

# L'alliance entre les microorganismes et les plantes au cœur des enjeux de renaturation des sols dégradés

Stéphane Firmin, Elodie Cusset, Marc Legras,  
Isabelle Trinsoutrot-Gattin, Karine Laval



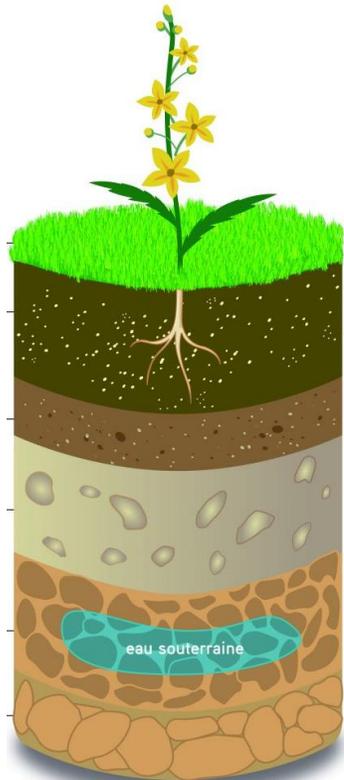
Ingénieurs  
& Vétérinaires

Séminaire de la chaire Usinovert – 17 novembre 2023 - Rouen



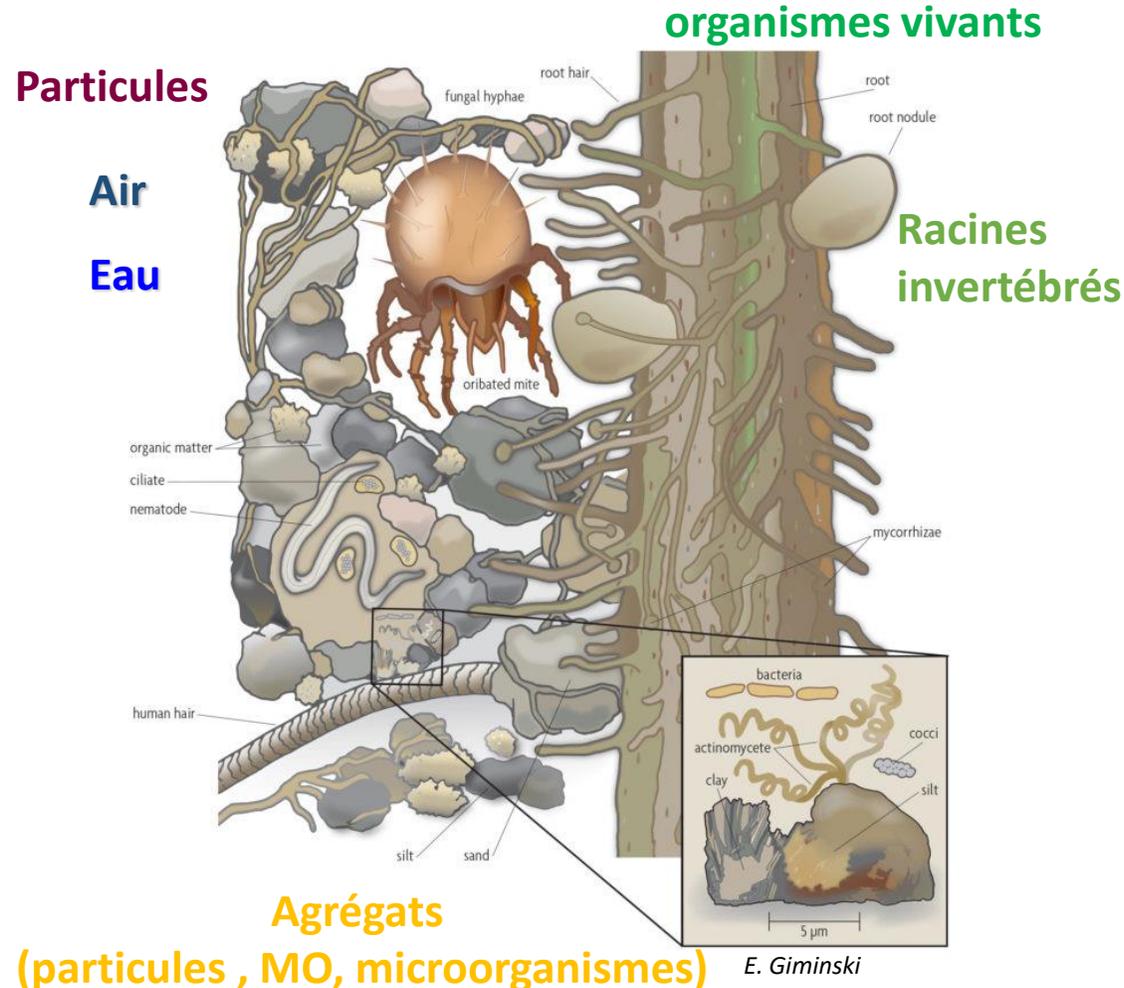
# Le sol : une ressource finie menacée

un long processus de formation



1 cm de sol / 100 -1000 ans

Un milieu complexe  
320 types de sols identifiés



Un réservoir de biodiversité  
(25% espèces décrites)



❖  $10^6 - 10^9$  Bactéries



❖  $10^4 - 10^6$  champignons



❖ 1 millions Protozoaires



❖ 2000 Nématodes



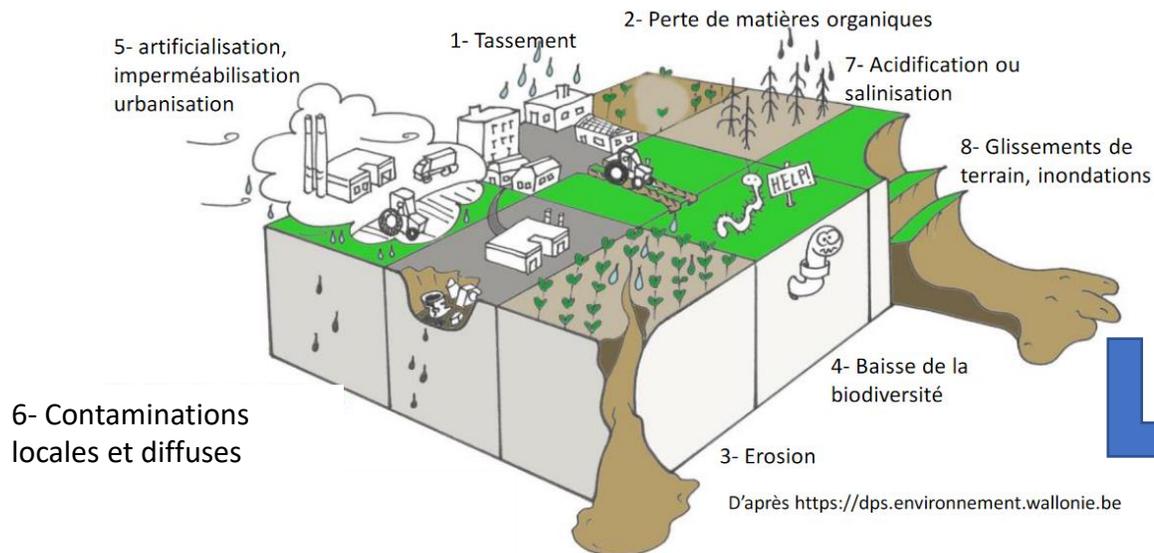
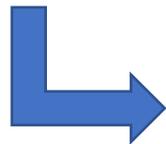
❖ 100 Oligochètes



