

# Le monde des microorganismes au service des productions agricoles



L Ranjard  
UMR Agroécologie, INRA Dijon

Journée d'échanges  
l'Agriculture de Conservation  
20 décembre 2018



# Les sols rendent de très nombreux services...

## Croissance des végétaux

Les sols, c'est la vie !



## Régulation du cycle de l'eau



## Habitat Ressources génétiques



## Réserve de matériaux



## Régulation de l'atmosphère



## Epuration de l'eau



5-10 trillion \$ / an

d'après Blanchart et al.

Dans le contexte agricole

Produire autant voire plus, mais mieux !

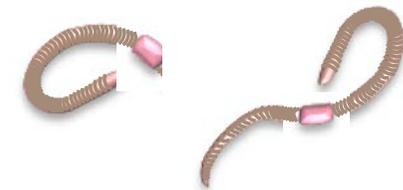


Sol



simple support inerte de production

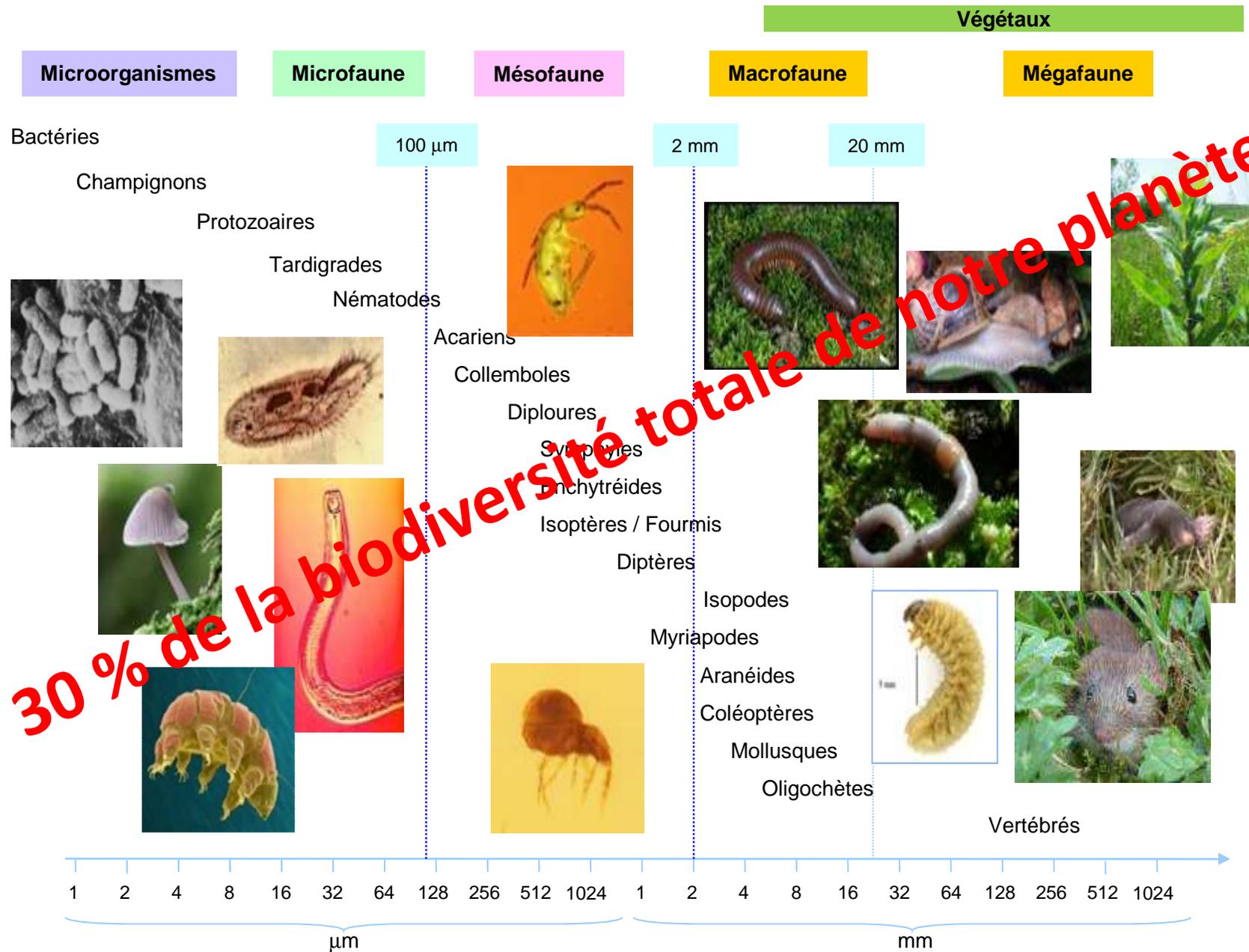
Ecosystème avec un **patrimoine biologique**  
à même de rendre des **services** pour les sociétés humaines



