

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^{er} 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

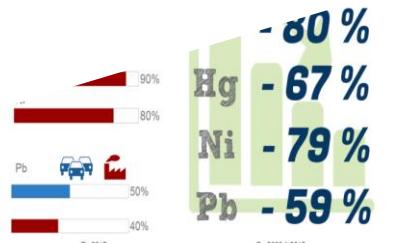
INRAe

L'INSTITUT
agro Dijon

Context sociétal



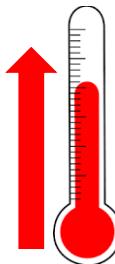
Dégradation de la qualité de vie en milieu urbain (santé physique et psychologique)



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)



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

Context 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



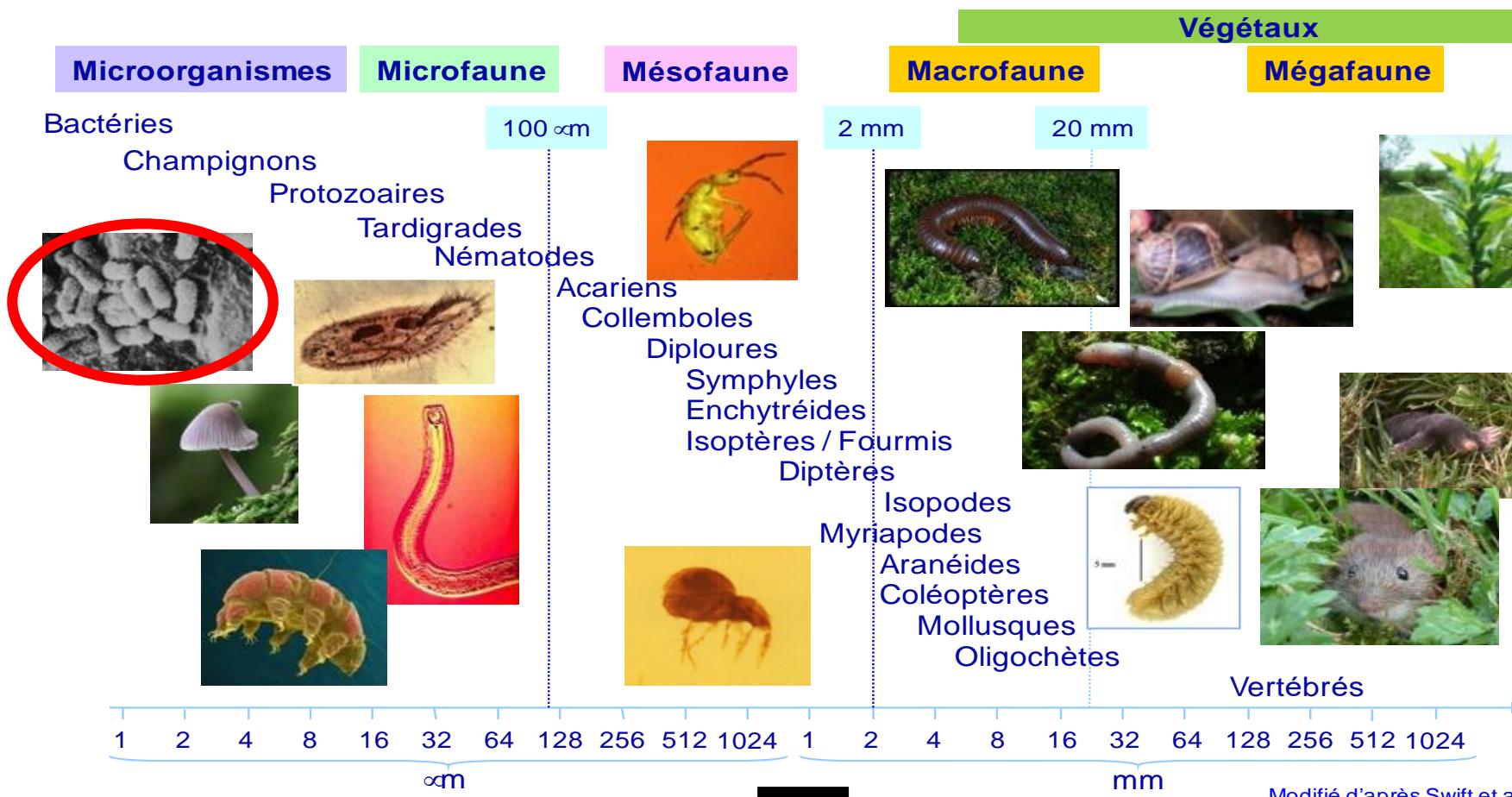
Ecosystème avec un patrimoine biologique
à même de rendre des services pour les sociétés humaines



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

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

La biodiversité du sol



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

Un patrimoine microbiologique gigantesque !

Plus de microorganismes dans 1m² de sol que d'étoiles dans le ciel ! (H Reeves)

Enorme abondance et diversité



10^9 bactéries
 10^6 espèces



SOL

10^6 champignons
 10^3 espèces



= Réservoir de diversité microbienne de notre planète
= patrimoine naturel

1.5 tonnes/ha

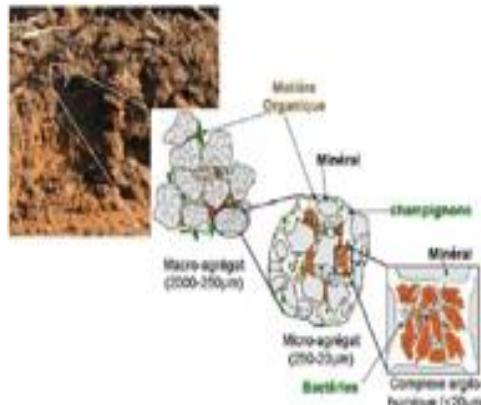
3.5 tonnes/ha

≈ 10 UGB!!

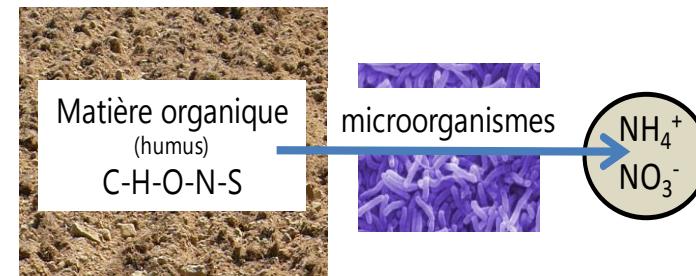


Les microorganismes du sol: Acteurs du fonctionnement du sol

⇒ 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?



ADN

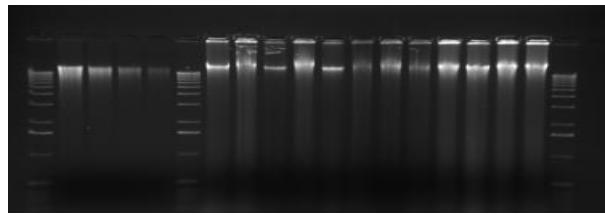


Ça, c'était avant!