❖ 5 Oligochètes

## □ Une pression démographique pesante sur les sols (Agriculture, urbanisation, industries, changement climatique)

### Menaces s'exerçant sur les sols



### Dégradation

**Perte des propriétés physico-chimiques ou biologiques intrinsèques du sol par des processus naturels ou anthropiques**

## □ Une situation préoccupante

- 1/3 des sols du monde dégradé à des degrés divers en 60 ans (IPBES 2018)
- 24 milliards de tonnes / an
- Surface d' 1 département / 10 ans à l'échelle de la France (ONB)
- 30 % des sols artificialisés – 90-150 000 hectares sont des friches urbaines

## Altération des fonctions écologiques du sol et ses services écosystémiques



## Impacts sur la sur la biodiversité et l'environnement

- Extinction des espèces  
Changements d'usage : 1<sup>re</sup> cause de l'érosion de la biodiversité terrestre (IPBES 2019)
- Accentuation du changement climatique et de ses effets  
(Augmentation de l'exposition aux risques naturels , insécurité alimentaire , émissions GES)
- Une ressource en eau moins abondante et de moins bonne qualité

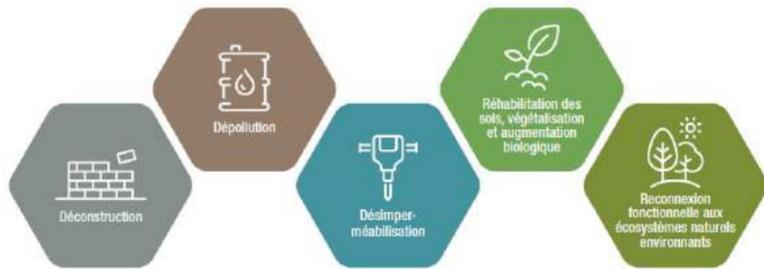
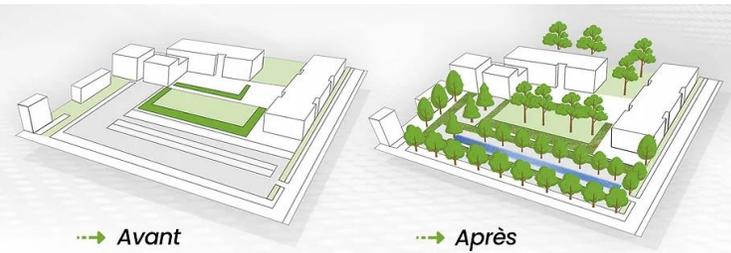
## Impacts sociaux économiques et sanitaires

- Migration massive (50 -700 million d'individus d'ici 2050)

**Gérer la dégradation des sols est une priorité justifiant le recours à des procédés capables de remettre en état les processus écologiques dégradés, endommagés ou détruits**

# Renaturer les sols : une opportunité pour rendre les villes plus durables

## Une solution de re-fonctionnalisation des sols



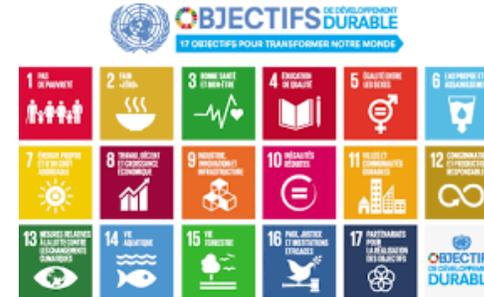
Objectifs de restauration axés sur une meilleure adéquation entre propriétés, fonctions et usages des sols

## Un accélérateur des transitions énergétiques et écologiques en ville



ADEME

## Un levier privilégié des politiques en matière d'urbanisme



Actu > Normandie > Seine-Maritime > Rouen

## À Rouen, les premiers chantiers de "renaturation de l'espace urbain" sont lancés

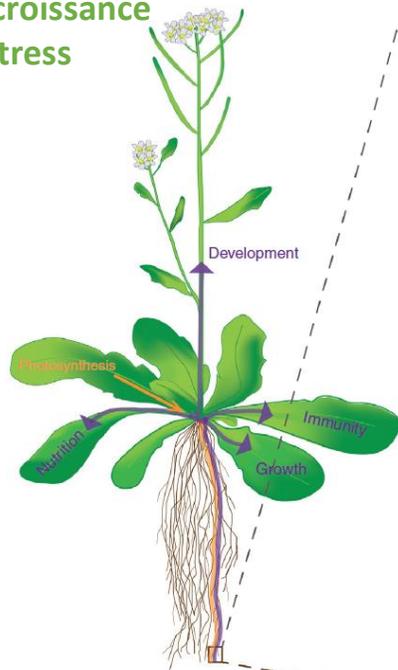
Les premiers chantiers décidés par la Ville de Rouen (Seine-Maritime), dans le cadre de son plan de renaturation, ont démarré, rue de la République et avenue de Bretagne.



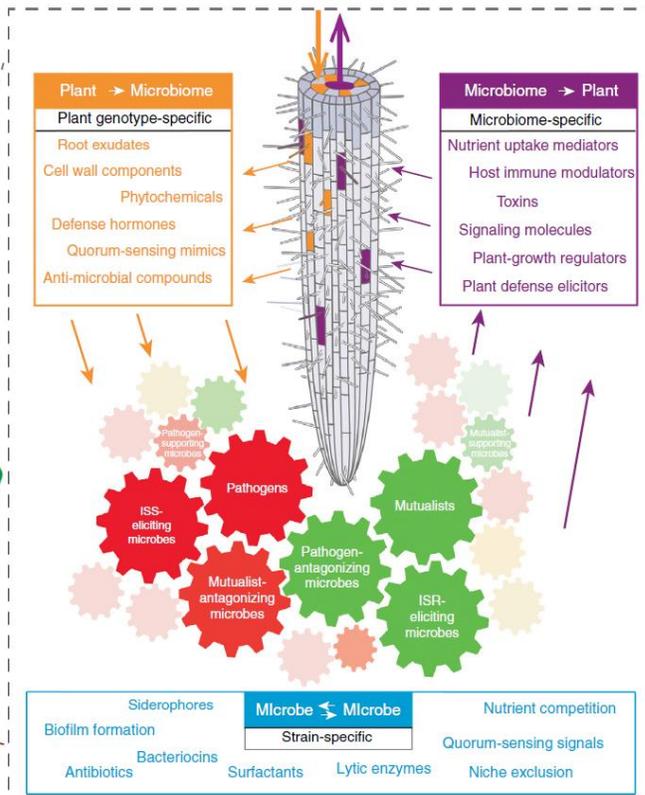
**Une stratégie innovante qui s'appuie sur les concepts de l'agroécologie**