**Agroécologie**

**Sol = Bras de levier pour créer des systèmes de culture innovants**

# Le sol est un milieu « vivant »

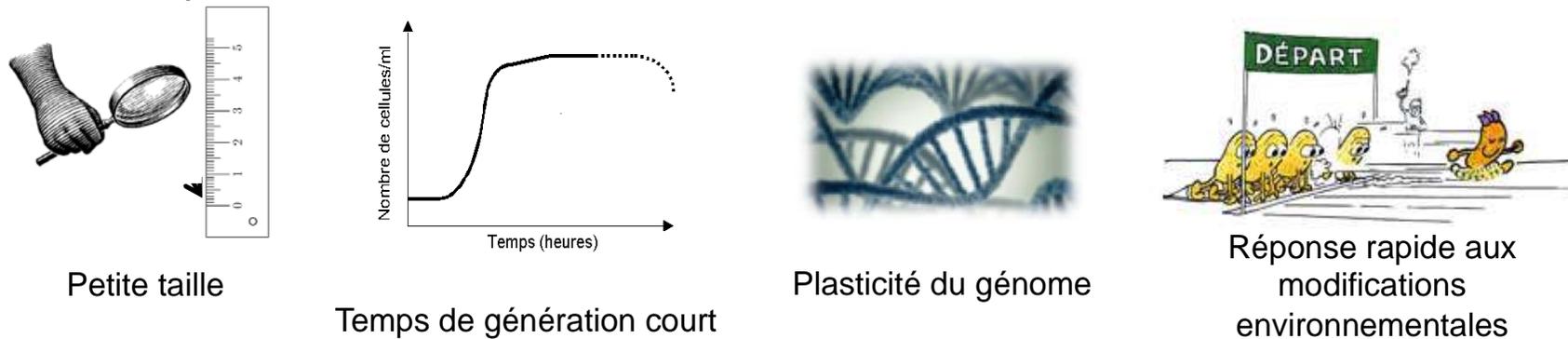


# Les micro-organismes, acteurs essentiels de la qualité des sols

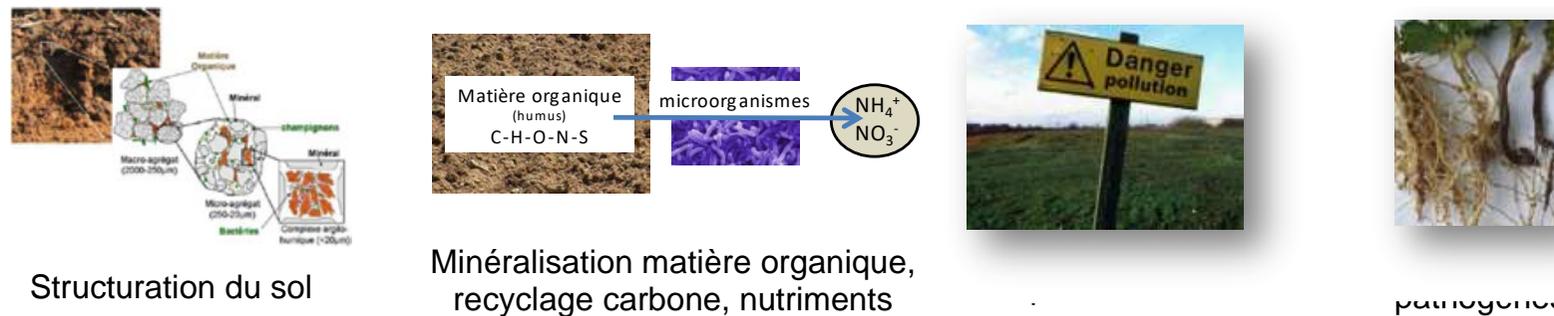
## 1- Enorme abondance & diversité



## 2- Enorme capacité d'adaptation



## 3- Implications dans de nombreuses fonctions



# Le sol, une mosaïque d'habitats pour les micro-organismes

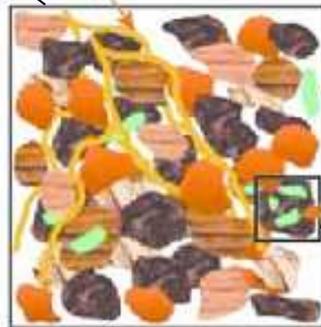
Matrice hétérogène et structurée

Particules minérales agrégées par du ciment organique

Horizon organique



Racines



1 mm  
Macroagrégats du sol

Particules organiques de source externe

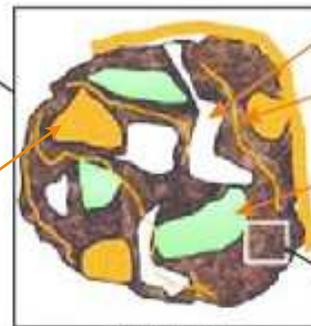
Particules organiques de source interne

Pore

Hyphes fongiques

Particule organique

Grain de sable

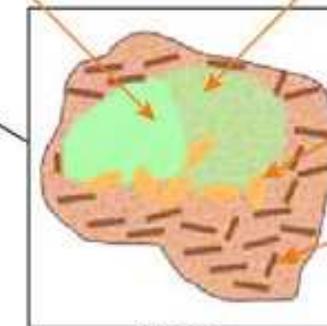


0,1 mm  
Macroagrégats du sol

Mat. org. humifiée

Cellules bactériennes

Minéraux argileux

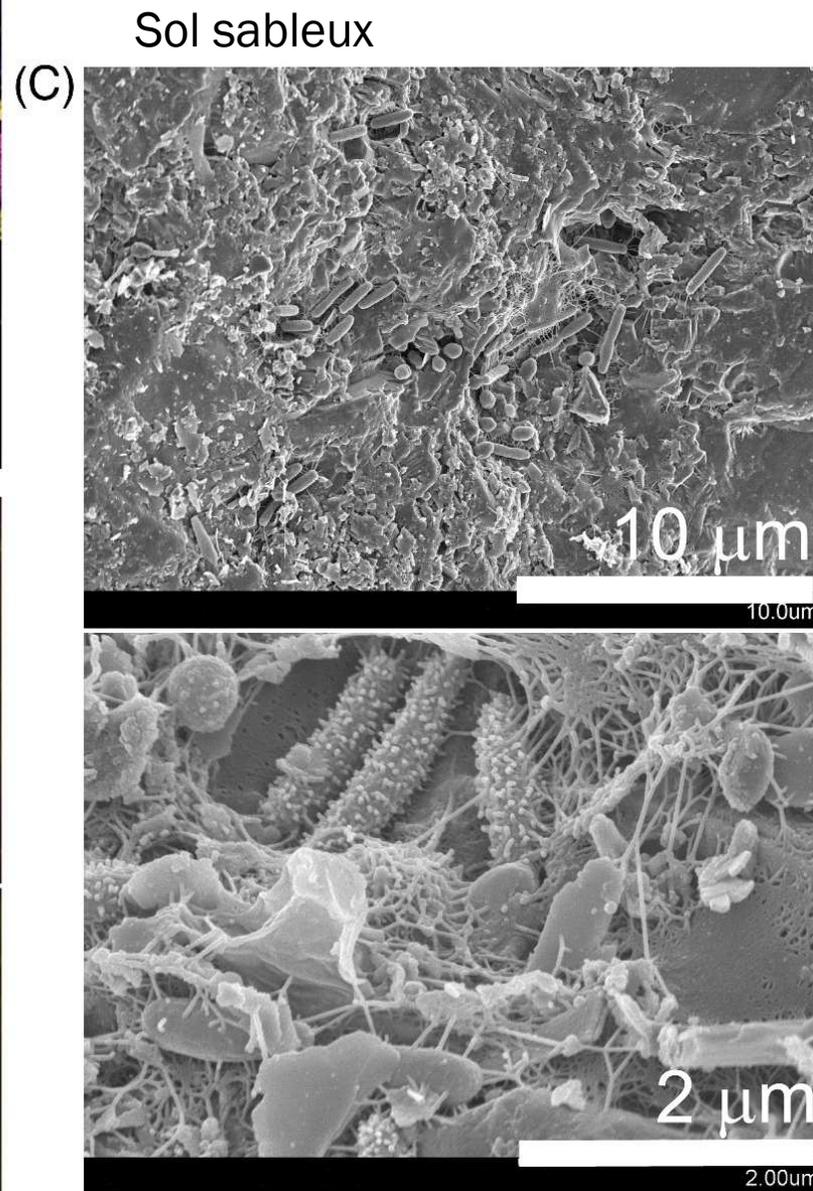
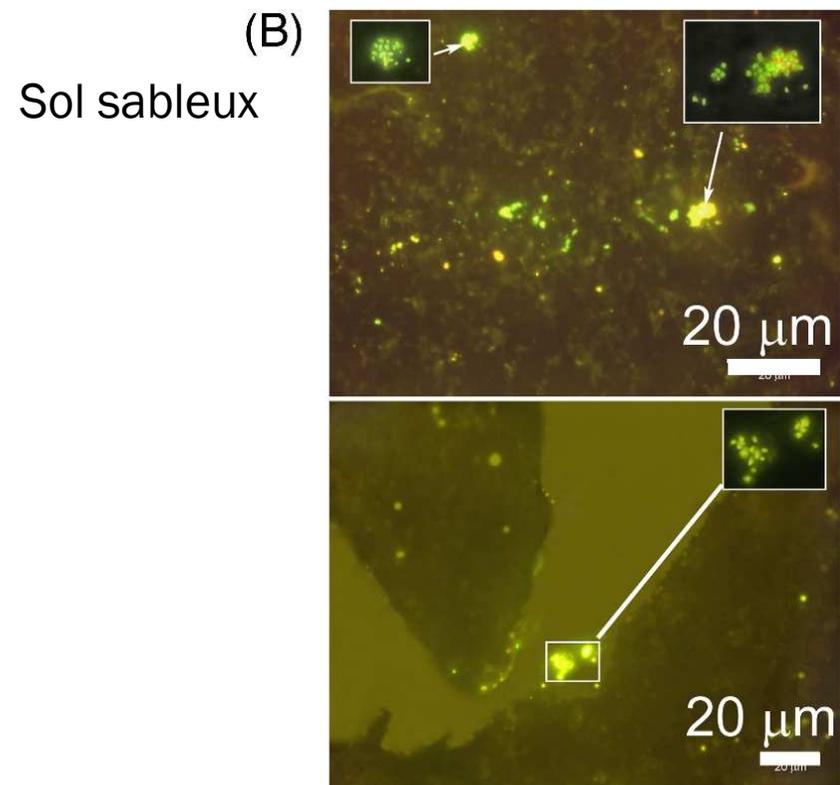
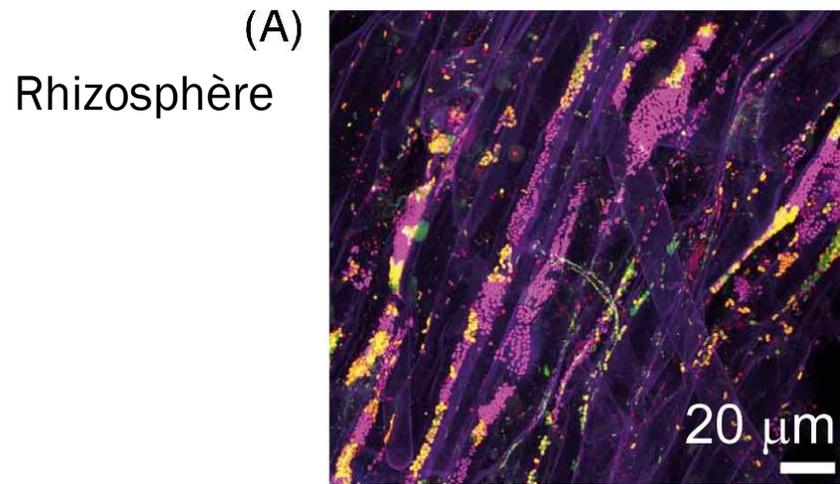


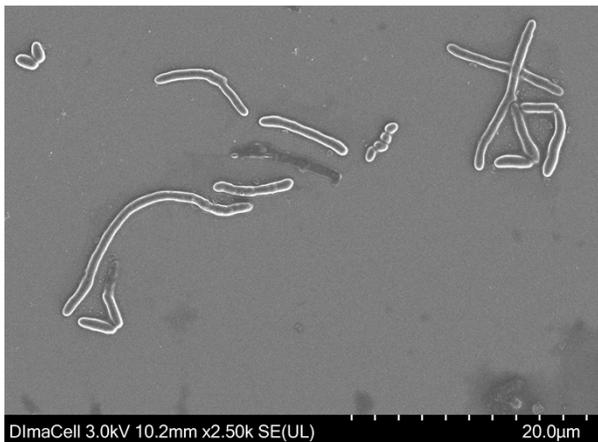
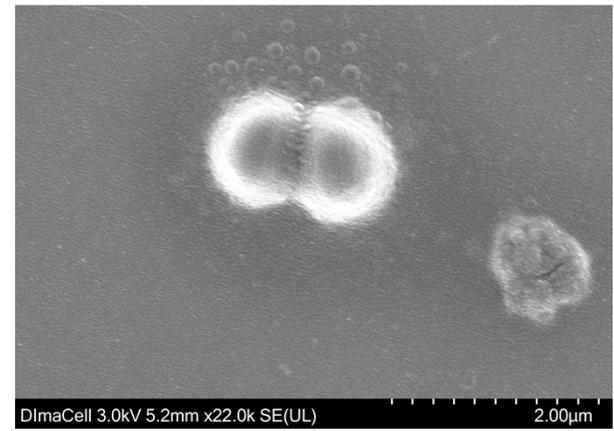
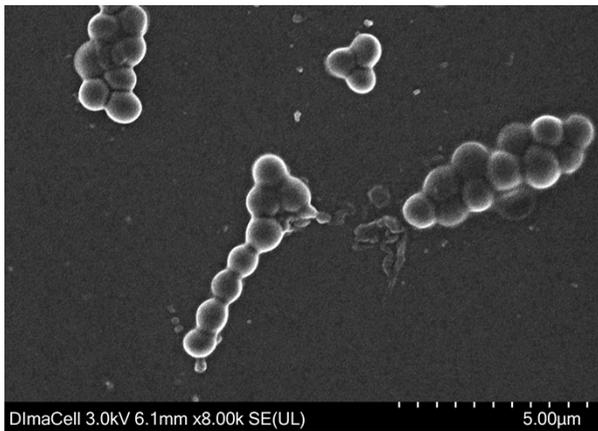
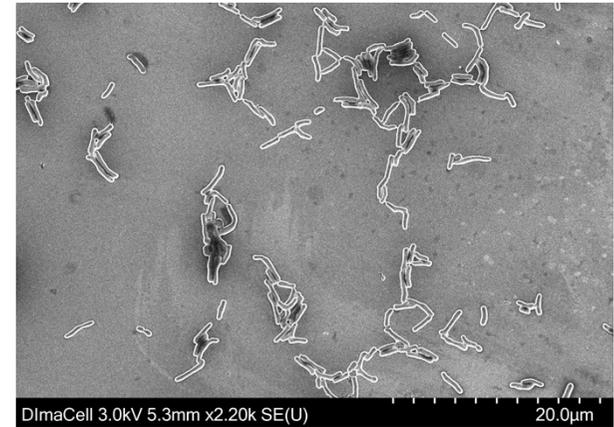
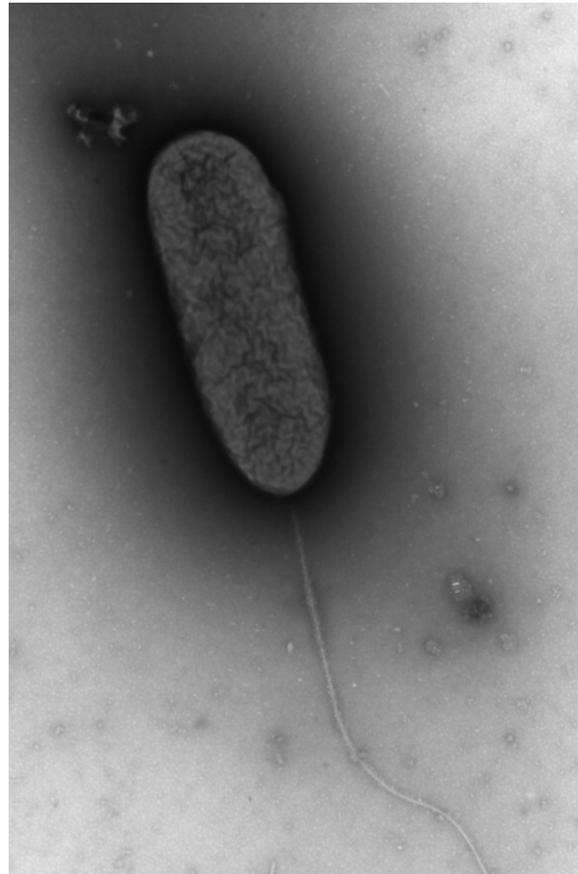
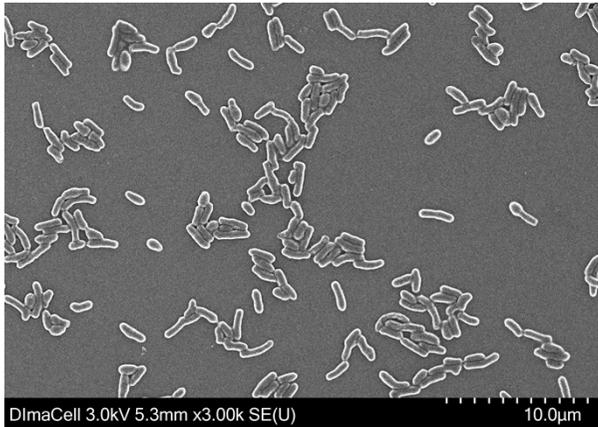
10 µm  
Complexe argile- mat.org.