De nouveaux outils: l'écologie moléculaire

Métagénomique du sol = Ensemble des génomes de tous les micro-organismes

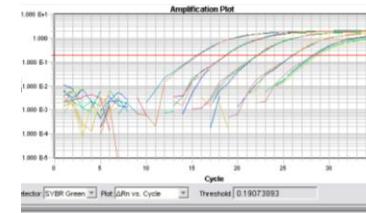
Quantité d'ADN dans le sol



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

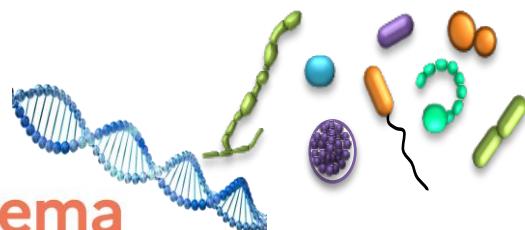
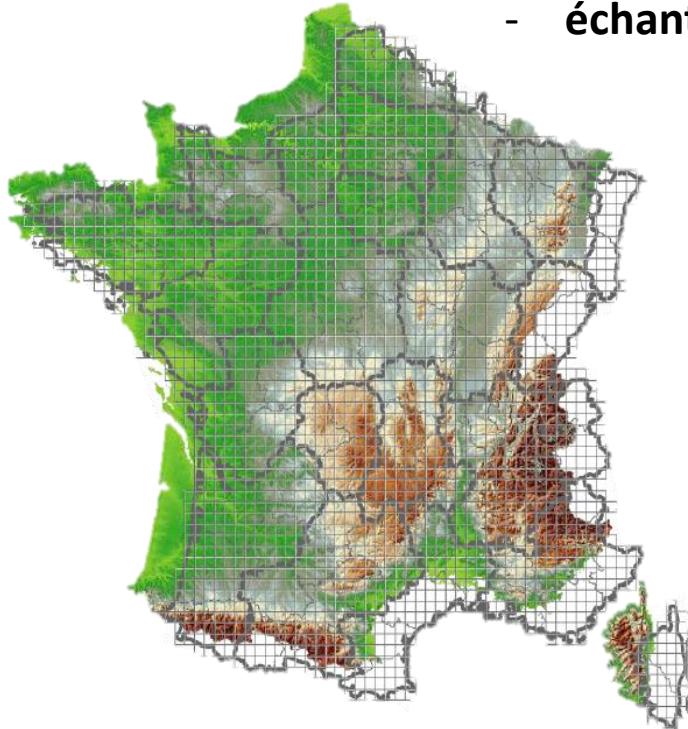
Renaturation des sols urbains à l'échelle opérationnelle.
Avec quelle connaissance? Quels diagnostics?

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

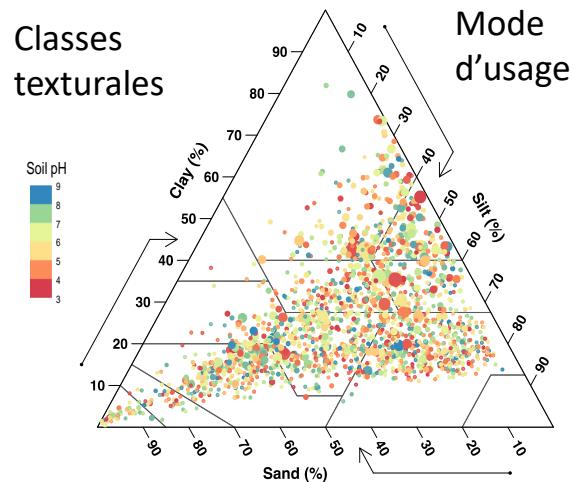


RMQS

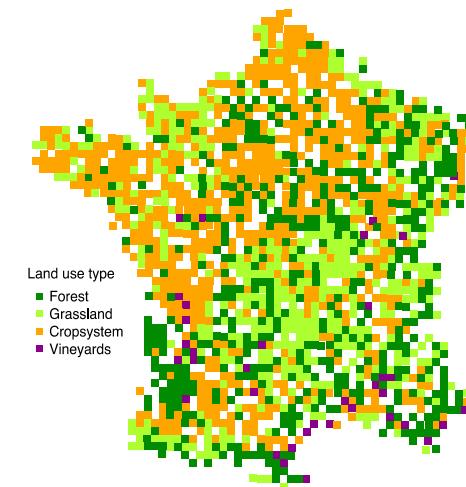
- mis en place en 2002 par l'INRA
 - échantillonnage des sols français sur une grille de 16 x 16 km
- 2200 sites



Classes texturelles



Mode d'usage



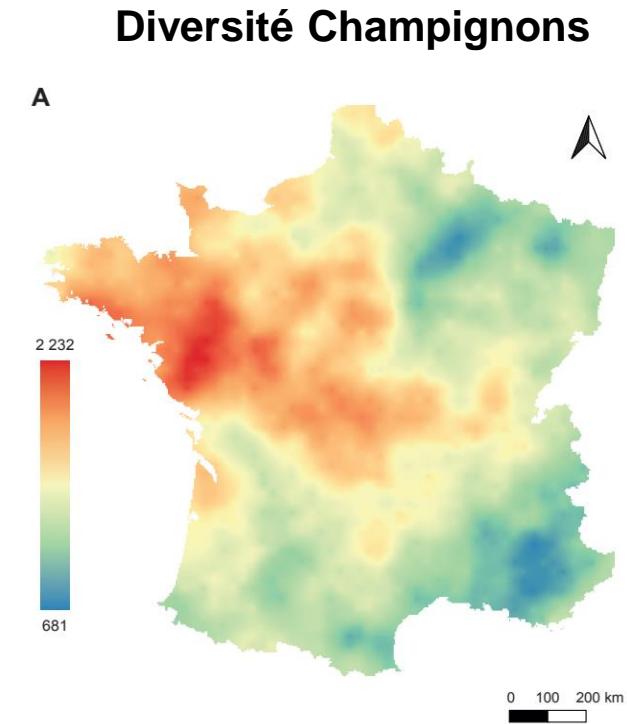
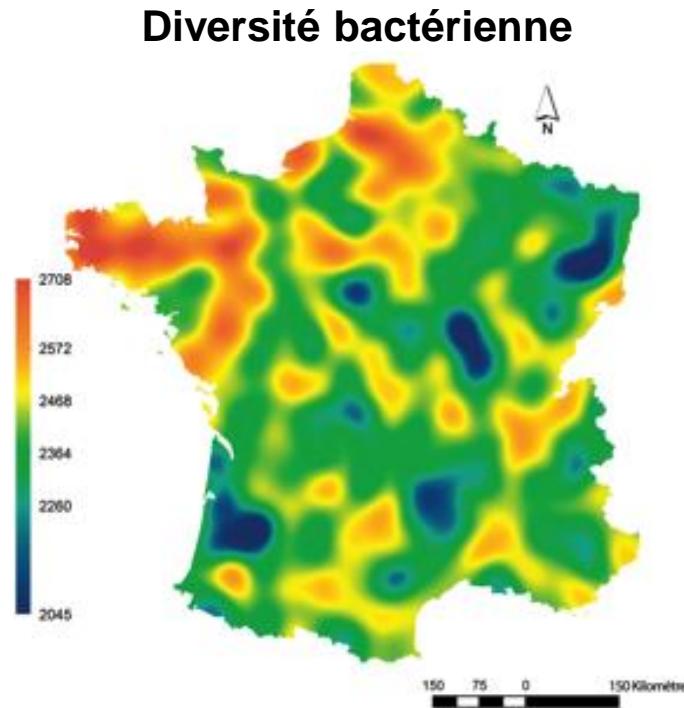
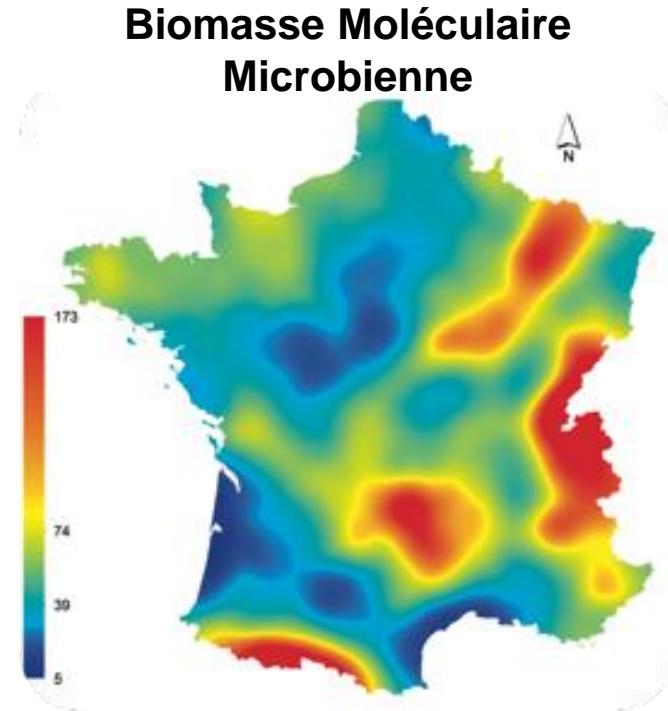
Grande variabilité de types de sols et de modes d'usage



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

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

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



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

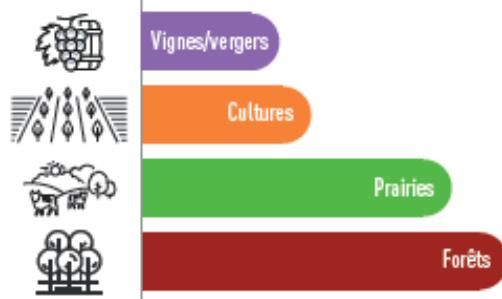
Des causes naturelles et moins naturelles !