## Moteur de croissance des plantes et de santé des sols

Stimulation de croissance  
Résilience aux stress  
Immunité

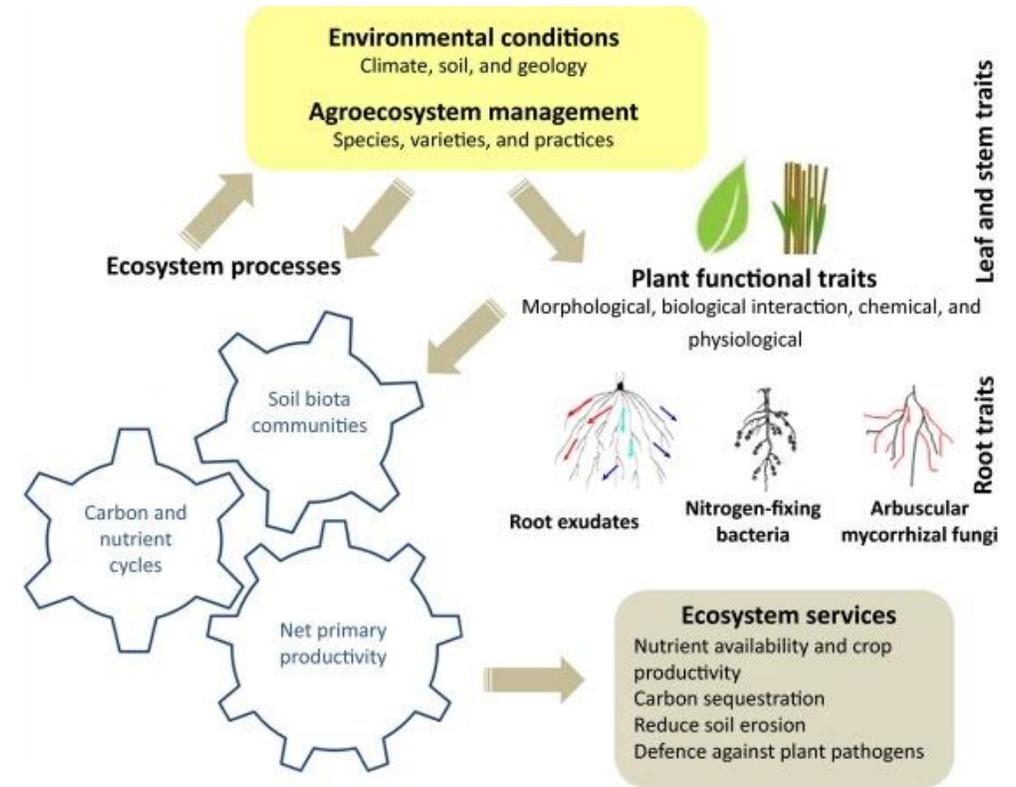


Une activité microbienne 2-20x supérieure dans la rhizosphère



Densité, diversité, communauté

Pietrese et al 2016



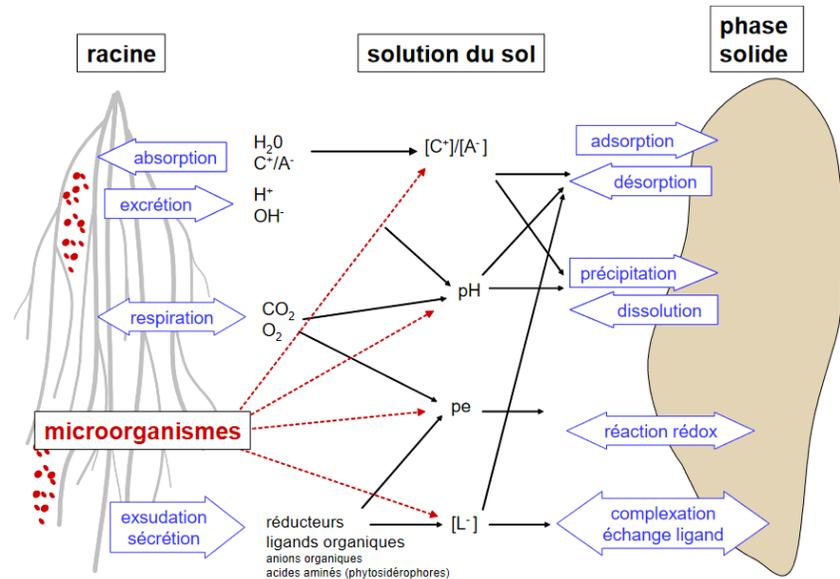
Faucon et al 2016

**Optimiser les interactions entre les plantes et microorganismes des sols est une piste prometteuse pour concilier les défis de la renaturation des friches urbaines**

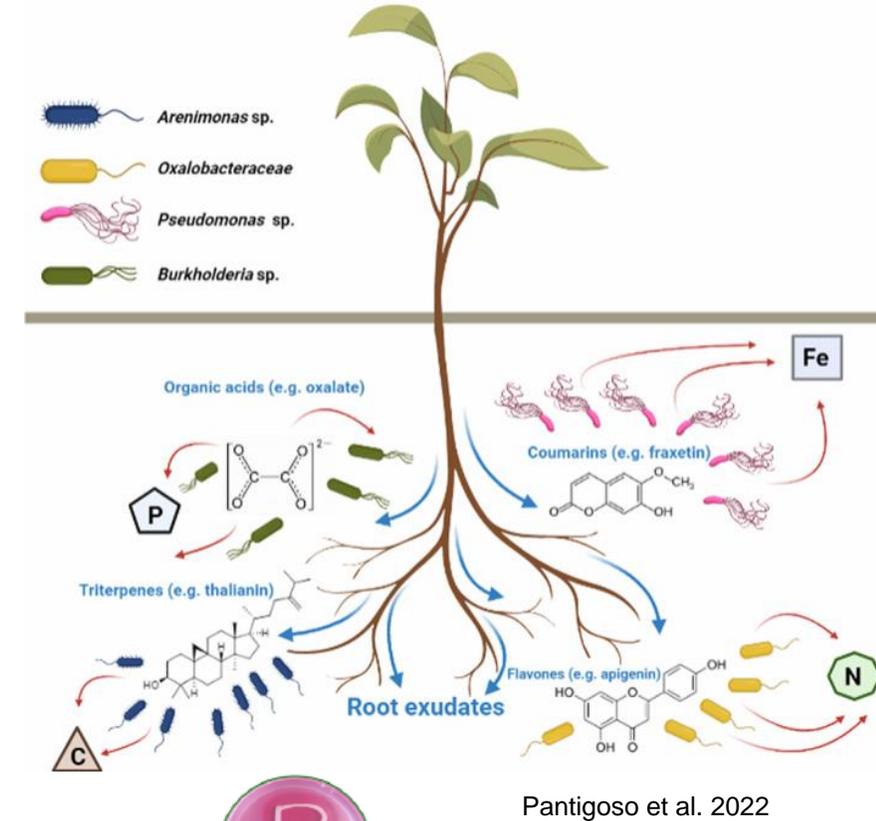
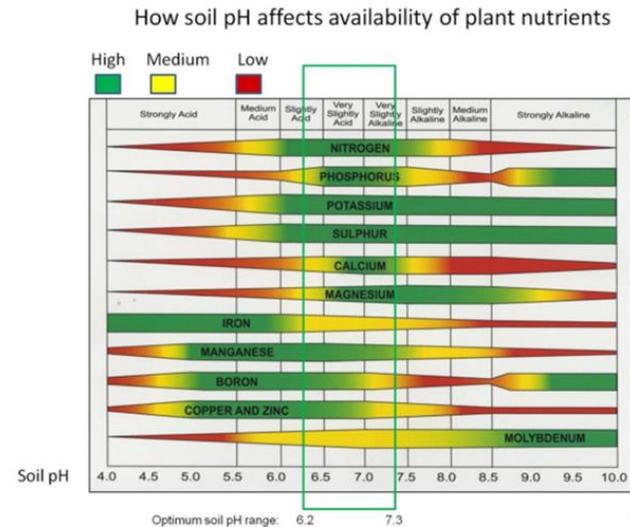
# Les bienfaits de l'interaction entre les microorganismes du sol et les plantes