Agrégats = micro-habitats pour les micro-organismes

# Le sol, une mosaïque d'habitats pour les micro-organismes

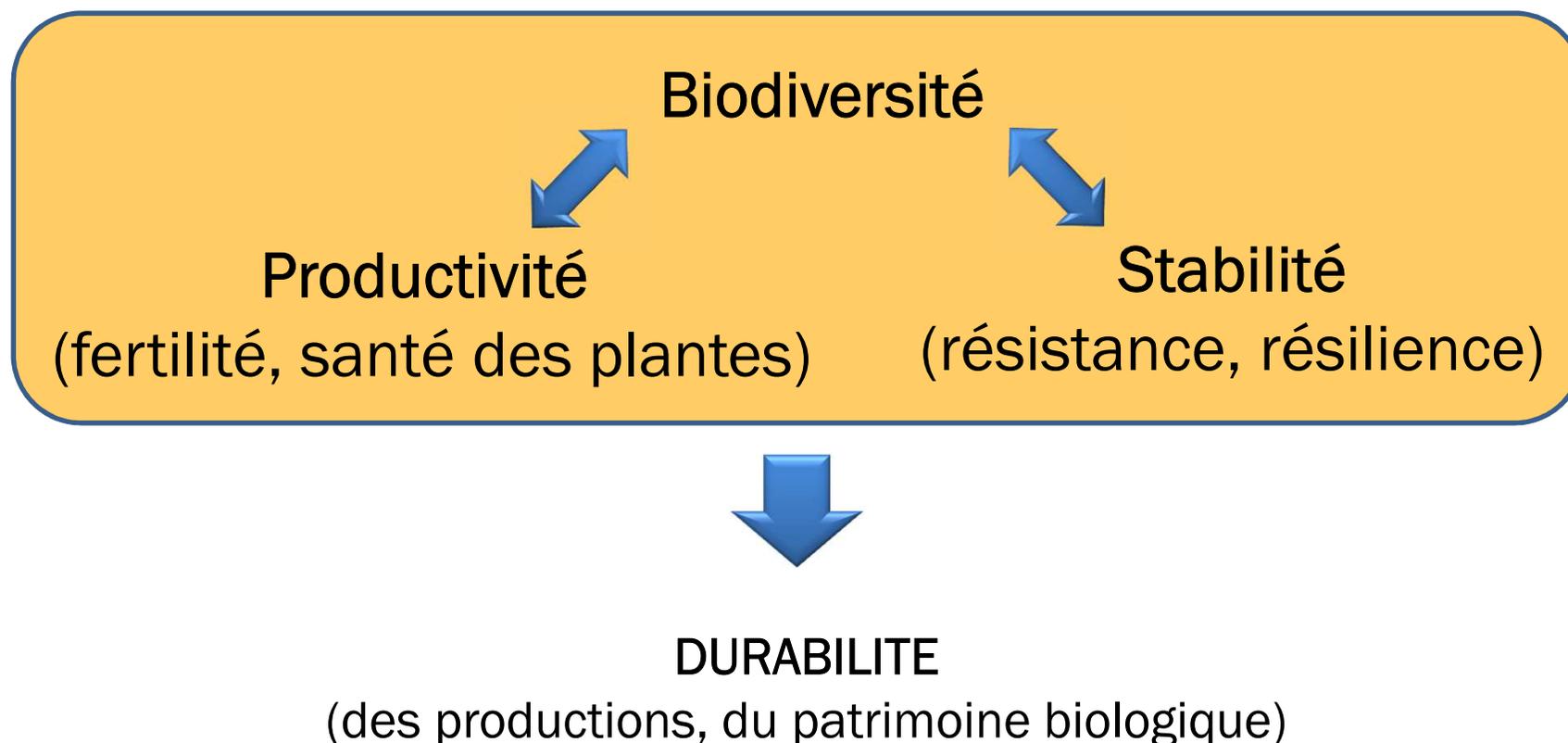




Des formes et des tailles variées!

## La biodiversité , une assurance pour l'avenir !

Une loi écologique forte : l'assurance écologique (Loreau 2000)



Biodiversité = assurance à court et moyen termes

# Des preuves expérimentales!

Sol



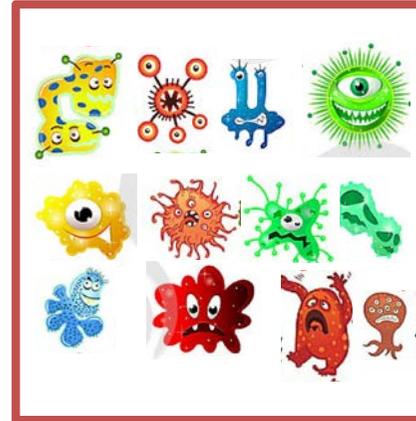
Diminution (dilution) de la biodiversité microbienne en laboratoire



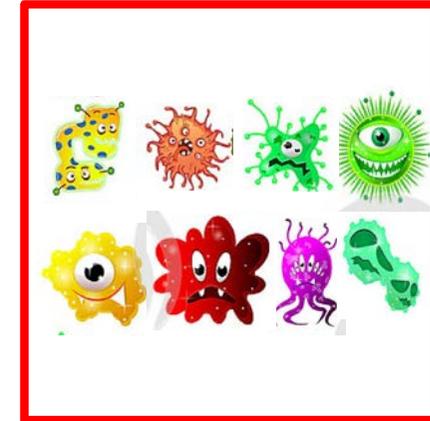
Diversité élevée



Diversité moyenne  
(-30% d'espèces)



Diversité faible  
(-50% d'espèces)