Abondance des microorganismes

Effet sol



Effet mode d'usage

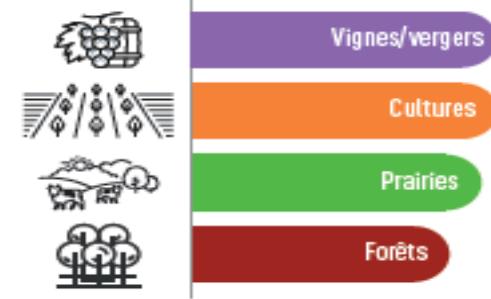


Diversité bactérienne

Effet sol



Effet mode d'usage

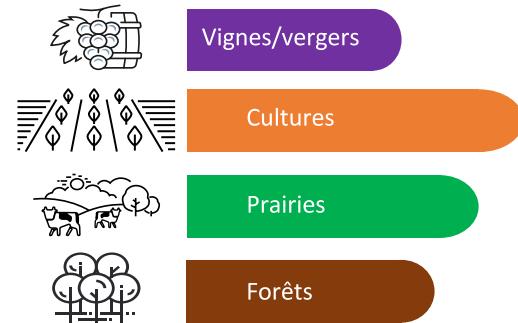


Diversité champignons

Effet sol



Effet mode d'usage



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

Des outils de recherche qui deviennent des indicateurs

Les bases du diagnostic

I. Détection

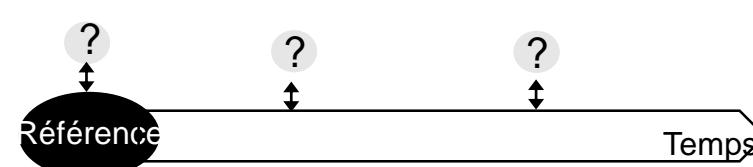
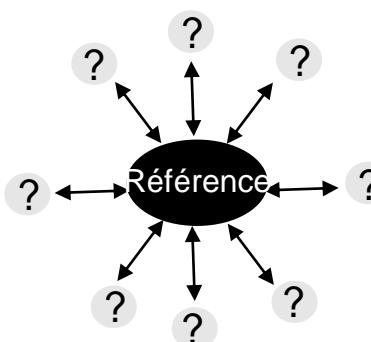
- ✓ Permet un diagnostic
- ✗ Se limite à une sortie binaire de type "présence/absence"



II. Dire d'expert

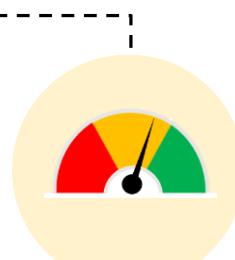
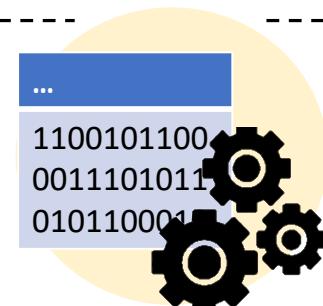
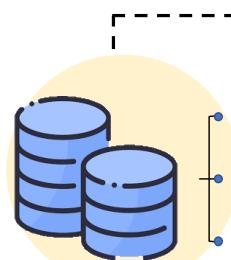
- ✓ Permet un diagnostic
- ✗ Repose sur l'expérience
- ✗ Peut changer en fonction des experts !

III. Comparatif

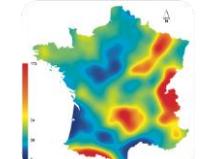


- ✓ Permet un diagnostic
- ✗ Quid de l'état de la référence ??

IV. Référentiel



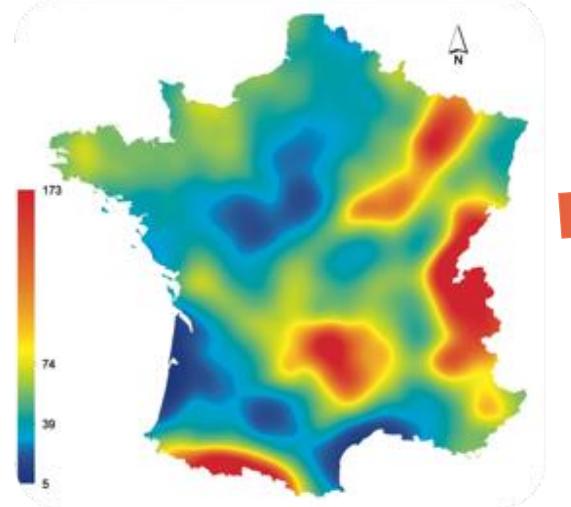
- ✓ Diagnostic objectivé et générique
- ✗ Dépend de la qualité du référentiel



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

Des outils de recherche qui deviennent des indicateurs

Abondance microbienne



« Indicateur national sol »



$$\text{Modèle : } Y = \beta_0 + \sum (\beta_j X_j + \epsilon)$$

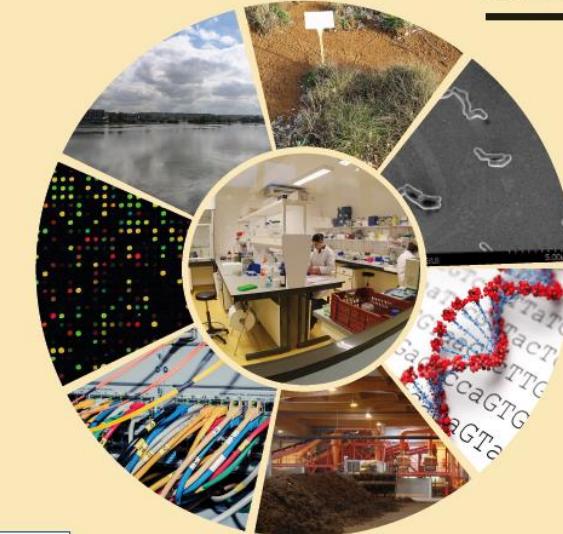
Diagnostic qualité
Seuil critique
(-30% EVR)



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

Le projet ProDij (Territoire d'Innovation)