## Le recyclage et biodisponibilité des nutriments

### Accroître la biodisponibilité des éléments nutritifs (exemple du phosphore)



Hinsinger et al. 2005

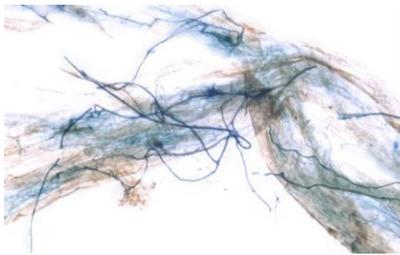


# Les bienfaits de l'interaction entre les microorganismes du sol et les plantes

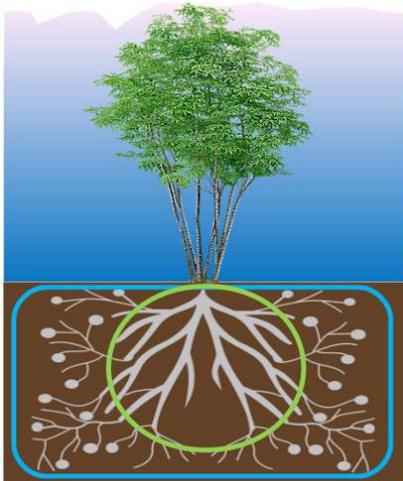
## Le recyclage et biodisponibilité des nutriments

**Symbioses mycorhiziennes** et **fixatrices d'azote**

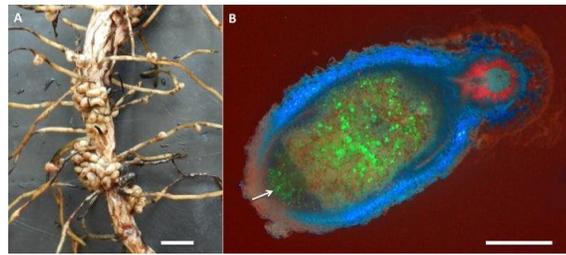
Très répandue ( 85% des espèces)



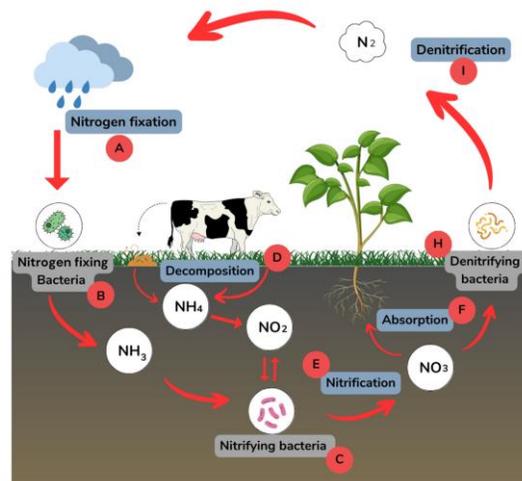
Accroître les surfaces prospectées & le réservoir utilisable



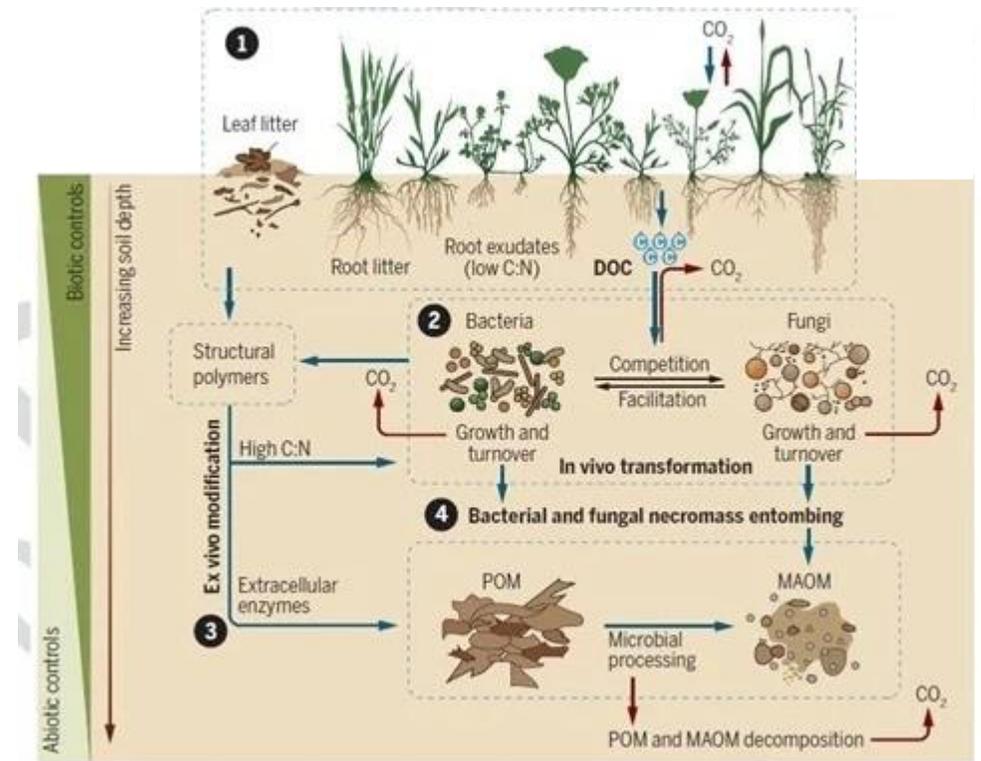
Jusque ( 96% N assimilé)