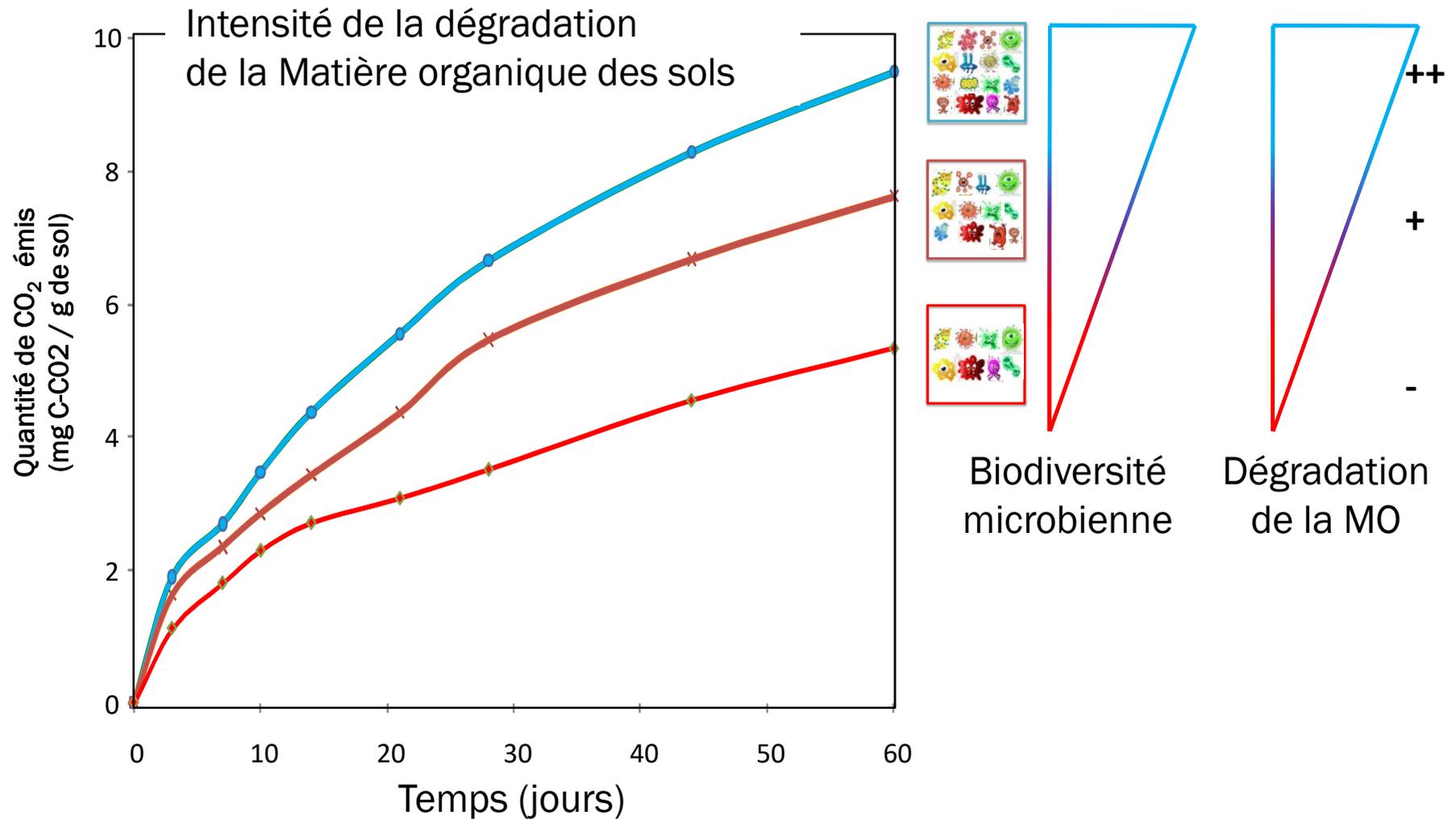
Minéralisation de la matière organique

Stabilité structurale

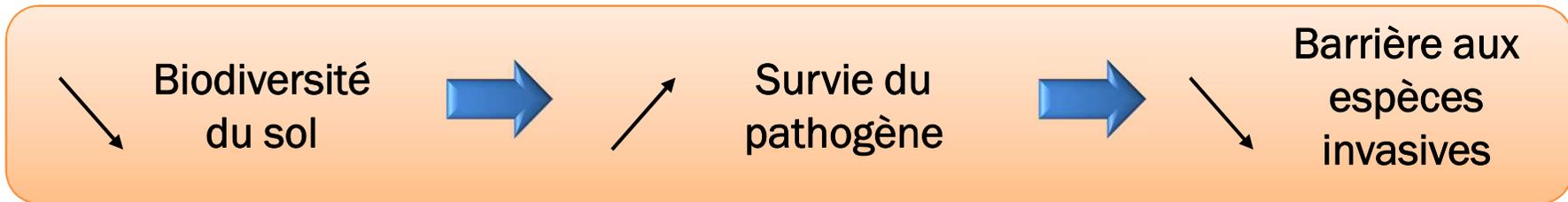
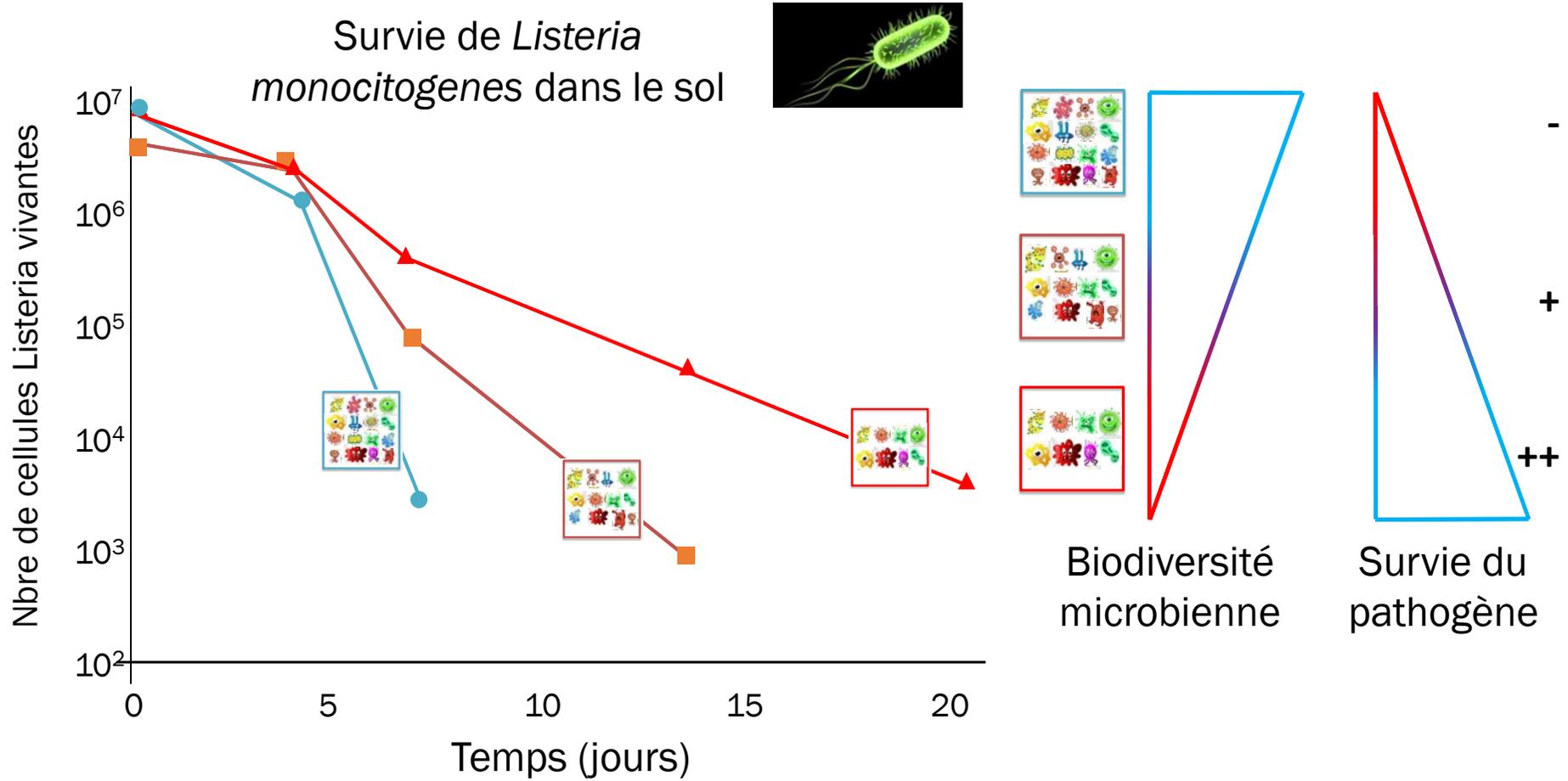
Croissance végétale

Colonisation des pathogènes

# Diversité microbienne et minéralisation de la matière organique du sol



# Diversité microbienne et qualité sanitaire des sols



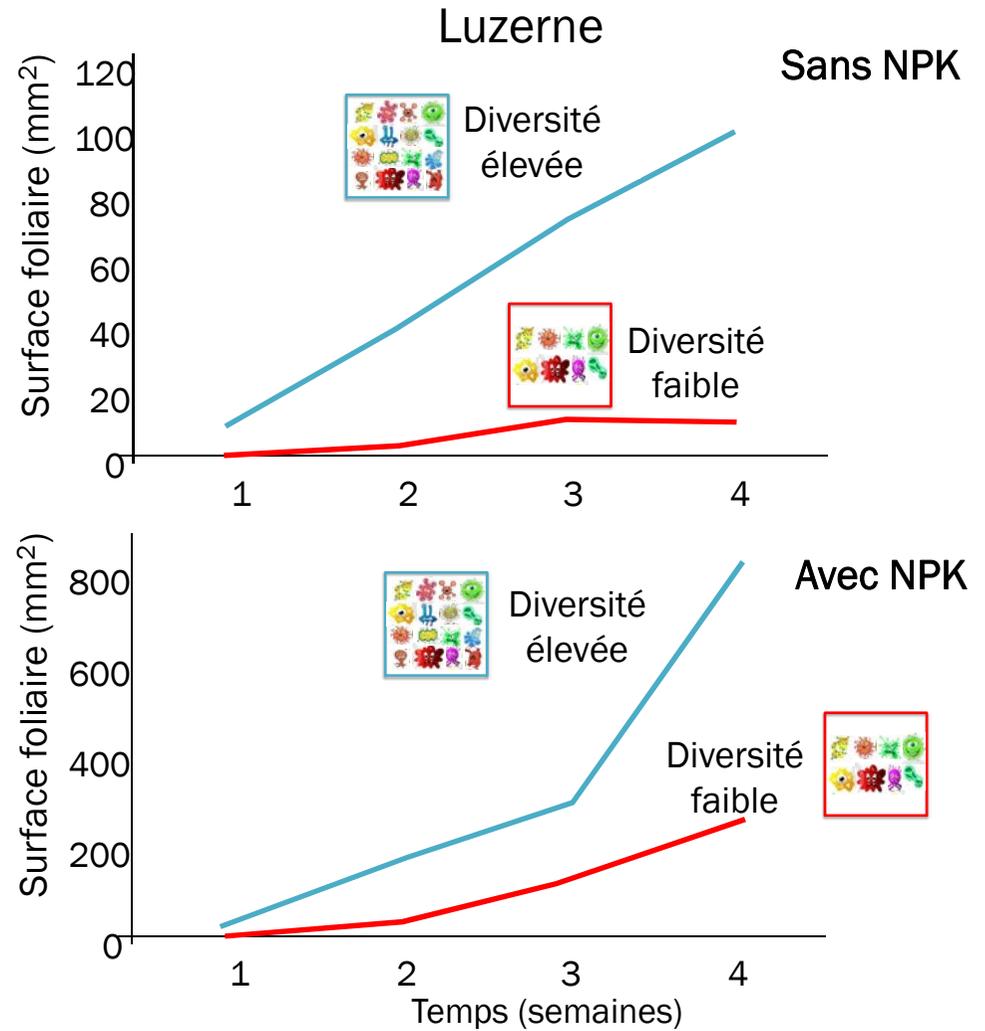
# Diversité microbienne et production végétale



Biodiversité faible

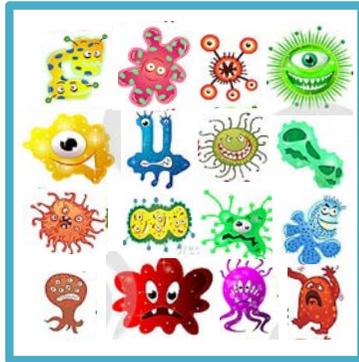


Biodiversité élevée

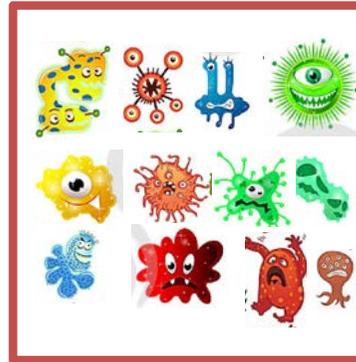


# Diversité microbienne et structure du sol

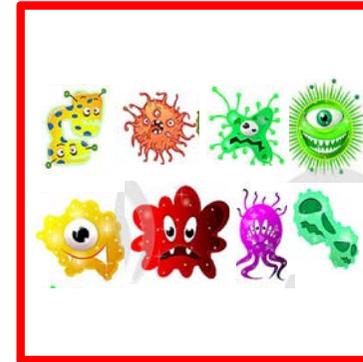
Diversité élevée



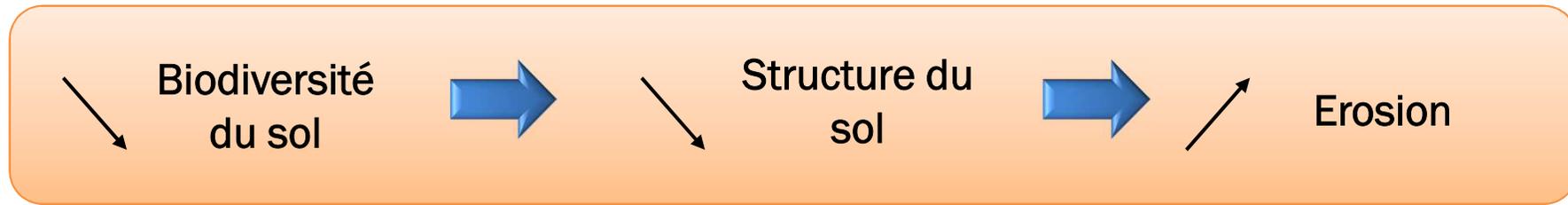
Diversité moyenne  
(-30% d'espèces)



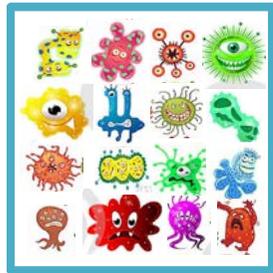
Diversité faible  
(-50% d'espèces)