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



Impact sur la qualité des Sols

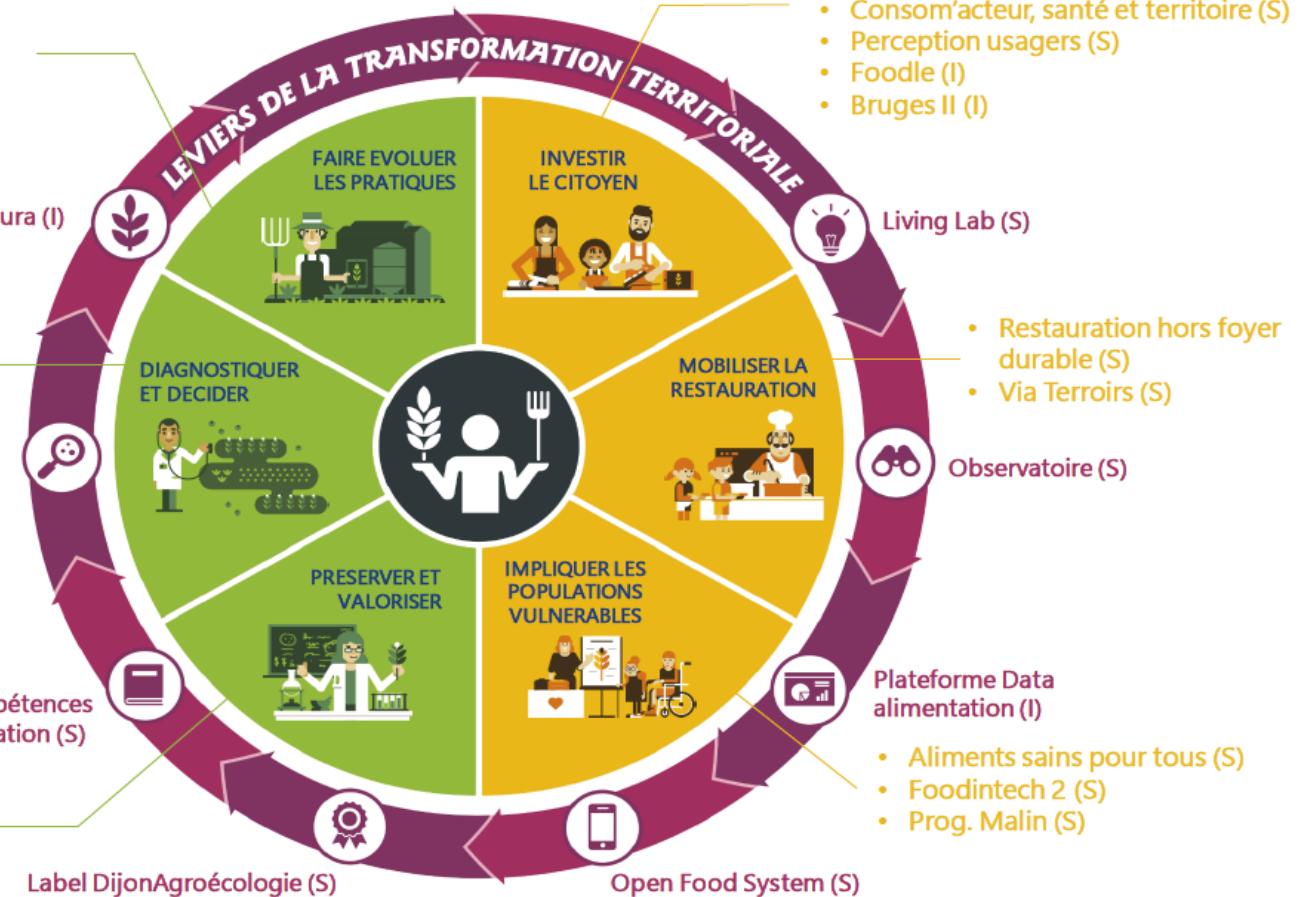
- Ressources génétiques légumineuses (S)

DIJON ALIMENTATION DURABLE 2030

Mieux produire



Mieux manger



Action Sols Expert

Objectif

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

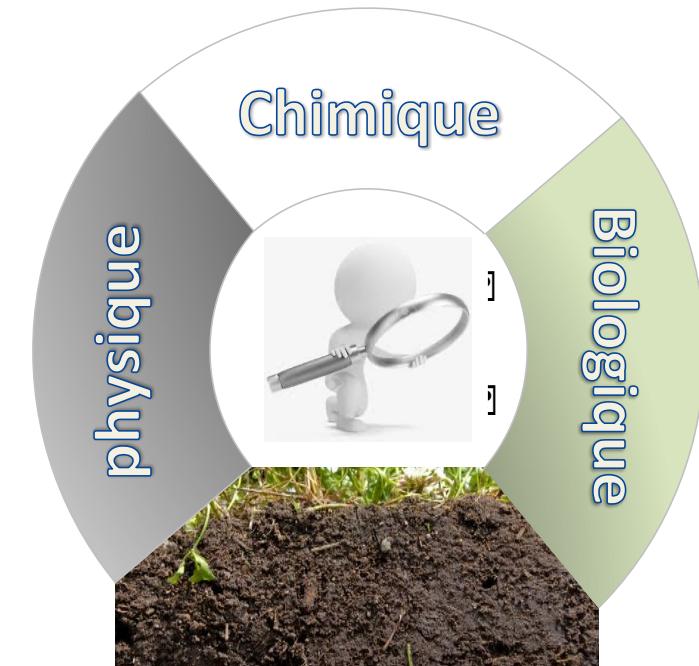
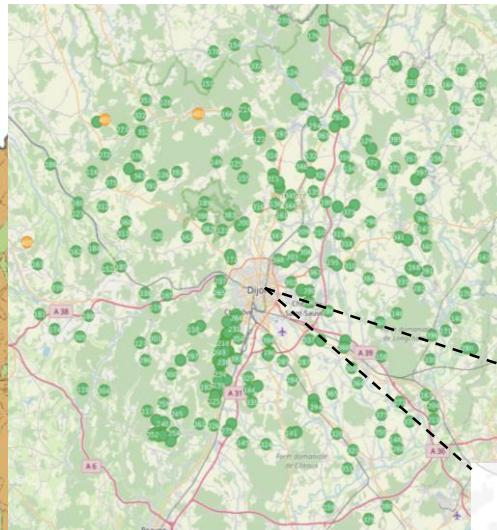
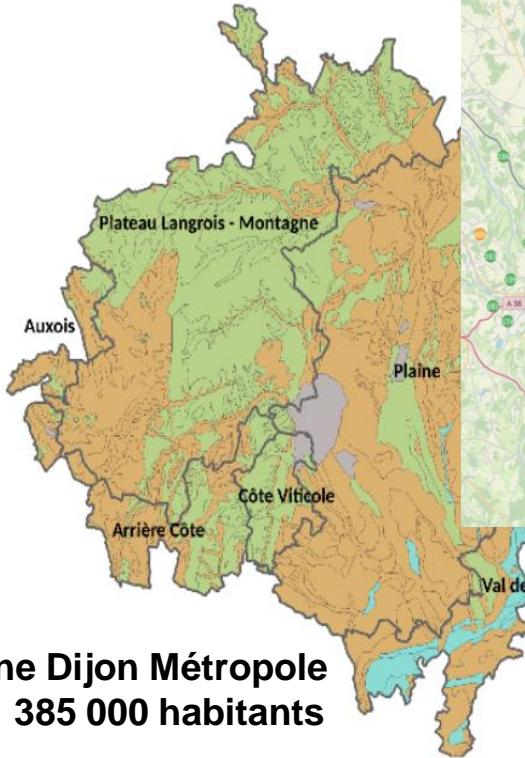