Renforcer la fixation d'azote



## Optimisation du stockage du carbone



Minéralisation accrue du carbone Bai al 2022

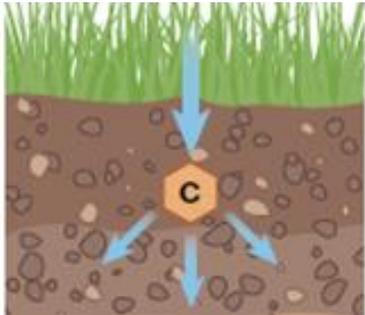
Brochado et al 2023

# Les bienfaits de l'interaction entre les microorganismes du sol et les plantes

## Le recyclage et biodisponibilité des nutriments

### Restaurer la fertilité biologique

#### Séquestration du carbone



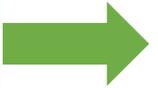
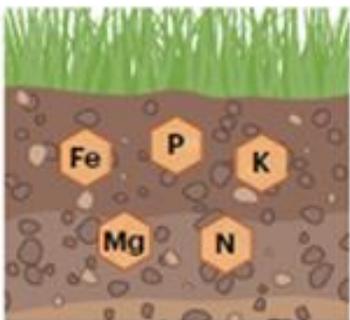
Adaptation au changement climatique

Régulation du climat local & global  
Création des puits de carbone & des îlots de fraîcheur  
Réduction des sources d'émissions GES

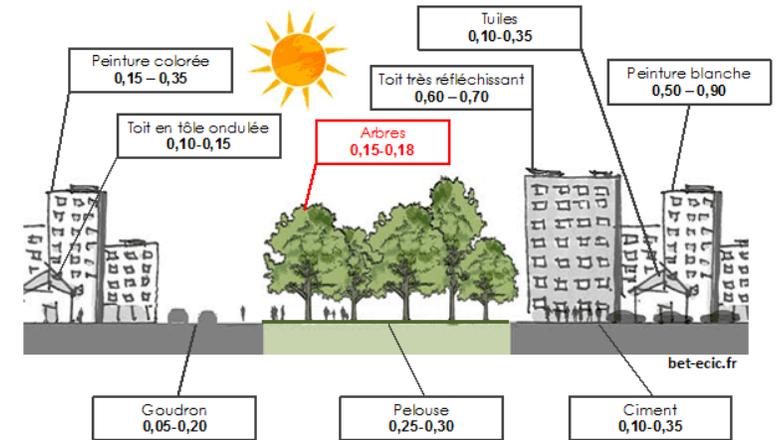
Santé et la qualité de vie

Création d'espaces végétalisés (récréatifs/ éducatifs)  
Amélioration de la qualité de l'air  
Amélioration du cadre de vie  
Création de lien social