Slack-test



# Des preuves expérimentales!

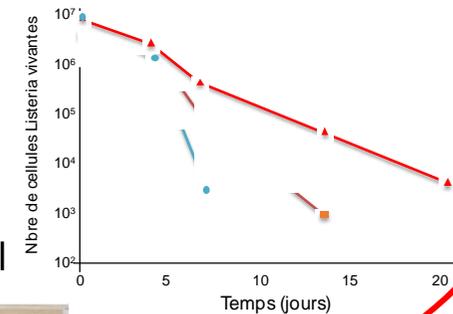


Baisse de 30% de la diversité microbienne du sol

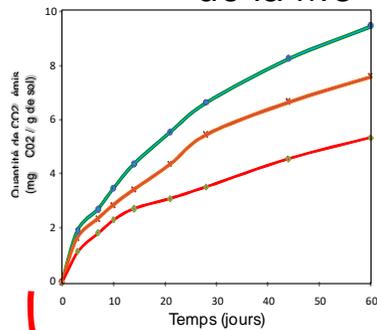


x3

du temps de survie des pathogènes



-40% de minéralisation de la MO



-50% de la productivité végétale



-50% de la stabilité structurale du sol

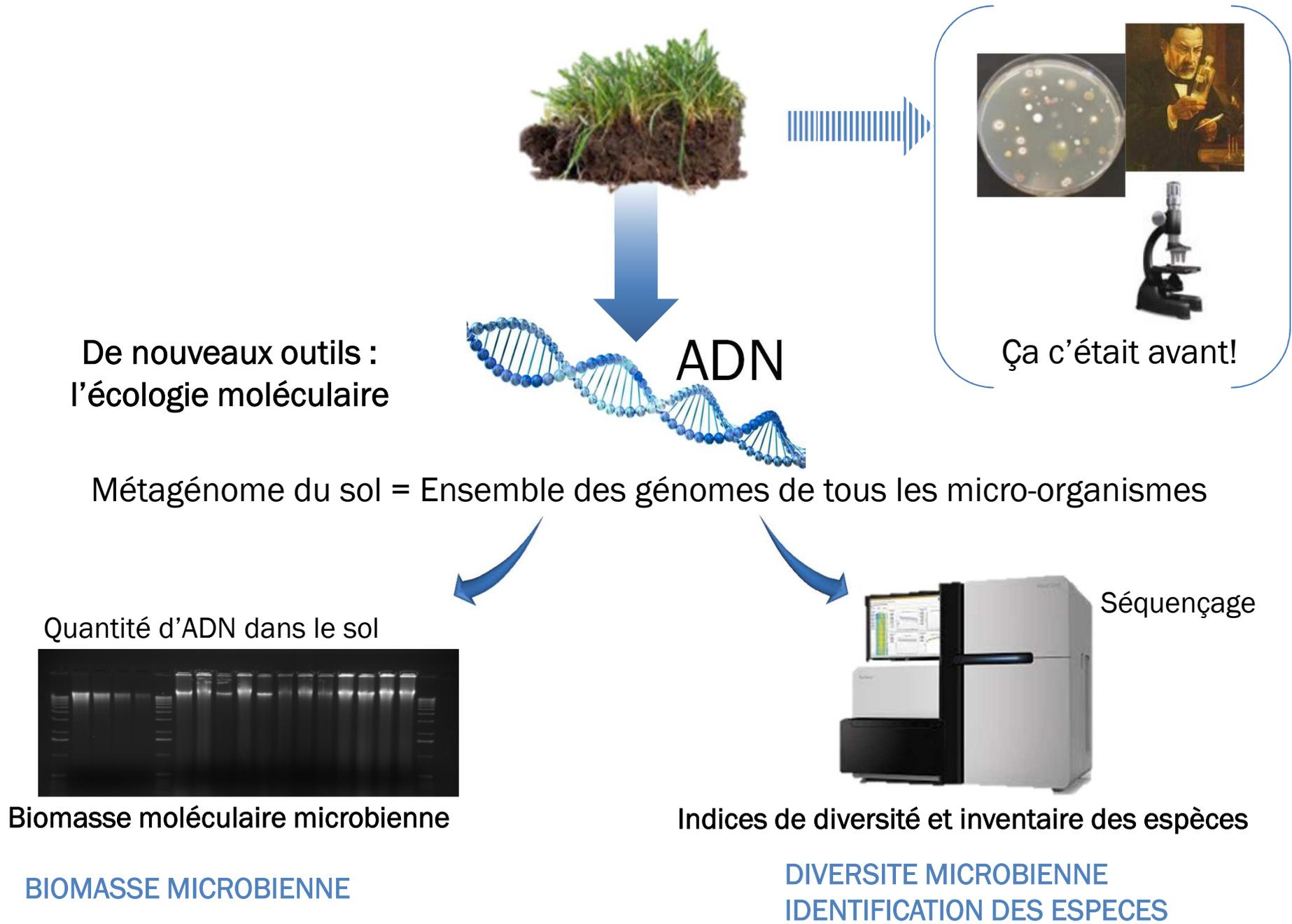


Etat sanitaire

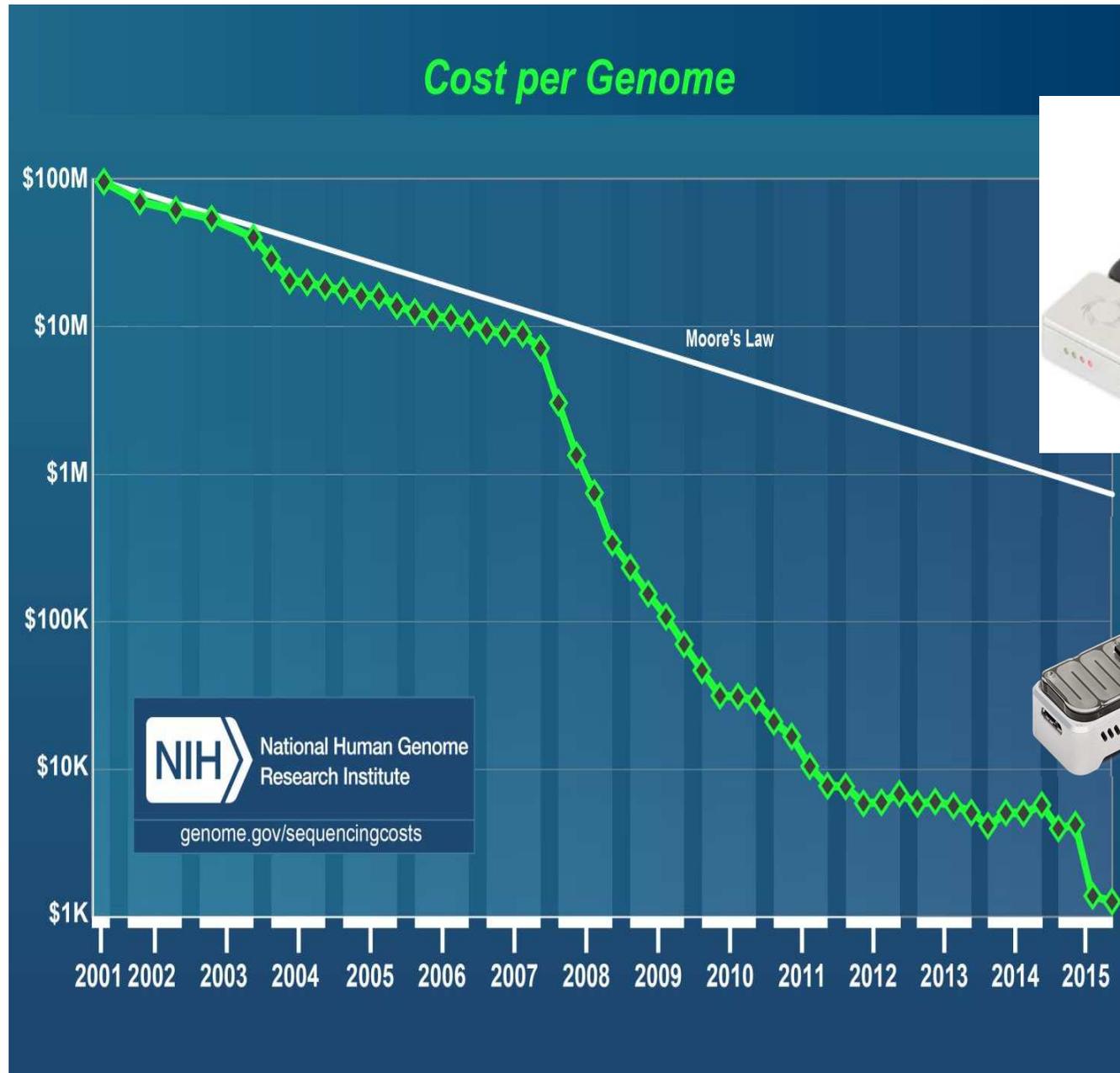
Fertilité physique

Fertilité biologique

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



# De moins en moins cher et de plus en plus miniaturisé !



# Un réseau national des sols

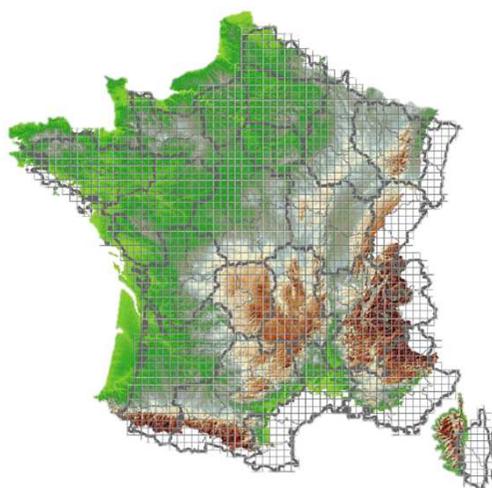


## RMQS : Réseau de Mesure de la Qualité des Sols

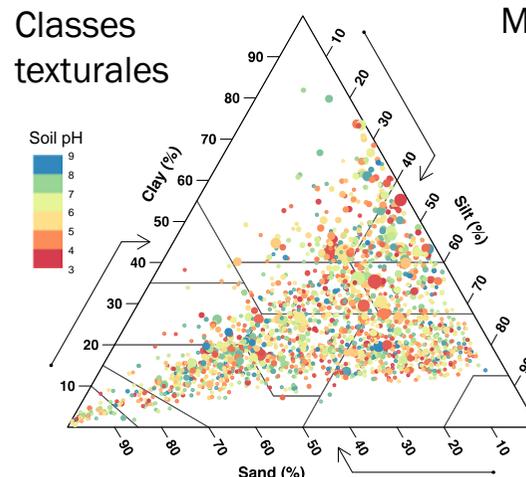
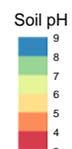
mis en place en 2002 par l'INRA