Tableau de bord d'indicateurs

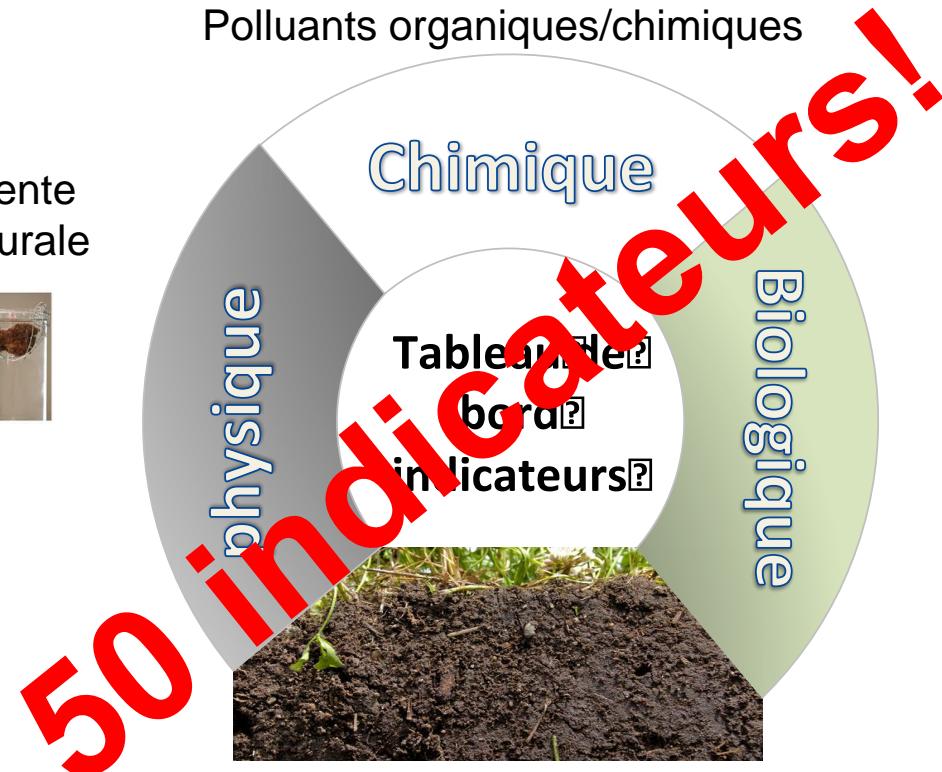
Le tableau de bord d'indicateurs ProDij



Densité apparente
Stabilité structurale

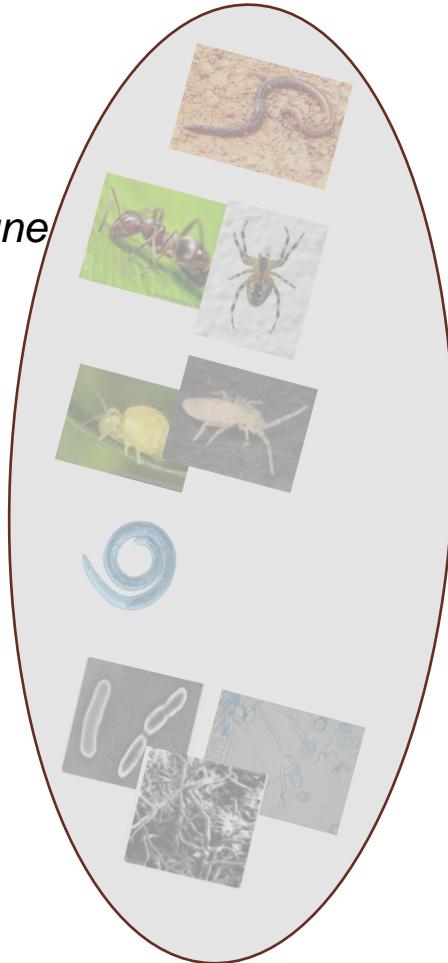


Teneur en C, N
Eléments nutritifs (N,P,K)
pH, texture
Stabilité/stock de carbone
Polluants organiques/chimiques



Macrofaune

- Vers de terre
- Autre macrofaune



Mésafaune

- collemboles



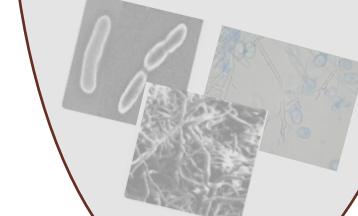
Microfaune

- Nématodes



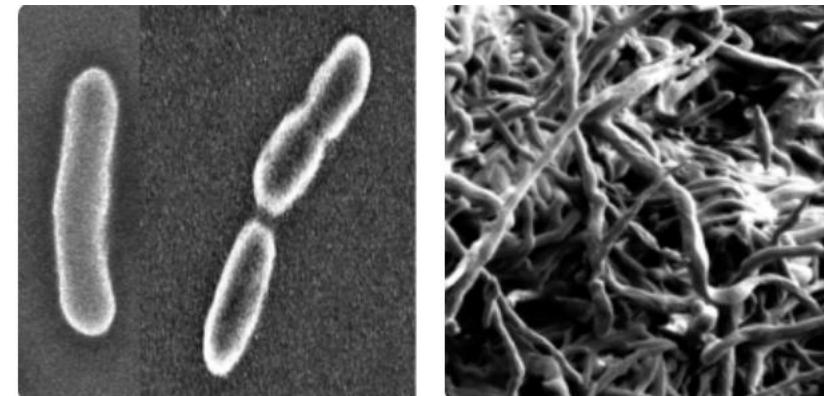
Microorganismes

- Bactéries
- Champignons



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

Diagnostic microbiologique des sols urbains de Dijon Métropole



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

Échantillonnage urbain: typologie des espaces

Accompagnement de voirie



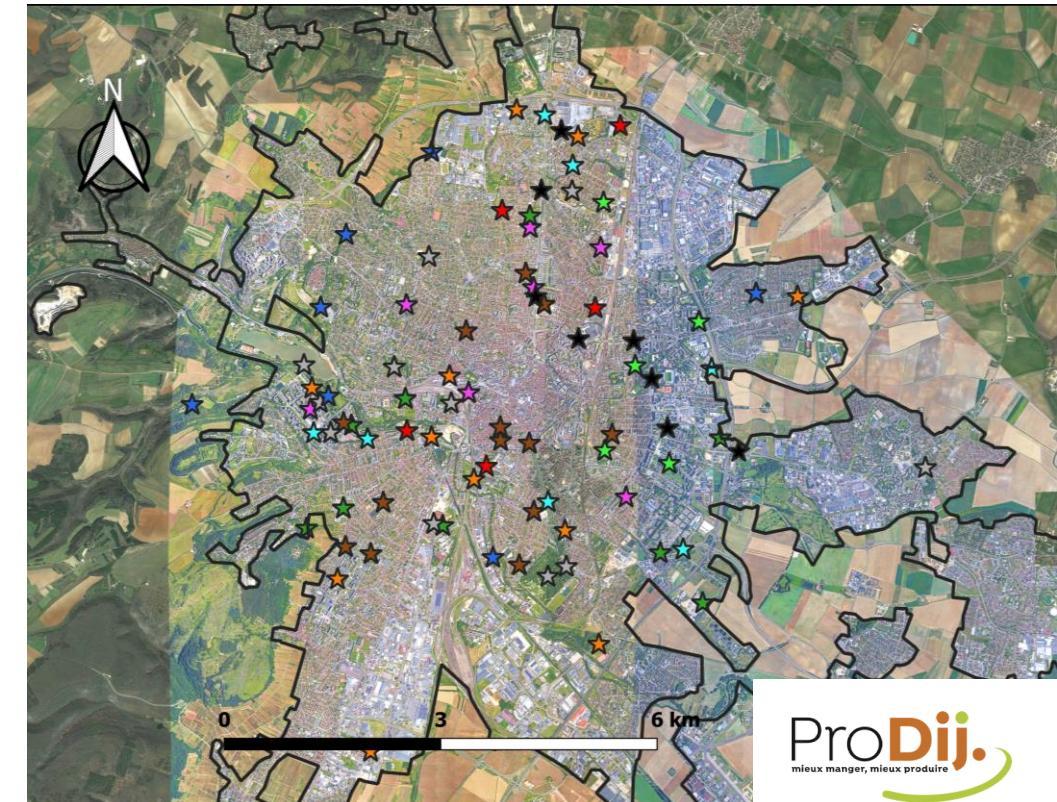
Sites récréatifs



Agriculture urbaine

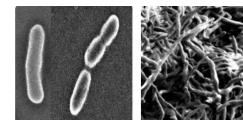
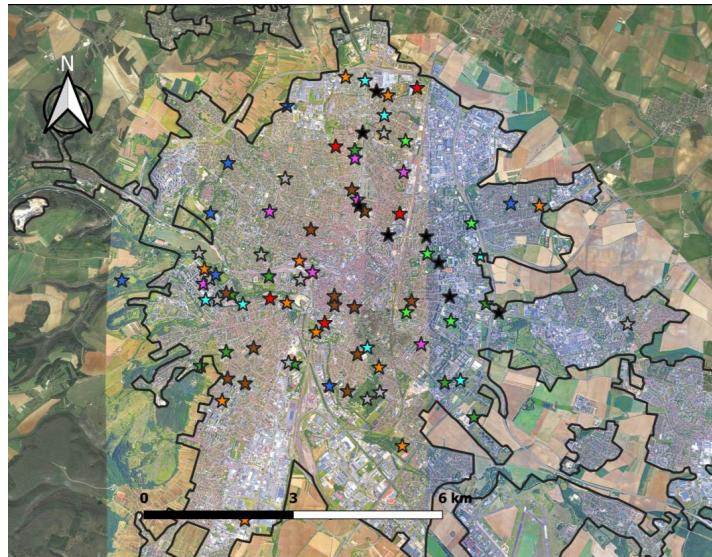