#### Equilibre des nutriments



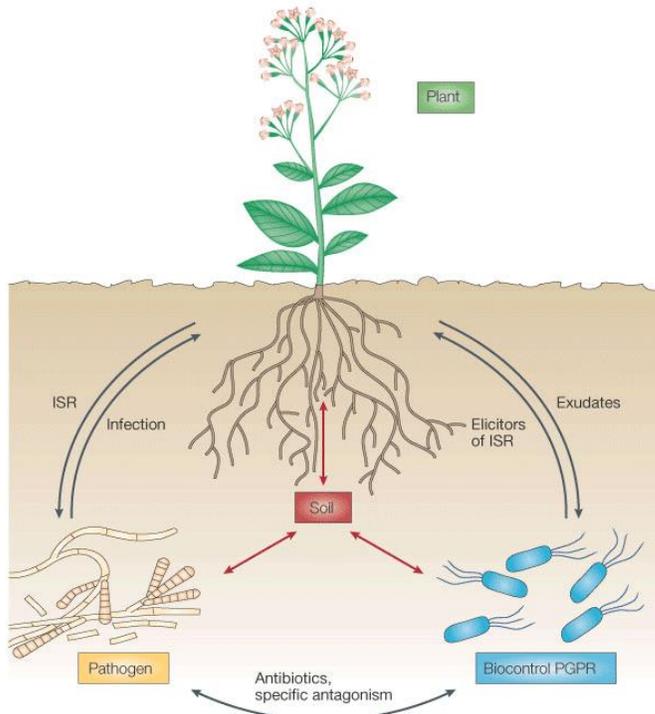
## Externalités pour les villes



# Les bienfaits de l'interaction entre les microorganismes du sol et les plantes

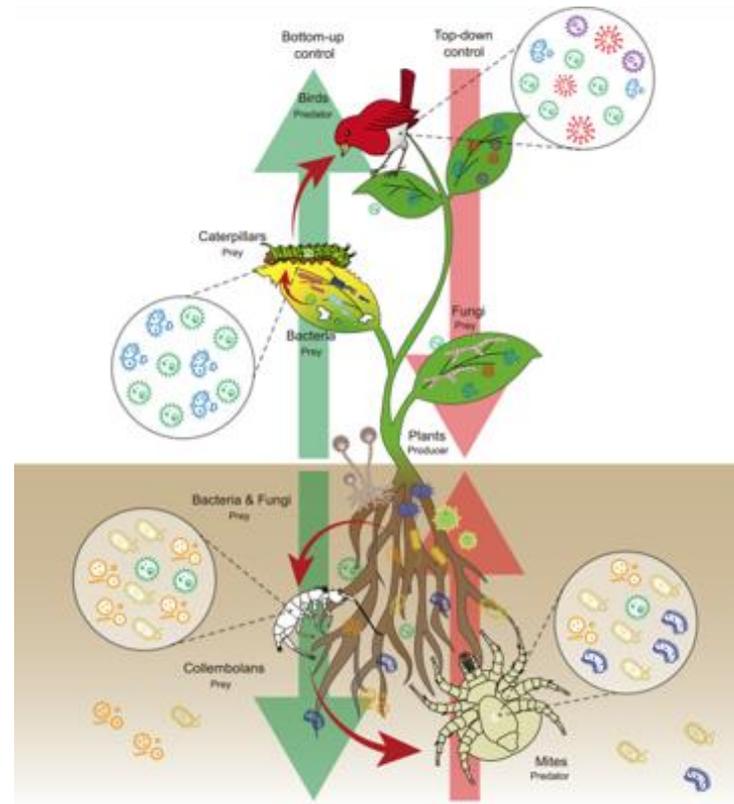
## Régulations biologiques

### Régulation des pathogènes (plantes – animaux)



Haas et al 2005

### Régulation trophique de l'écosystème terrestre



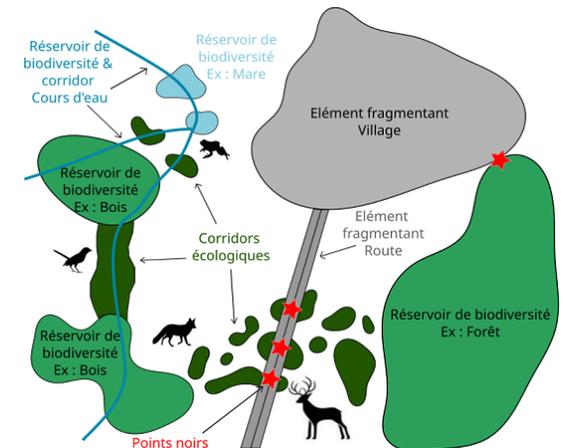
Haas et al 2005

## Externalités pour les villes

### Reconquête de la biodiversité

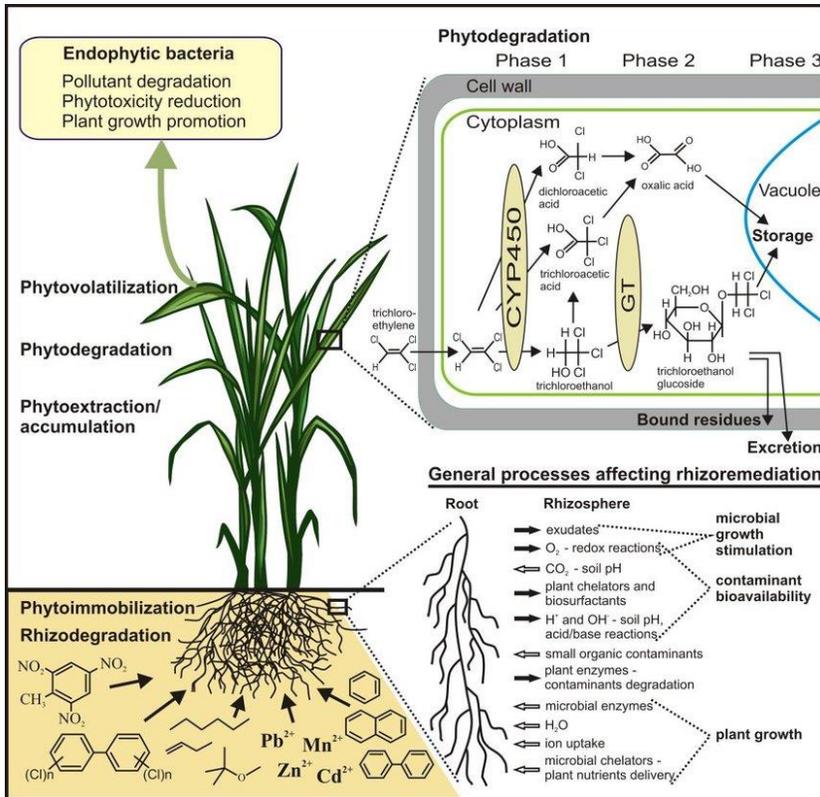


### Création de réservoir / refuges de biodiversité Assurer une continuité écologique

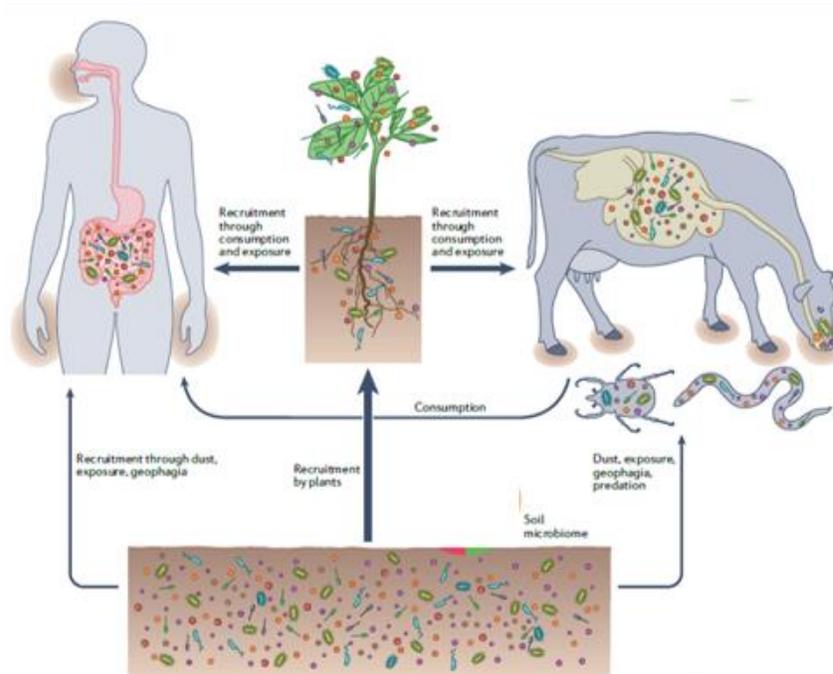


# Les bienfaits de l'interaction entre les microorganismes du sol et les plantes

## Influence du comportement des polluants Déterminant de la santé globale



Truua et al 2015



Banerjee et al 2022

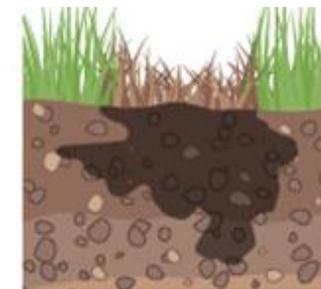
## Externalités pour les villes

Production / exploitation de la biomasse non alimentaire



Maitrise des risques

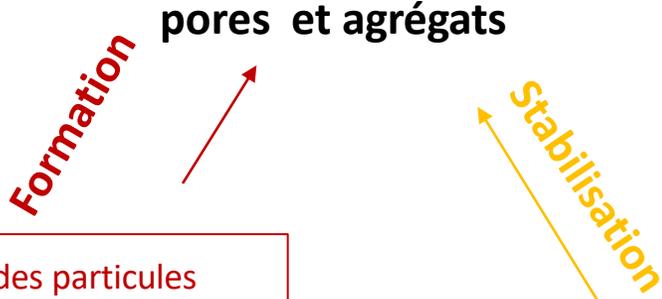
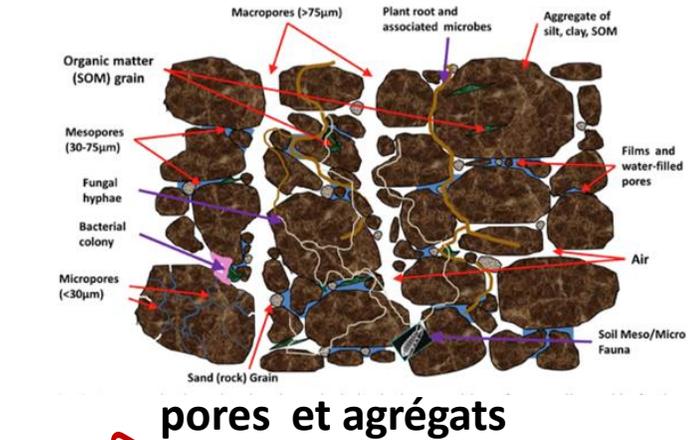
Remédiation des sols contaminés (usagers / professionnels) populations



Geophagia, dust, exposure

# Les bienfaits de l'interaction entre les microorganismes du sol et les plantes

## Des bénéfices sur la structuration physique du sol



Restauration de la fertilité physique



Déplacement des particules  
Pénétration racinaire & mycélienne  
Apport de MO bactérienne (50%)