échantillonnage des sols français sur une grille de 16 x 16 km

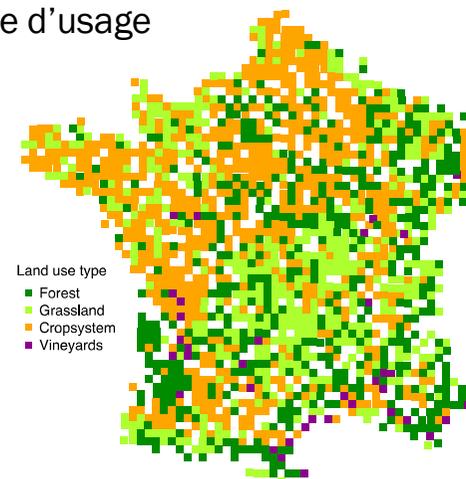
→ 2200 sites



Classes  
texturales



Mode d'usage



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

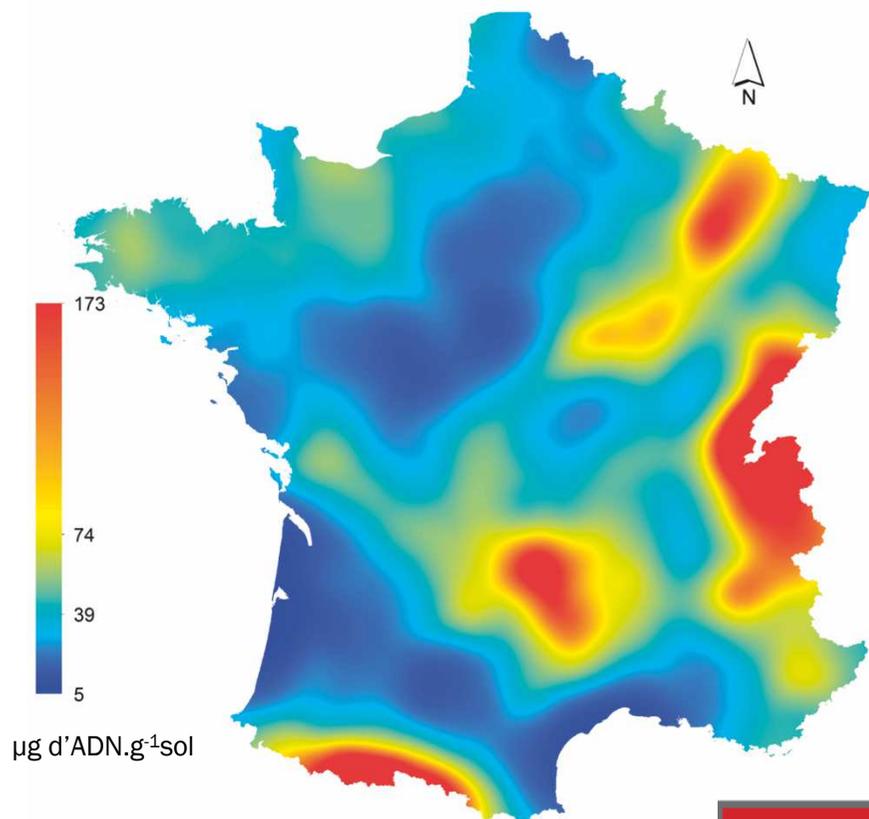
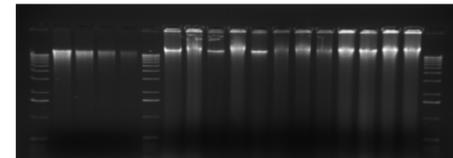
Cartographie de la qualité des sols :

- texture, pH, Corg tot, Norg, Ca, Na, Mg, ETM, HAP, ...
- relevés floristiques précis, géo-référencement des sols, description du paysage, enquête sur l'occupation des sols

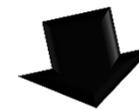
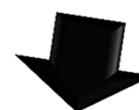
+ prise en compte de la composante microbienne depuis  
2006



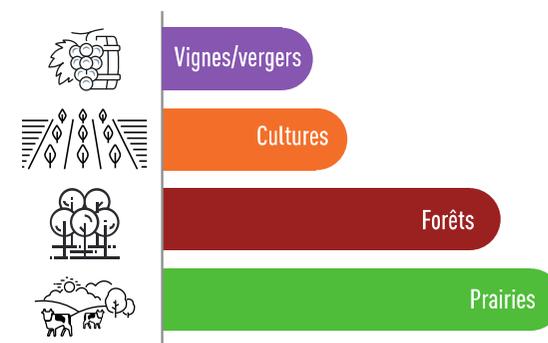
# Biomasse moléculaire microbienne



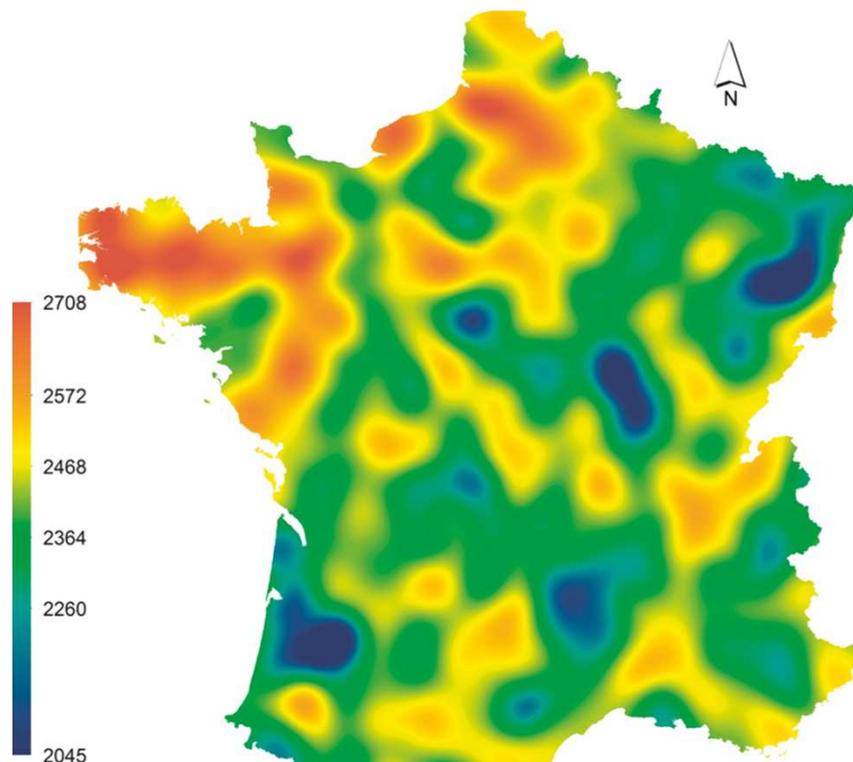
Type de sol > Mode d'usage >> Climat



|                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| Carbonates de Calcium<br>⊖⊖ | ratio C/N<br>⊖           |
| Potassium<br>⊖              | pH<br>++                 |
| Teneur en argile<br>++      | Carbone organique<br>+++ |



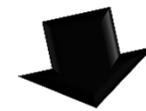
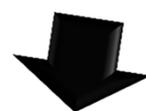
# Diversité des micro-organismes



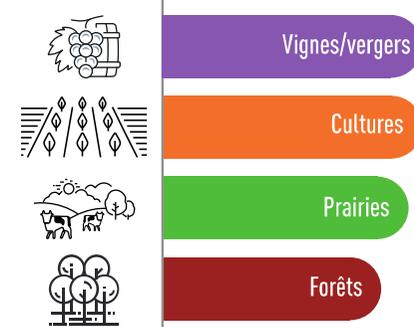
Diversité bactérienne  
(Nombre de bactéries différentes)



Type de sol > Mode d'usage >> Climat



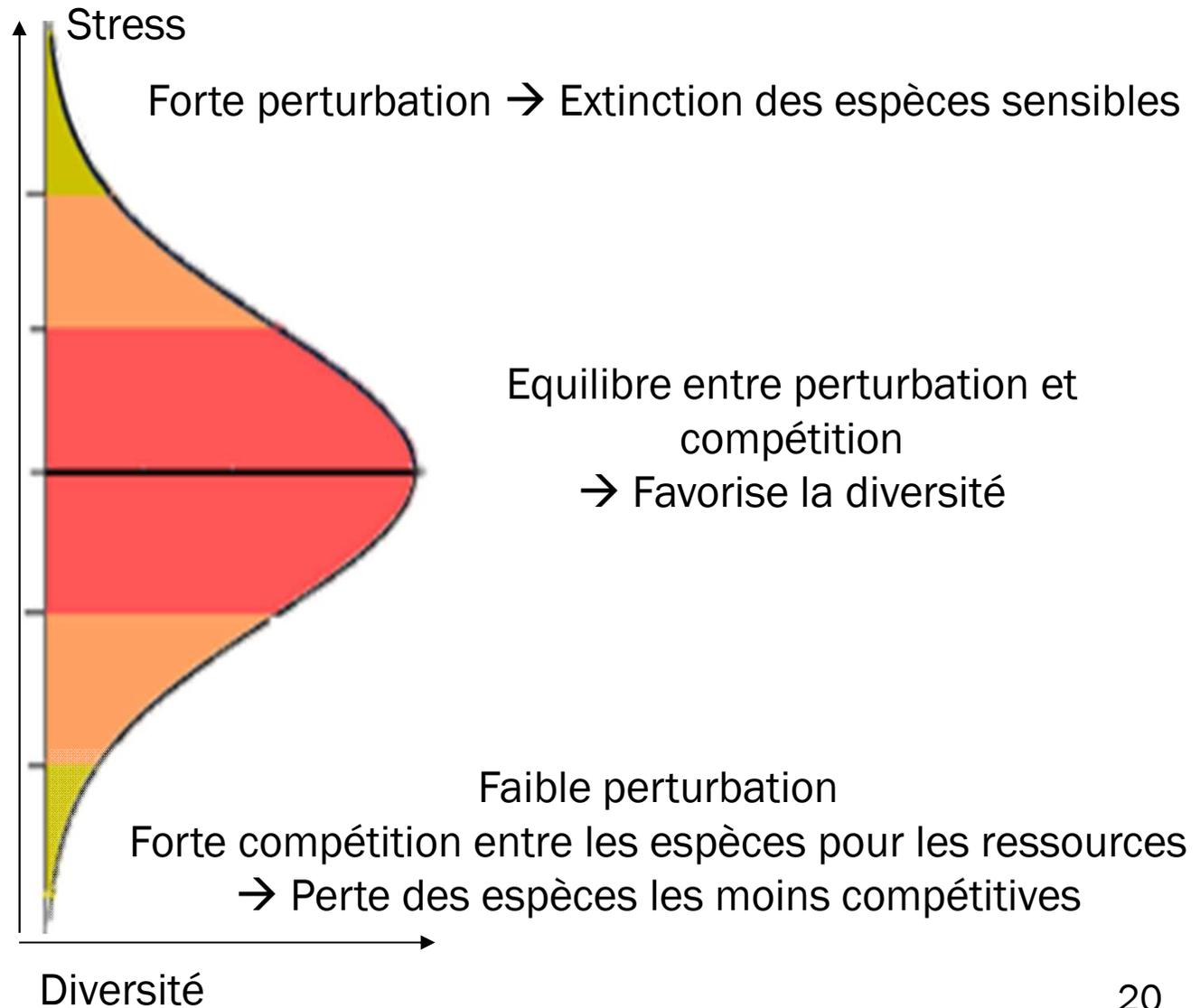
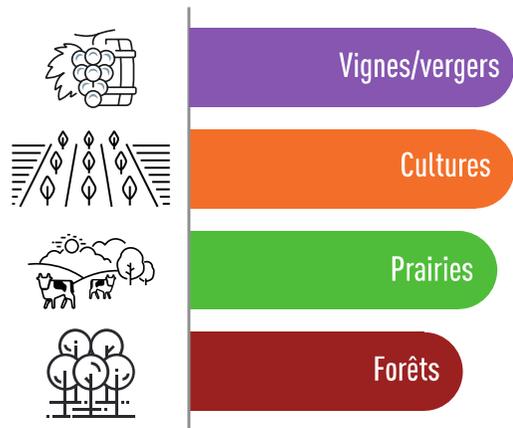
|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| pH<br>++               | Teneur en sable<br>+ |
| Teneur en argile<br>-- | Ratio C/N<br>--      |



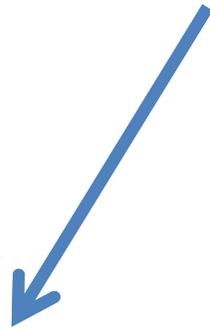
# Diversité des micro-organismes

Pourquoi la diversité est-elle plus forte dans les sols agricoles?