78 sites

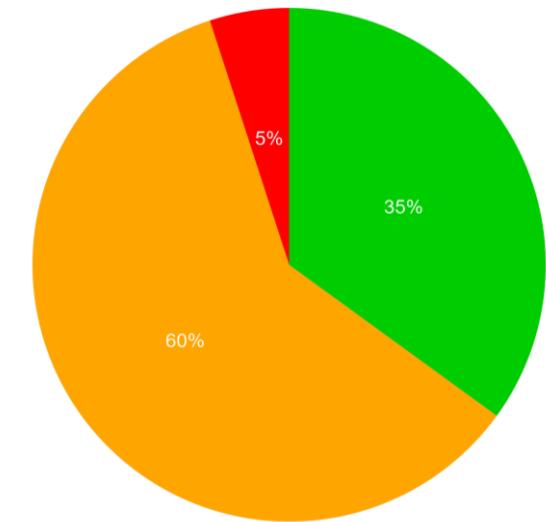


État globale des sols urbain de Dijon Métropole

X



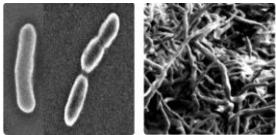
Diagnostic patrimoine microbiologique



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

Effet des usages principaux

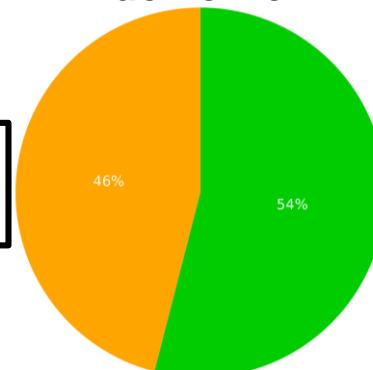
Diagnostic microbiologique



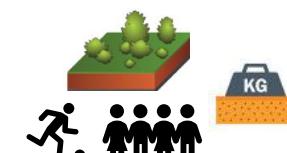
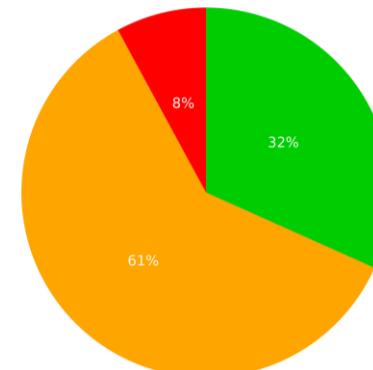
Diagnostic patrimoine microbiologique



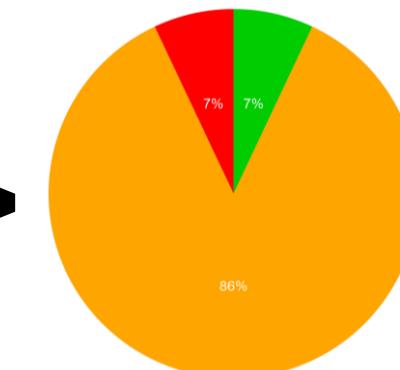
Accompagnement
de voirie



Sites
récréatif

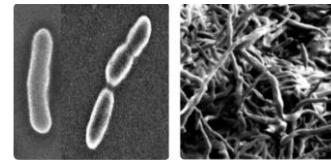


Agriculture
urbaine



→ 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

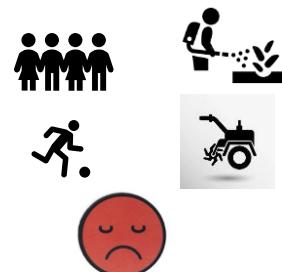


Prairies



Voies Tram

- Réflexion sur les pratiques de gestion des sols



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

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 biosécurité du sol (programmes scolaires, formations agricoles, médiation scientifique...)
 - 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 reconnaîtrait la qualité des sols dans les échanges, les ventes et les successions de terre.
-] ⇒ Sensibilisation et montée en compétences sur l'écologie du sol
] ⇒ Appropriation du diagnostic et développement du conseil

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

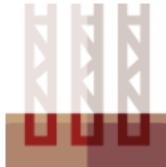
Académie du Climat - Paris

Quentin VINCENT – EODD Ingénieurs Conseils

Quels sont les diagnostics « sol »



Diagnostic sites et sols pollués (SSP) dont amiante



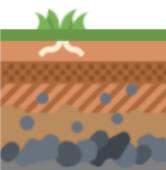
Diagnostic géotechnique



Ne concerne pas vraiment les projets de renaturation



Diagnostic « zone humide »



Diagnostic agro-pédologique

Quels sont les diagnostics « sol » souhaités



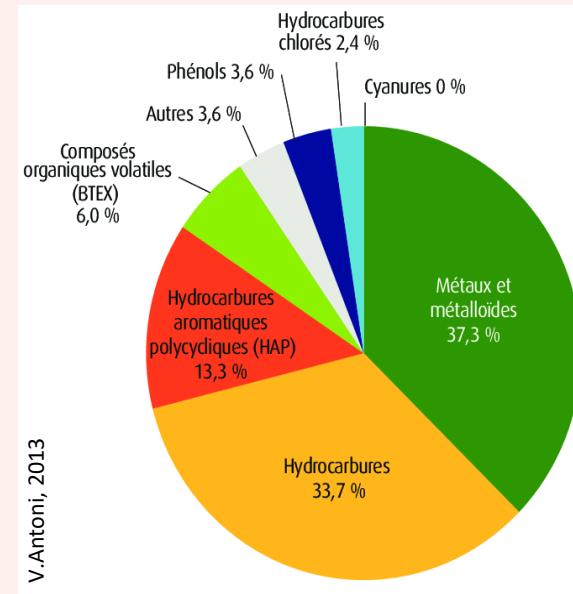
Diagnostic sites et sols pollués (SSP) dont amiante

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

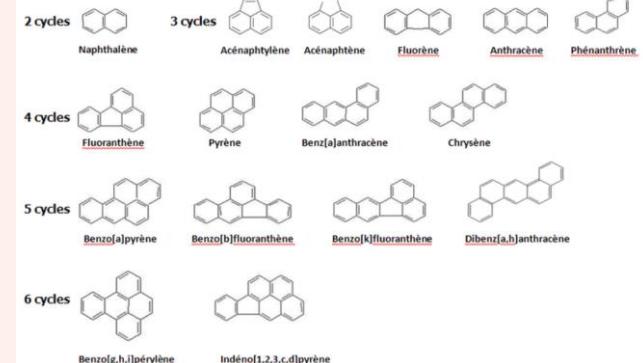


PS: Les ETM ne se dégradent pas

Cd
Cr
Cu
Ni
Pb
Zn

ETM (éléments traces métalliques)

16 HAP* US-EPA



*Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

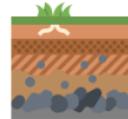
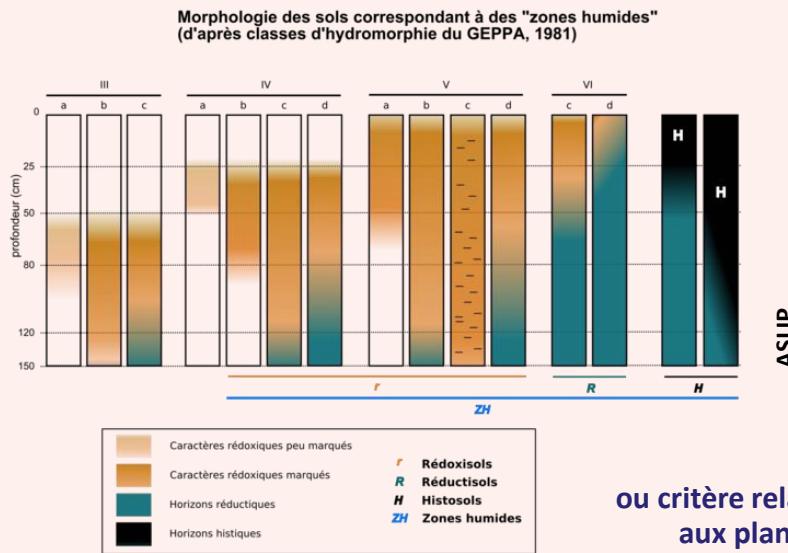


Quels sont les diagnostics « sol » souhaités



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.