Mucilages racinaires  
Glomaline, ergosterol

Hypes fongiques  
filaments d'actinomycètes

### Composés hydrophobes

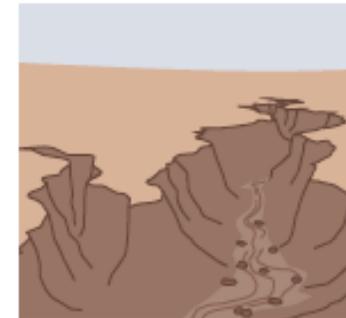
Substance	Source(s)
n-alkanes	bacteria, fungi, algae, higher plants
Olefines	bacteria, fungi, algae, higher plants
Terpenoides	many plant waxes
Monoketones	bacteria, higher plants
β-diketones	higher plants (e.g. eucalyptus, grasses)
Polyesters of hydroxy-fatty acids	higher plants (e.g. pines)

Doerr et al 2000

## Externalités pour les villes

### Réduction des risques

#### Erosion des sols



#### Gestion de l'eau pluviale



- Alimentation des nappes phréatiques
- Hydratation des sols
- Risque d'inondation

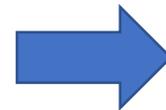
# Diagnostic de la qualité des sols : une étape clé pour le succès de la restauration

## Un diagnostic indispensable

Juger de la compatibilité entre le projet de réhabilitation de la friche et la qualité du sol

- Quelles sont les caractéristiques du sol qui sont impactées ou modifiées et qui devront être restaurées / améliorées ?
- Quelles sont les caractéristiques initiales du sol qui doivent être conservées ?
- Quelles sont les caractéristiques du sol non impactées mais qui doivent être améliorées ?
- Quels moyens à mettre en œuvre pour refunctionaliser un sol urbain ?

Quel sol pour quel usage ?



## Une boîte à outils....

Déterminer des paramètres physiques, chimiques et biologiques des sols

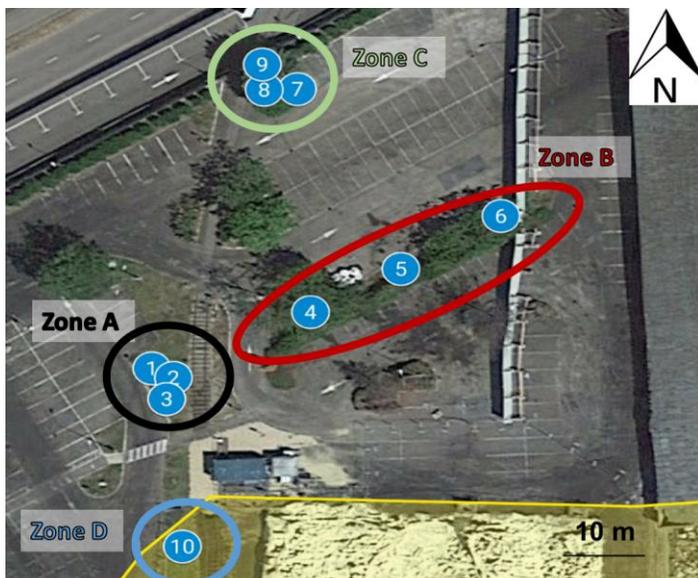
(BIO)INDICATEURS	CONNAITRE
<b>ANALYSE DE TERRE PHYSICO CHIMIQUE</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Le Réservoir des éléments chimiques</li><li>• Les Caractéristiques physiques et chimiques du sol</li></ul>
<b>INDICATEURS LIÉS AU C ET N</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Carbone labile/stable</li><li>- Ressources microbiennes</li><li>- Carbone vivant</li><li>- Azote labile/stable</li><li>- Azote biologiquement minéralisable</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Le garde à manger du sol pour ses habitants et la culture à court, moyen et long terme</li><li>• Le cycle du Carbone (stockage, recyclage, transformation)</li></ul>
<b>BIOINDICATEURS MICROBIOLOGIQUES ET DE LA FAUNE DU SOL</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Abondance microbienne</li><li>- Équilibre champignons / bactéries</li><li>- Diversité des bactéries et champignons</li><li>- Activités enzymatiques</li><li>- Abondance et diversité des vers de terre, carabidés collemboles et nématodes</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• La Biodiversité,</li><li>• La transformation des éléments dans le sol (cycles des nutriments)</li><li>• La décomposition des matières organiques</li><li>• La stabilité structurale, l'Infiltration de l'eau</li><li>• La durabilité du système</li></ul>

....Pour une évaluation de la multi-fonctionnalité des sols

## Zone de l'étude et stratégie d'échantillonnage

2 campagnes de prélèvements de sol  
(horizon 0-30 cm - 02/22 - 03/23)  
17 échantillons

Stagiaires C Visticot & L Vuilleminot



## Objectif : réaliser un diagnostic des fonctions initiales du sol pour orienter le choix des aménagements du site

3 fonctions du sol évaluées :

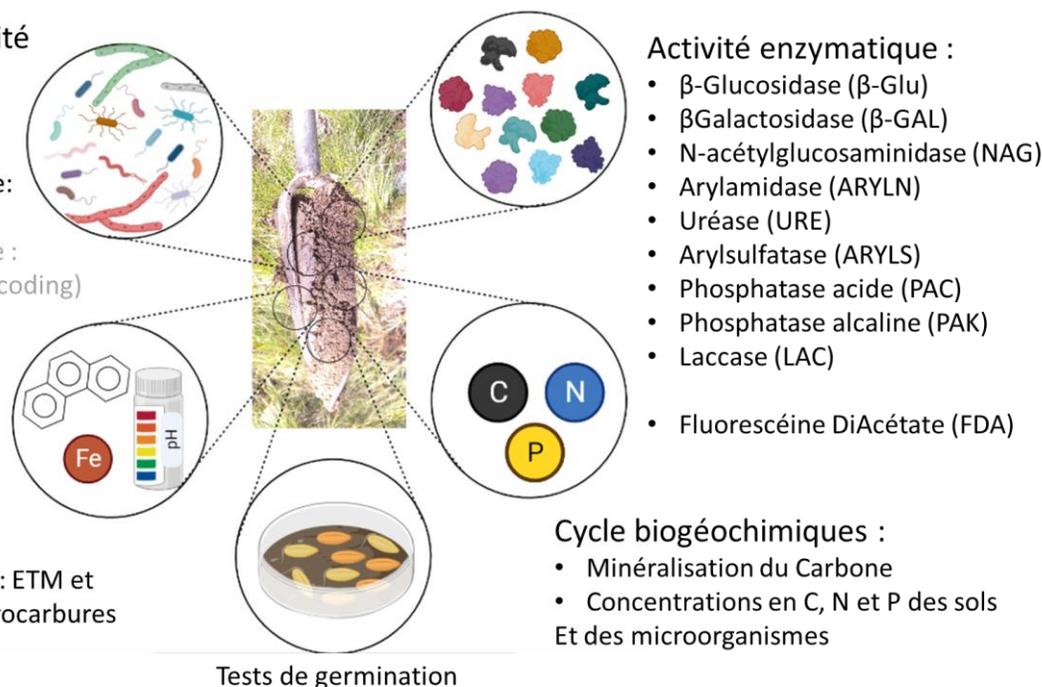
- Recyclage et transformation de la MO
- Rétention et fourniture des nutriments
- Habitat

Abondance et diversité microbiennes:

- Ratio Champignons / bactéries par qPCR
- Diversité fonctionnelle: biolog
- Diversité taxonomique : Séquençage (métabarcoding)

Caractéristiques physicochimiques:

- pH
- Capacité au champ
- présence de polluants: ETM et organiques (HAP, Hydrocarbures totaux)



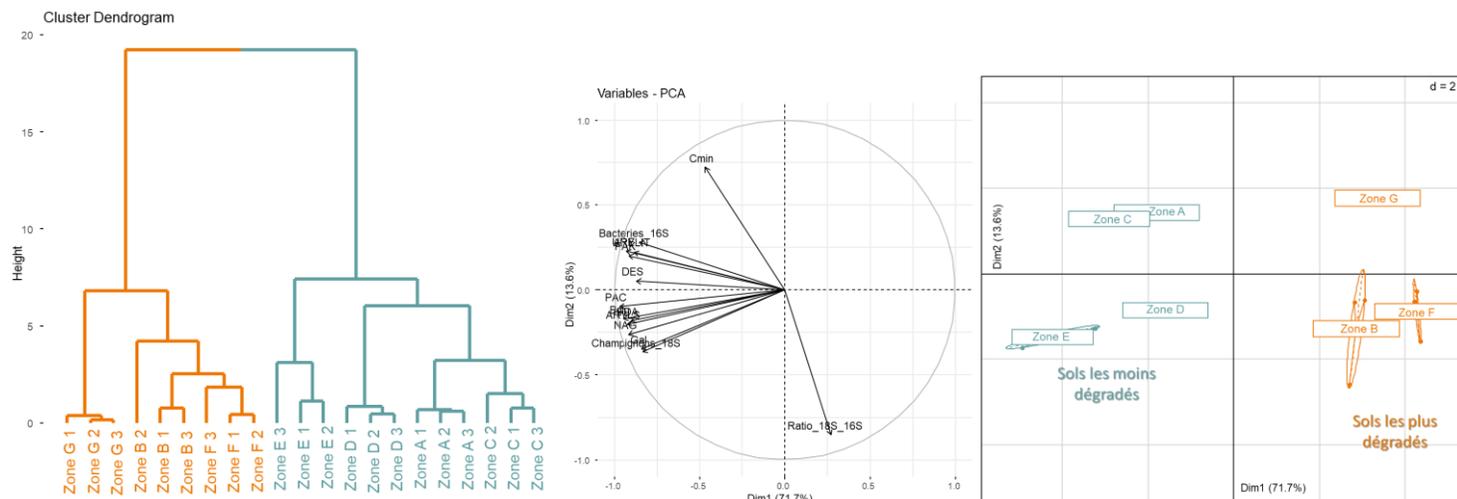
## Principaux résultats

Des valeurs de fond pédo-géochimique anthropisé - Anomalies anthropiques en ETM HAP pour 2 échantillons (Référentiels ASPITET / BDSoLU)

Un sol hétérogène

Les indicateurs des 3 fonctions altérés pour les échantillons les plus contaminés

Pas d'effet des sols sur la réponse germinative des plantes candidates pour le phytomanagement du site



Référentiel national AGHYLE (sols agricoles)								
Indicateurs	Unité	Nombre observations du référentiel	Très faible	Faible	Moyen	Elevé	Très élevé	Hors référentiel
C org	%	798	0	0	0	0	6	15
ADN total	µg/g	1010	9	0	0	0	8	4
ADNr 18S	copies/g	504	7	6	8	0	0	0
ADNr 16S	copies/g	539	13	6	2	0	0	0
Béta-Glu	nmol PNP/min/g	1018	6	3	0	0	9	3
AryIN	nmol β-NAPH/min/g	975	0	6	0	1	12	2
AryIS	nmol PNG/min/g	56	0	0	3	0	0	18
PAC	nmol PNP/min/g	292	0	6	1	2	0	12

## Perspectives

Poursuivre le déploiement des indicateurs:

- Suivi pluriannuel des paramètres biologiques
- Recherche de nouveaux indicateurs

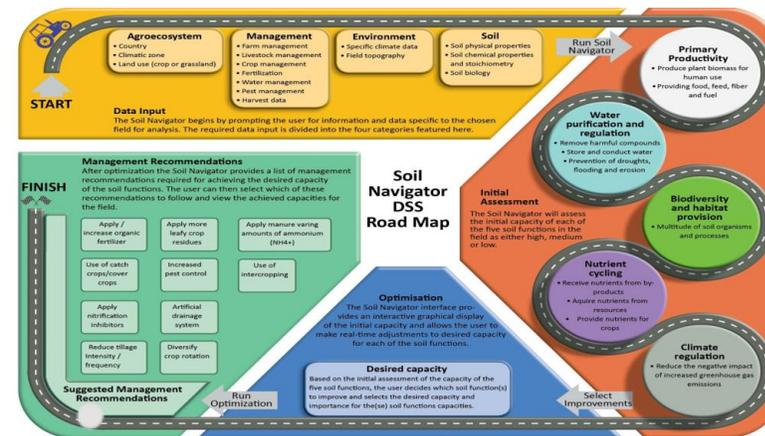
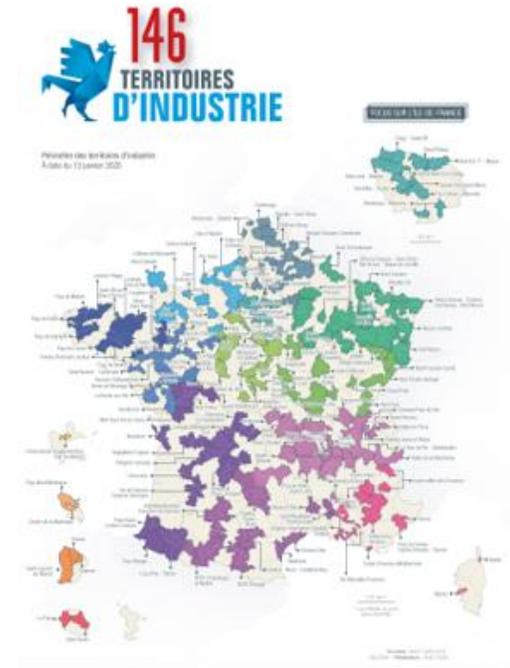


- Evaluation de nouveaux modes de gestion des sols
- Efficience écologique
- Evaluation des services écosystémiques

## Méthodologie



Site atelier



LANDMARK

SOIL NAVIGATOR



- ❑ Les plantes et microorganismes telluriques interagissent au travers de processus écologiques complexes capables de modifier les propriétés physicochimiques & biologiques des sols
- ❑ Cette alliance constitue un levier agroécologique qui permet de maintenir et d'améliorer les fonctions écosystémiques rendus par les sols
- ❑ Comprendre ces interactions et leur effets sur les fonctions du sol est nécessaire pour évaluer l'impact de la dégradation et proposer des solutions pertinentes pour agrader les sols urbains
- ❑ L'intégration et le suivi des paramètres biologiques du sol est indispensable pour évaluer la qualité des sols urbains lors d'une opération de renaturation

# Merci pour votre attention