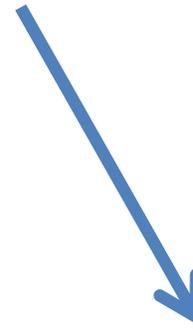
Hypothèse de la  
perturbation  
intermédiaire



Est ce que beaucoup de diversité veut dire une bonne diversité ?



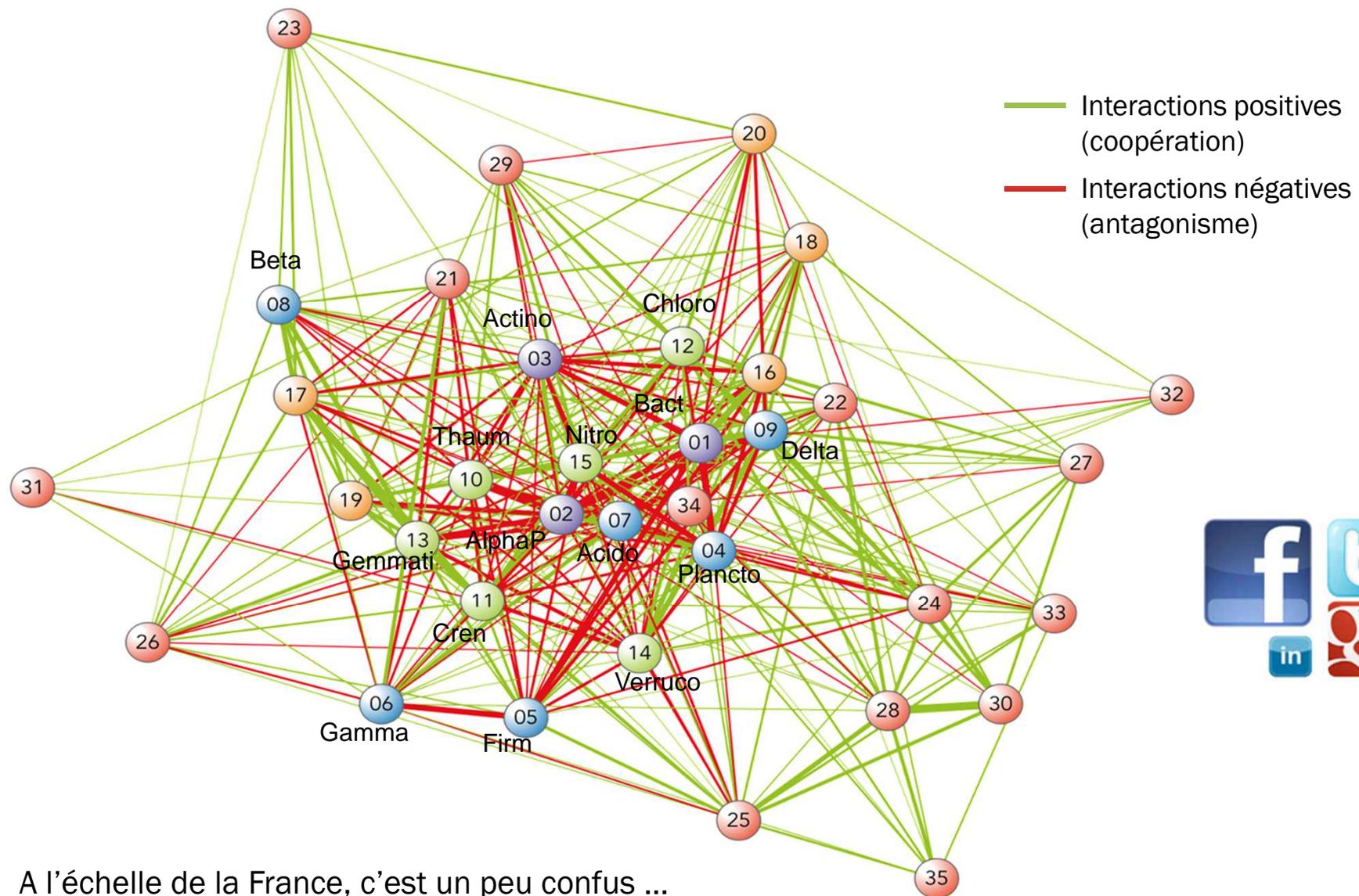
Espèces bénéfiques



Bactéries connectées en réseau



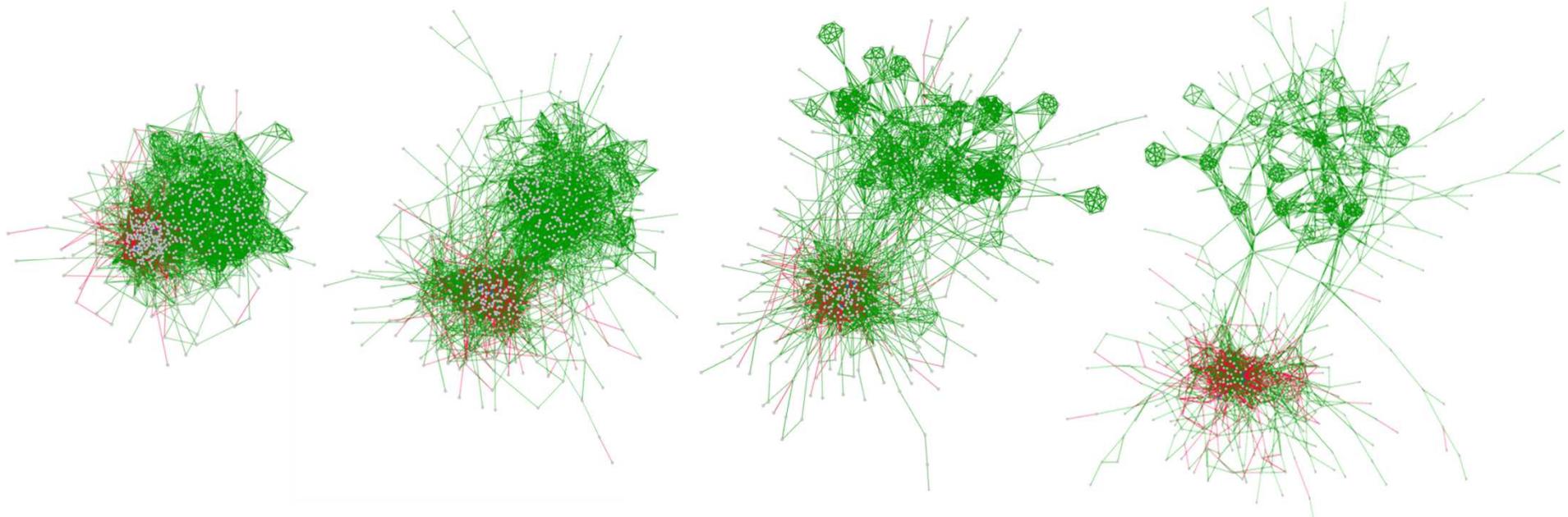
# Réseaux d'interactions bactériennes, une autre vision de l'état microbiologique des sols ?



A l'échelle de la France, c'est un peu confus ...

# Réseaux d'interactions bactériens, une autre vision de l'état microbiologique des sols ?

Par mode d'usage



Les réseaux de bactéries du sol sont **moins complexes et cohésifs** dans les sols agricoles.

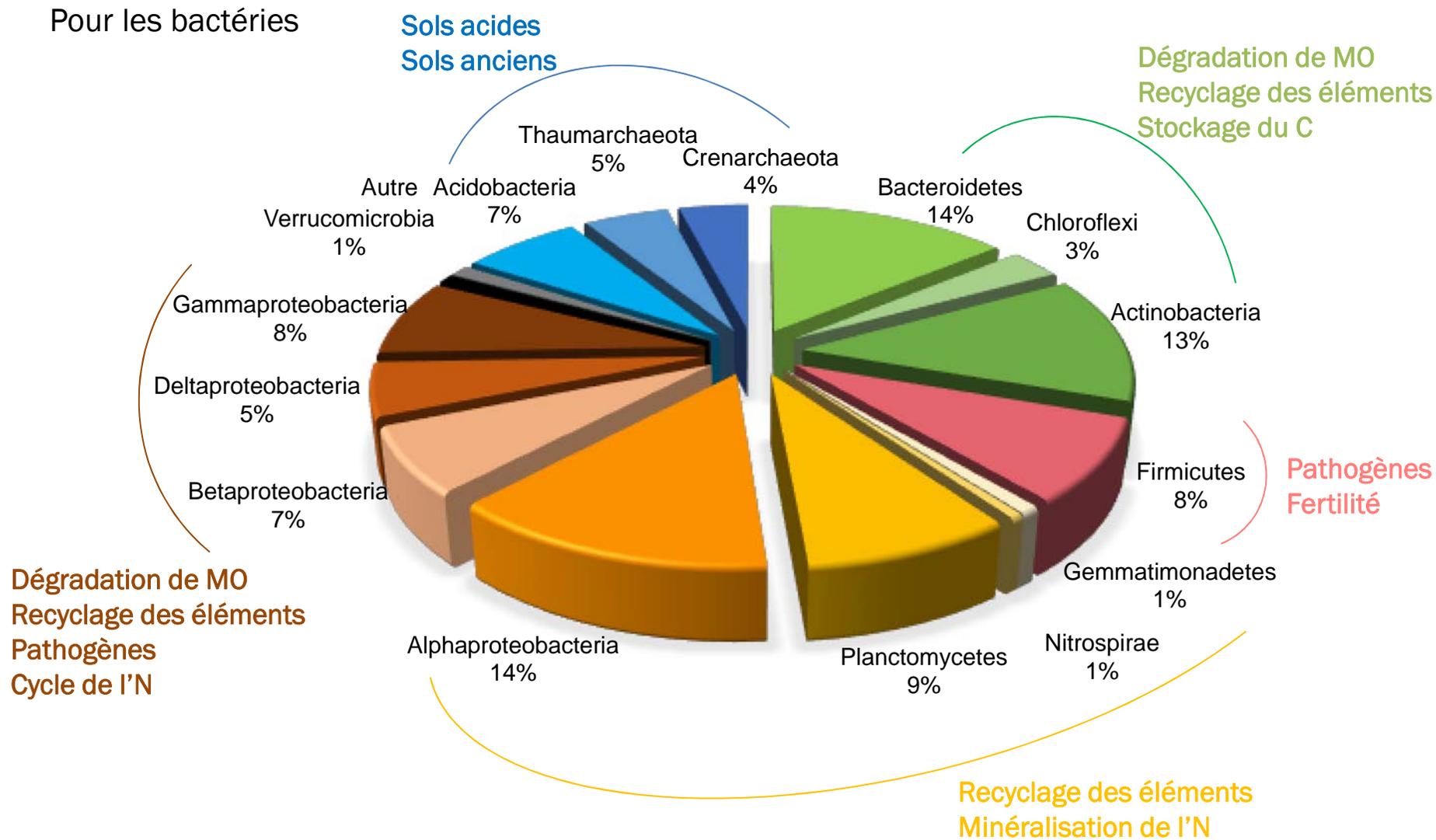
→ Moins de coopération entre les espèces

→ Un fonctionnement du sol affecté ?

# Qualité de la Diversité des microorganismes

A quoi correspond cette diversité dans les sols agricoles?