Diagnostic agro-pédologique



Diagnostic pédologique



Ouverture de fosses pédo.

Sondages pédologiques



Diagnostic agronomique

PARAMÈTRE ANALYSÉ	Méthode	RÉSULTAT	Unité	Interprétations et commentaires		
				FAIBLE	MOYEN	ELEVÉ
Capacité d'échange cationique-CEC	NF ISO 2380	14,2	cmol/kg	-	-	-
Matières organiques (C x 1,12)	Calcul	2,32	%	-	-	-
Argiles (0 à 2 µm)	-	25,6	-	-	-	-
Limons (0,2 à 20 µm)	-	38,6	-	-	-	-
Sables fins (0,2 à 20 µm)	NF ISO 1077	27,7	%	-	-	-
Sables fins (0,2 à 200 µm)	-	4,4	-	-	-	-
Sables grossiers (20 à 2000 µm)	-	3,7	-	-	-	-
Carbonates/calcare total (CaCO ₃ total)	NF ISO 20975	1,0	%	-	-	-
Indice de battage (IB)	Calcul	1,4	-	-	-	-
Carbone organique (COT)	NF ISO 14237	1,35	%	-	-	-
Azote total Kjeldhal (NTK)	NF ISO 22212	0,14	%	-	-	-
Rapport C/N	Calcul	9,6	-	-	-	-
Texture du sol : Limon argileux						
Sol sans risque de battage						
La teneur en MO étant faible, penser à restituer au maximum possible les pailles.						
C/N favorable.						
ANALYSES CHIMIQUES/FERTILITÉ CHIMIQUE DU SOL						
paramètre	méthode	résultat	unité	insuffisant	satisfaisant	élévé
pH eau	NF ISO 2380	8,1	-	-	-	-
Taux de saturation total somme cation échangeable	Calcul	155,0	-	-	-	-
Phosphore échangeable P ₂ O ₅ échangeable	NF ISO 12283	0,028	kg/ha (%)	-	-	-
Potasse échangeable K ₂ O échangeable	NF ISO 12283	0,212	kg/ha (%)	-	-	-
Magnésium échangeable MgO échangeable	NF ISO 12283	1,017	kg/ha (%)	-	-	-
Chaux échangeable CaO échangeable	NF ISO 12283	4,59	kg/ha (%)	-	-	-
Oxyde de sodium échangeable Na ₂ O échangeable	NF ISO 12283	0,032	kg/ha (%)	-	-	-
taux Mg/K ₂ O	Calcul	4,83	-	-	-	-

Paramètres mesurés en laboratoire

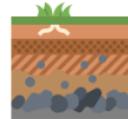
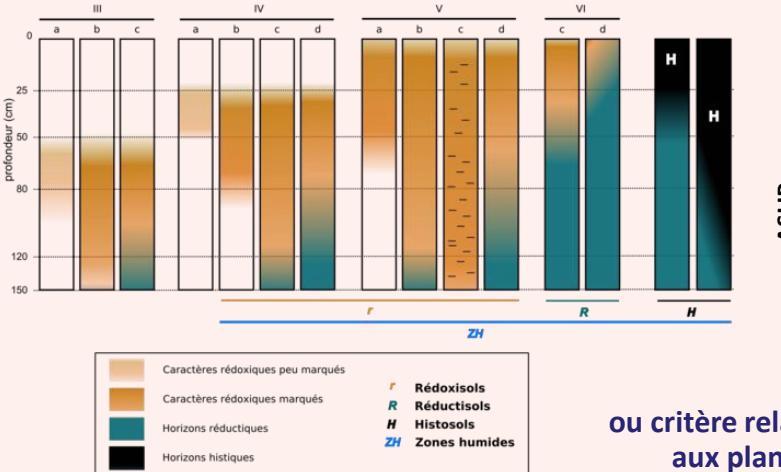
Quels sont les diagnostics « sol » souhaités



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)



Diagnostic agro-pédologique



Diagnostic pédologique



Ouverture de fosses pédo.



Sondages pédologiques



Diagnostic agronomique

PARAMÈTRE ANALYSÉ	Valeur	RESULTAT	Unité	Interprétations et commentaires
RÉSULTATS DES ANALYSES				
ANALYSES PHYSIQUES ET DE CONSTITUTION DU SOL				
Capacité d'échange catiogénique CEC (cmol/kg)	14,2	excellant	%	
Argiles (cmol/kg)	2,4	excellant	%	
Limons (cmol/kg)	26,8	excellant	%	
Limons grossiers (2 à 50 µm)	38,6	excellant	%	
Argiles grossières (2 à 50 µm)	3,7	excellant	%	
Sables grossiers (200 à 2000 µm)	4,1	excellant	%	
Carbonates/calcare total (CaCO3, eq)	1,0	excellant	%	
Calcaire de battement	1,4	excellant	%	Sal avec risque de battement
Carbone organique COT	1,35	excellant	%	La teneur en COT (carbone organique total) est meilleure que la teneur en carbone minéral soluble en pH.
Azote total Kjeldahl (TKN)	0,14	excellant	%	C/N favorable.
Rapport C/N	9,6	-	-	
ANALYSES CHIMIQUES/PERTINÉTÉ CHIMIQUE DU SOL				
pH eau	8,1	-	-	
Alcalinité de saturation total (Korrmann et al., 1982)	10,02	insuffisant	%	
Phosphore assimilable A.O.Cher	0,028	satisfaisant	µg/g P2O5	
Potasse échangeable A.O.Cher	0,212	satisfaisant	µg/g K2O	
Chlorure échangeable A.O.Cher	2,037	satisfaisant	g/kg	
Oxyde de sodium échangeable NaO/pH	4,59	satisfaisant	mg/g	
Mont MgO/pH	0,032	satisfaisant	mg/g	
-mont MgO/pH				
	4,81	-	-	

Paramètres mesurés en laboratoire



Diagnostic biologique



Macrofaune



Vers de terre



Collemboles

Quels sont les diagnostics « sol » souhaités

Dans l'idéal...

