÉ	RÉSULTAT	INTERPRÉTATION ET COMMENTAIRES
ANALYSES PHYSIQUES ET DE CONSTITUTION DU SOL			
Capacité d'échange cationique CEC	cmol/kg	14,2	FAIBLE MOYEN ÉLEVÉ
Matière organique (à 105°C)	%	3,0	
Argiles (0 à 2 µm)	%	25,6	
Limons fins (2 à 20 µm)	%	38,6	
Limons grossiers (20 à 60 µm)	%	27,7	
Sables fins (60 à 200 µm)	%	4,4	
Sables grossiers (200 à 600 µm)	%	3,7	
Carbonates (acide total) (acide total)	%	0,0	
Indice de battance (IB)	g/kg	1,4	
Carbone organique (COT)	%	1,35	
Acide total (g/kg) (acide total)	%	0,14	
Rapport C/N		9,6	
ANALYSES CHIMIQUES/FERTILITÉ CHIMIQUE DU SOL			
pH eau		5,5	FAIBLE MOYEN ÉLEVÉ
Taux de saturation total (norme est. 45/500)	%	15,0	
Phosphore assimilable (à 10°C)	mg/kg	0,028	
Potasse échangeable (à 10°C)	g/kg	0,12	
Magnésium échangeable (à 10°C)	g/kg	1,017	
Chaux échangeable (à 10°C)	g/kg	4,59	
Quota de sodium échangeable (à 10°C)	g/kg	0,002	
mont Mg/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4,81	

Paramètres mesurés en laboratoire



### Diagnostic biologique



Vers de terre



Macrofaune



Collemboles

# Quels sont les diagnostics « sol » souhaités

Dans l'idéal...



## Mutualiser les diagnostics

En mutualisant les sondages, cela réduit les coûts et permet plus facilement la production d'un diagnostic intégré

## Permettre l'échange entre les types d'études

Avoir un vocabulaire commun et bien expliquer le rôle et les complémentarités de chacun. Parfois, la MOA pense qu'un diagnostic de sol ce n'est que du SSP et de la géotechnie. Vision « risque » et « support » et peu de vision « écologique » - du coup on identifie les contraintes et peu les avantages du site.

## Anticiper les diagnostics

Eviter de demander une étude en urgence alors que les enjeux (pollution, zone humide, écologie de sols) étaient déjà identifiés/identifiables.

**... mais pas trop non plus**

Eviter de faire un diagnostic de sol si le site est modifié au point que les diagnostics deviennent obsolètes

# Quels sont les diagnostics « sol » souhaités

Comment cela se traduit concrètement ?



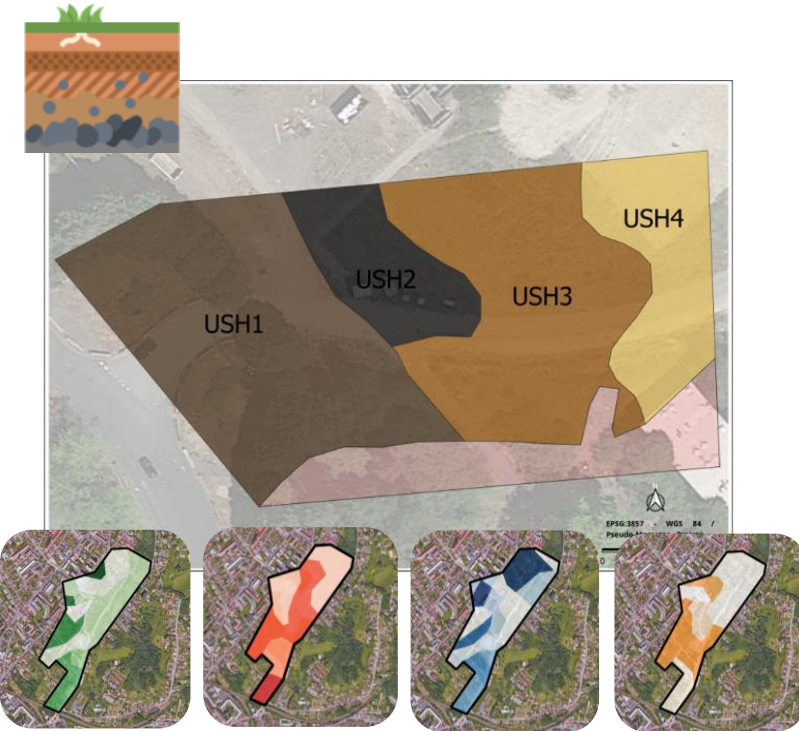
Dans l'idéal, carte des **risques** (et pas seulement de la pollution car danger ≠ risque)



Dans l'idéal, carte des **zones humides** pour les préserver dans le projet.

En milieu urbain, ce diagnostic est **souvent oublié** alors que les zones humides urbaines sont essentielles

(<https://www.zones-humides.org/des-zones-humides-pour-les-villes-de-demain>)

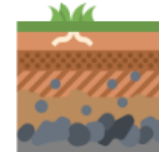


Dans l'idéal, carte des **fonctions des sols** (et pas seulement carte des sols car état ≠ fonction)



# Quels sont les diagnostics « sol » souhaités

Combien de sondage ?



Le nombre de sondage n'est pas strictement dépendant de la superficie,  
il **dépend de l'hétérogénéité du milieu.**

A définir avec une **étude documentaire préalable**  
(étude des données existantes, cartographique, historique *etc.*).