Mutualiser les diagnostics

En mutualisant les sondages, cela réduit les couts 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

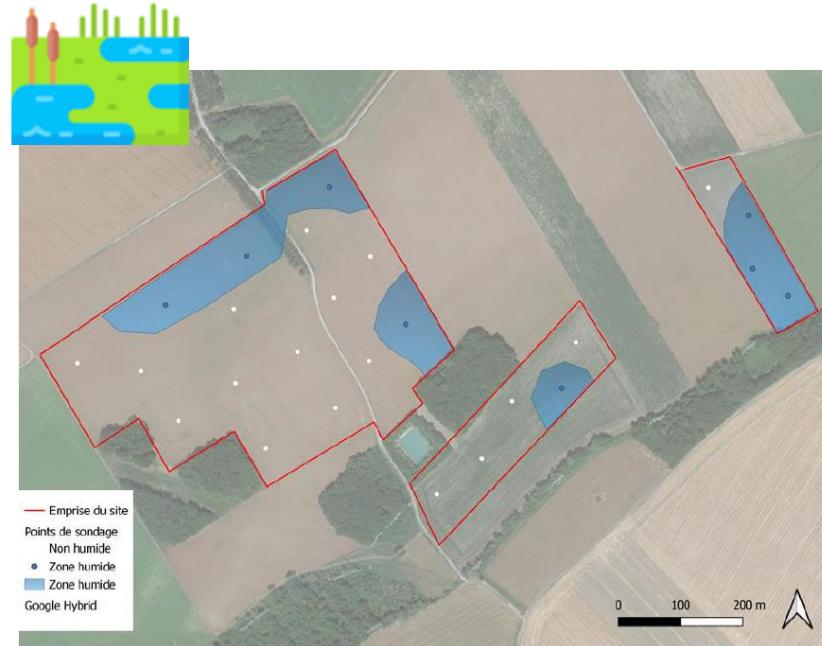
Eviter de faire un diagnostic de sol si le site est modifié au point que les diagnostics deviennent obsolètes

Quels sont les diagnostics « sol » souhaités

Comment cela se traduit concrètement ?



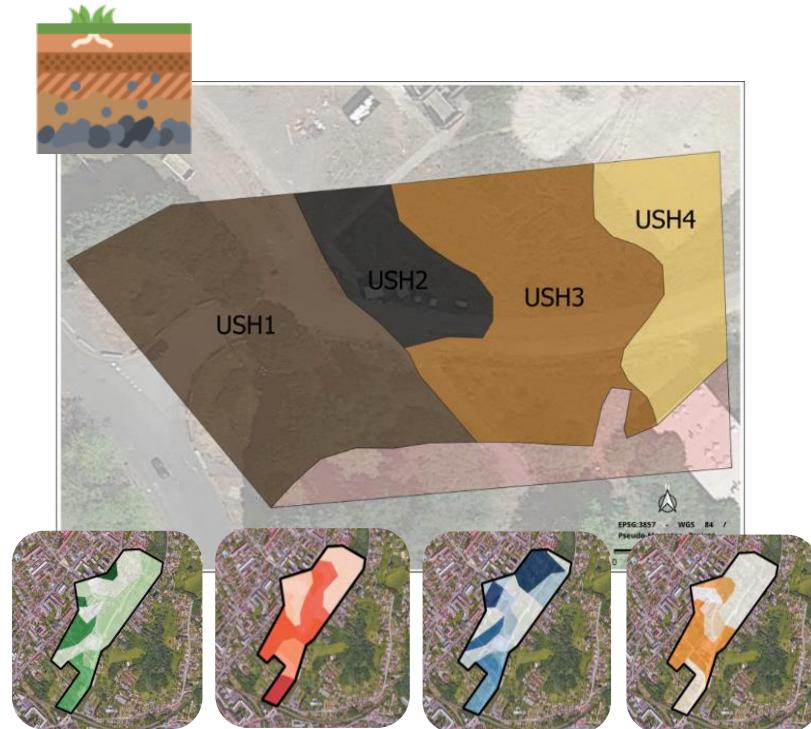
Dans l'idéal, carte des **risques** (et pas seulement de la pollution car danger ≠ risque)



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 urbains sont essentielles

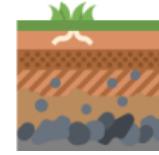
(<https://www.zones-humides.org/des-zones-humides-pour-les-villes-de-demain>)



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 ²	Homogène	2
1000 m ²	Hétérogène	5 à 6
10 000 m ²	Homogène	10
10 000 m ²	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



Les coûts de la restauration
des sols urbains

CIRED Working Paper
NP 2024-96-FR - December 2024

Mathilde Salin, Charles Claron, Bodie Nguyen-Rabot,
Nicola Mondolfo, Hervé Levrel

CIRED corresponding author: mathilde.salin@enrgis.enpc.fr

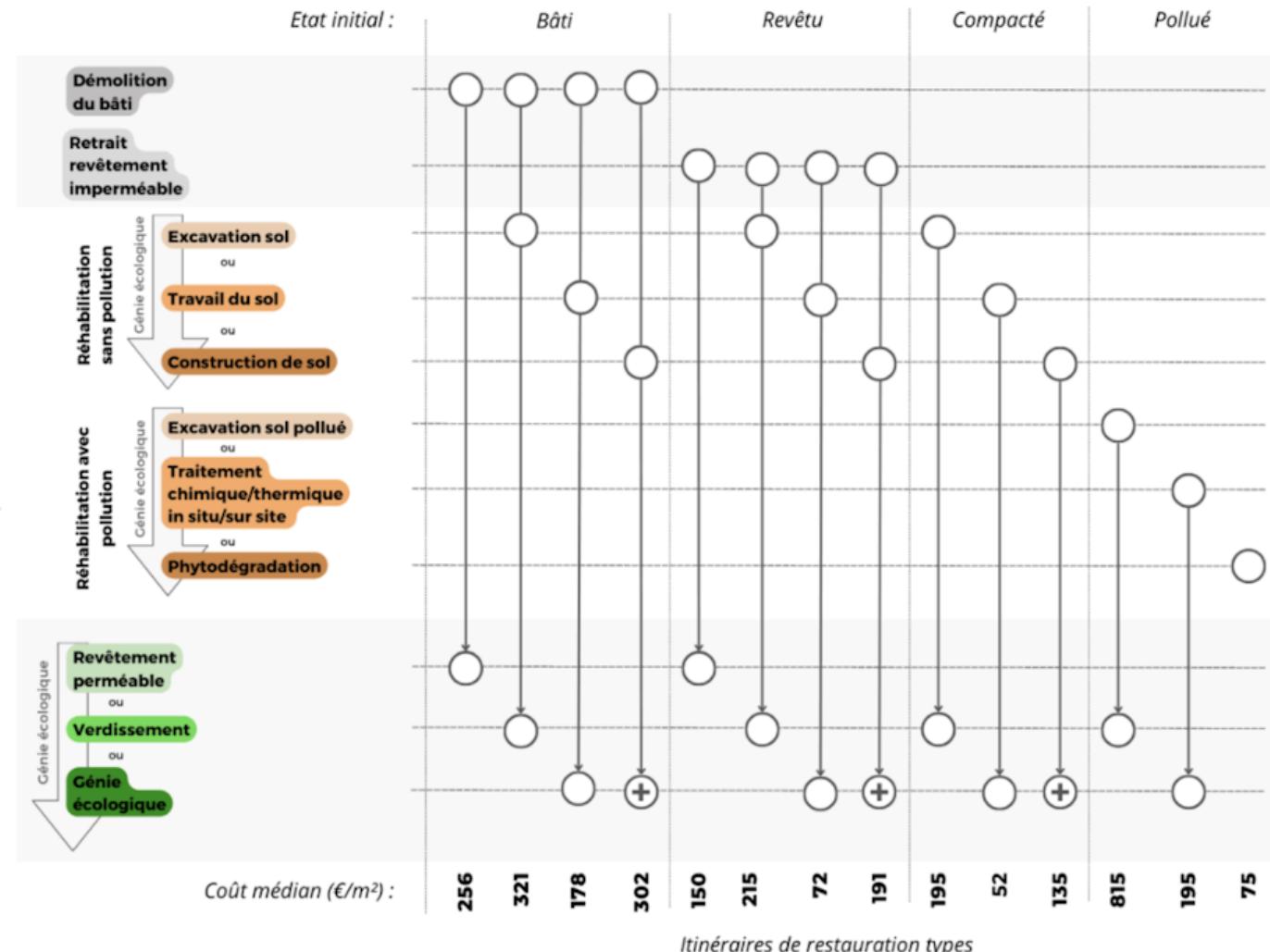
Preprint (not yet peer-reviewed or final version)



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. »