*Entre représentativité du site d'étude  
et réponse à la problématique posée*

Tableau 5. Nombre de prélèvements à effectuer dans un sol en place pour le décrire correctement		
Ordre de grandeur de la surface	Caractéristique	Nombre d'observations (fosse ou tarière)
1000 m <sup>2</sup>	Homogène	2
1000 m <sup>2</sup>	Hétérogène	5 à 6
10 000 m <sup>2</sup>	Homogène	10
10 000 m <sup>2</sup>	Hétérogène	20

# Quels sont les diagnostics « sol » souhaités

Combien ça coûte ?

**De 50 à 800 euros le mètre carré**

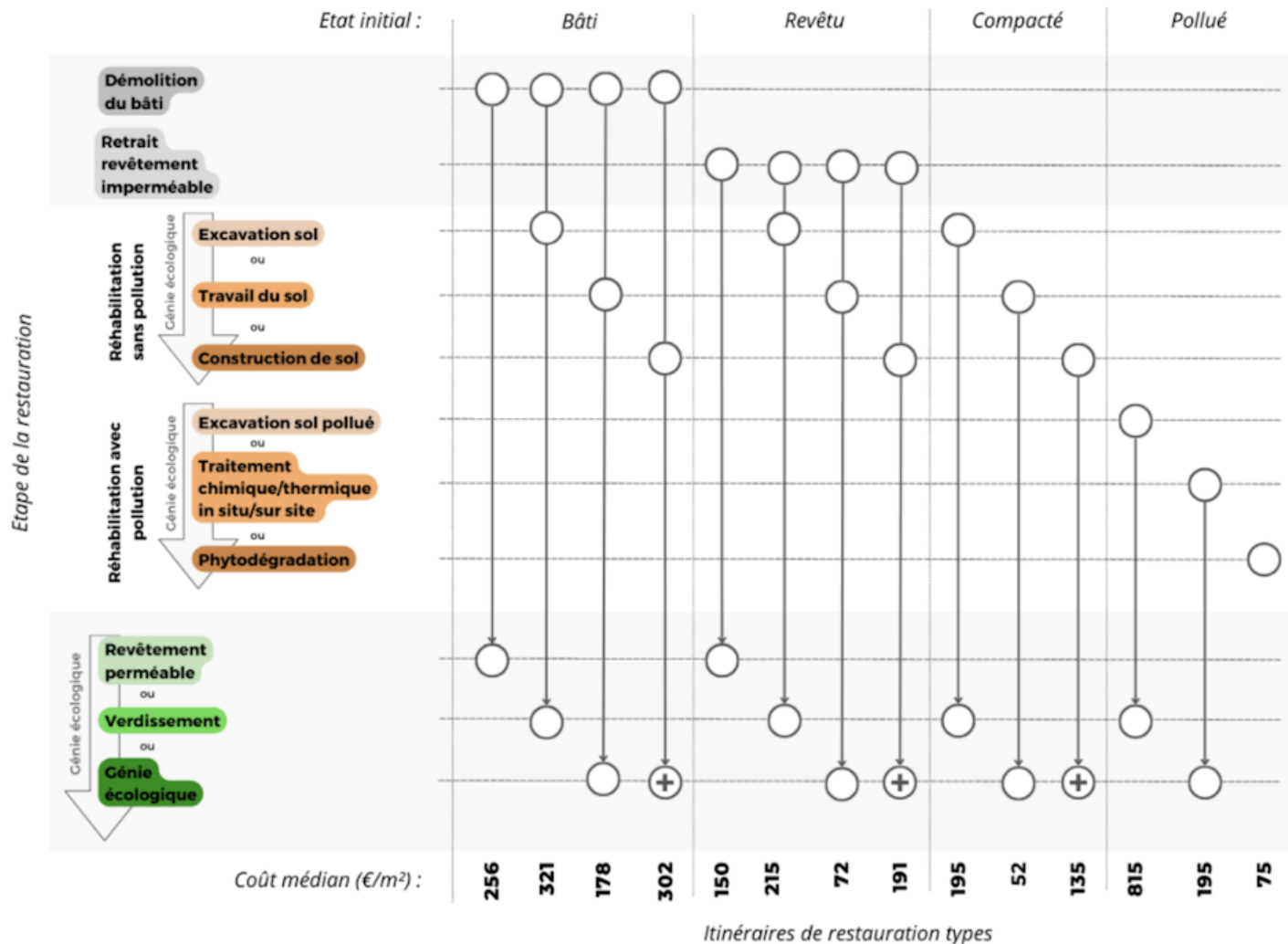
Variabilités importantes: dépend des caractéristiques du site (hétérogénéité des sols, niveau de contamination) et des techniques utilisées



Salin, M., Claron, C., Nguyen-Rabot, E., Mondolfo, N., & Levrel, H. (2025). *Les coûts de la restauration des sols urbains* (Doctoral dissertation, CIRED Working Paper n° 2024-96-FR).

# Quels sont les diagnostics « sol » souhaités

Combien ça coûte ?



« Le degré d'ingénierie écologique mobilisée joue également. Une **végétalisation à visée esthétique (avec des arbres matures et un entretien régulier)** coûte plus cher qu'une **restauration écologique ambitieuse**, impliquant la recréation d'habitats naturels et un suivi écologique de long terme, elle-même plus onéreuse qu'une restauration partielle. »