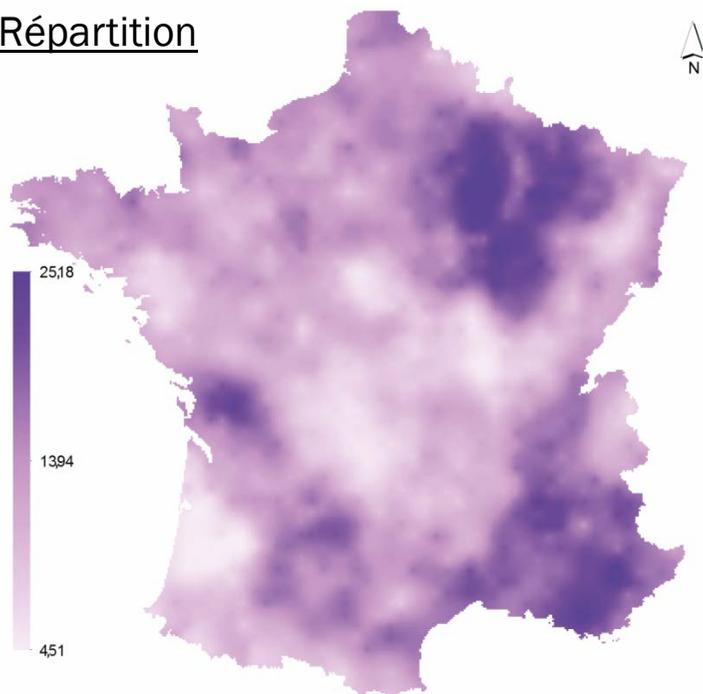
Pour les bactéries



# Chaque groupe de bactéries a des caractéristiques propres

## Carte d'identité de Bacteroidetes

### Répartition

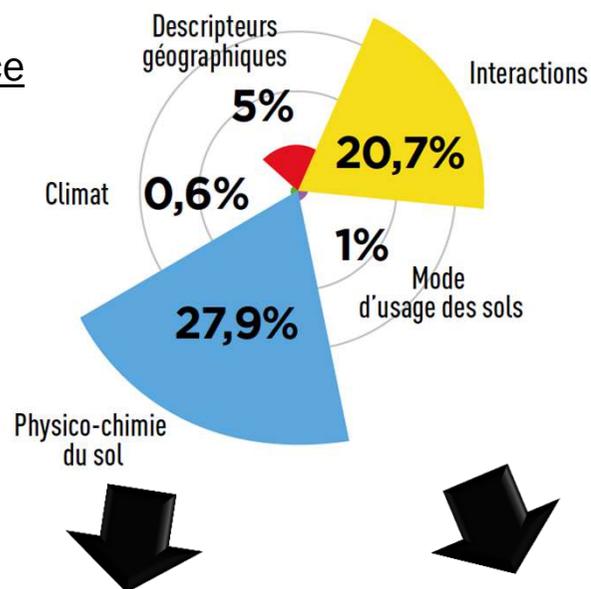


Groupe le plus abondant dans les sols français

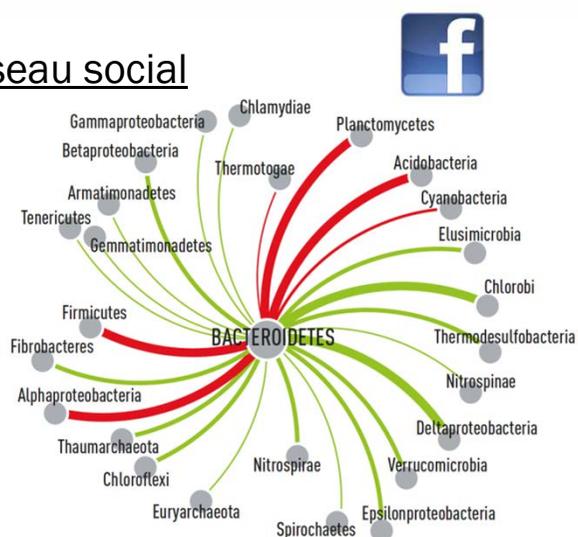
### Fonctions connues

- Dégradation de la MO
- Recyclage des éléments
- Dégradation de polluants

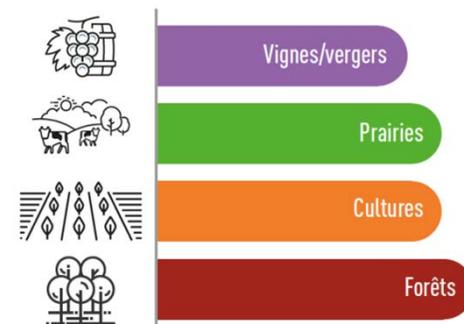
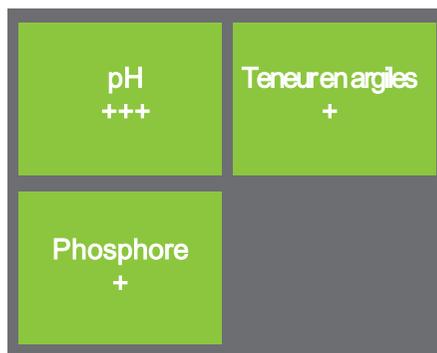
### Ce qui l'influence



### Réseau social



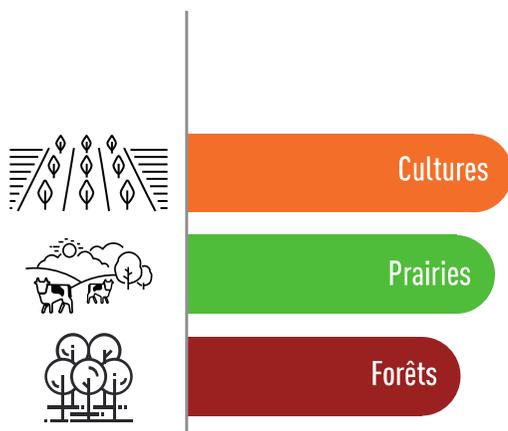
### Milieu de vie



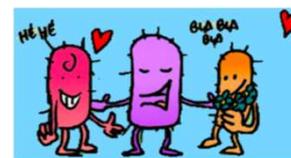
Karimi et al., 2018 Science Advances

# Diversité des micro-organismes

A quoi correspond cette diversité dans les sols agricoles?



Saprophytes  
Dégrade la MO

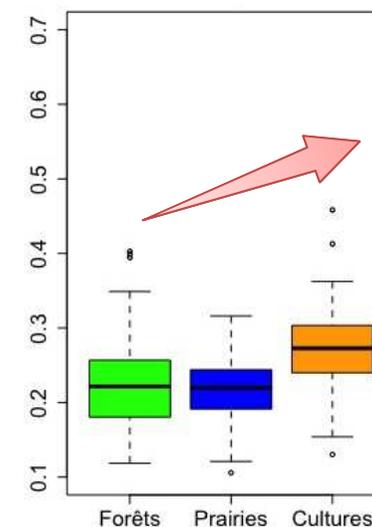
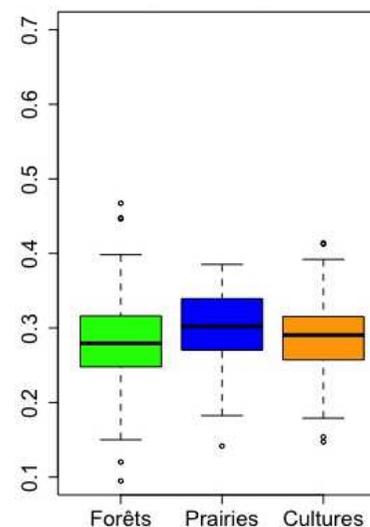
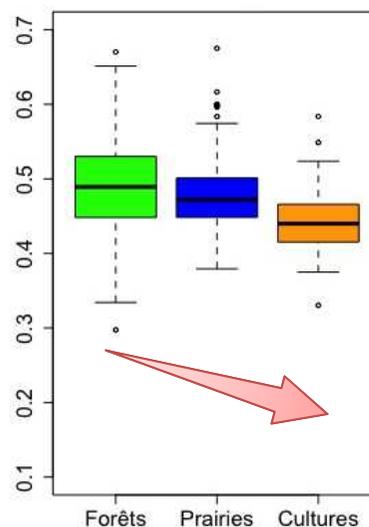


Symbiotiques  
Interactions ++ avec  
la plante



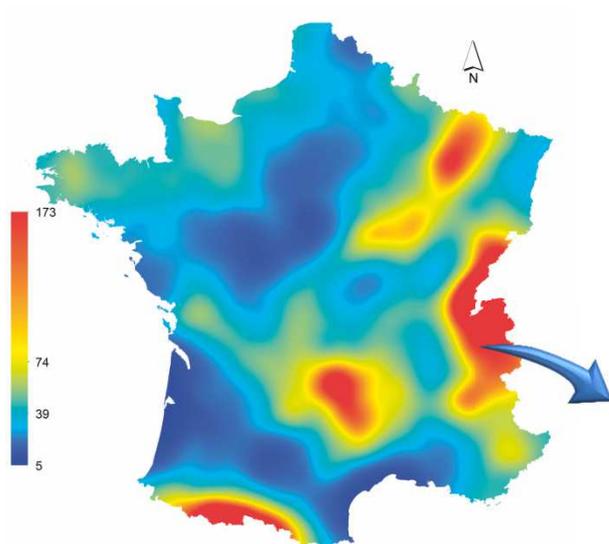
Pathogènes  
Interactions --  
avec la plante

La diversité augmente en  
faveur des pathogènes



# Des outils de recherche qui deviennent des indicateurs

## Biomasse microbienne

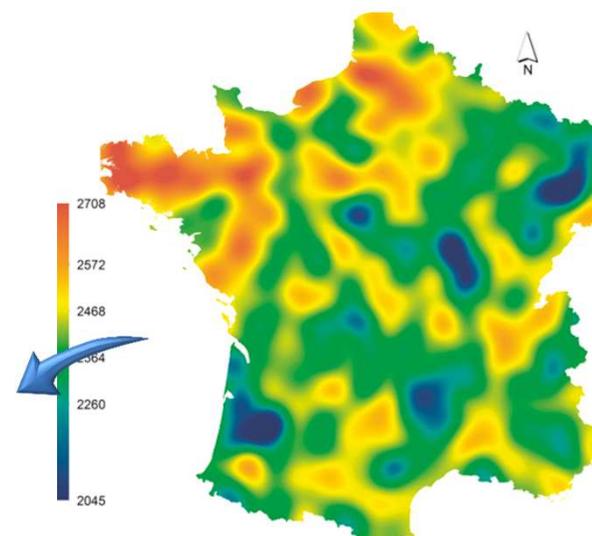


Dequiedt et al., 2011 Glob Ecol Biogeo;  
Horrigüe et al., 2016 Ecol Indic



« Indicateur national sol »

## Diversité bactérienne



Ranjard et al., 2013 Nature Comm;  
Terrat et al., 2017 Plos One



« Indicateur national sol »

Forte influence du type de sol  
Faible influence du climat  
Influence significative du mode d'usage



Construction de modèles mathématiques :  
→ prédire la valeur de référence pour un type pédoclimatique donné

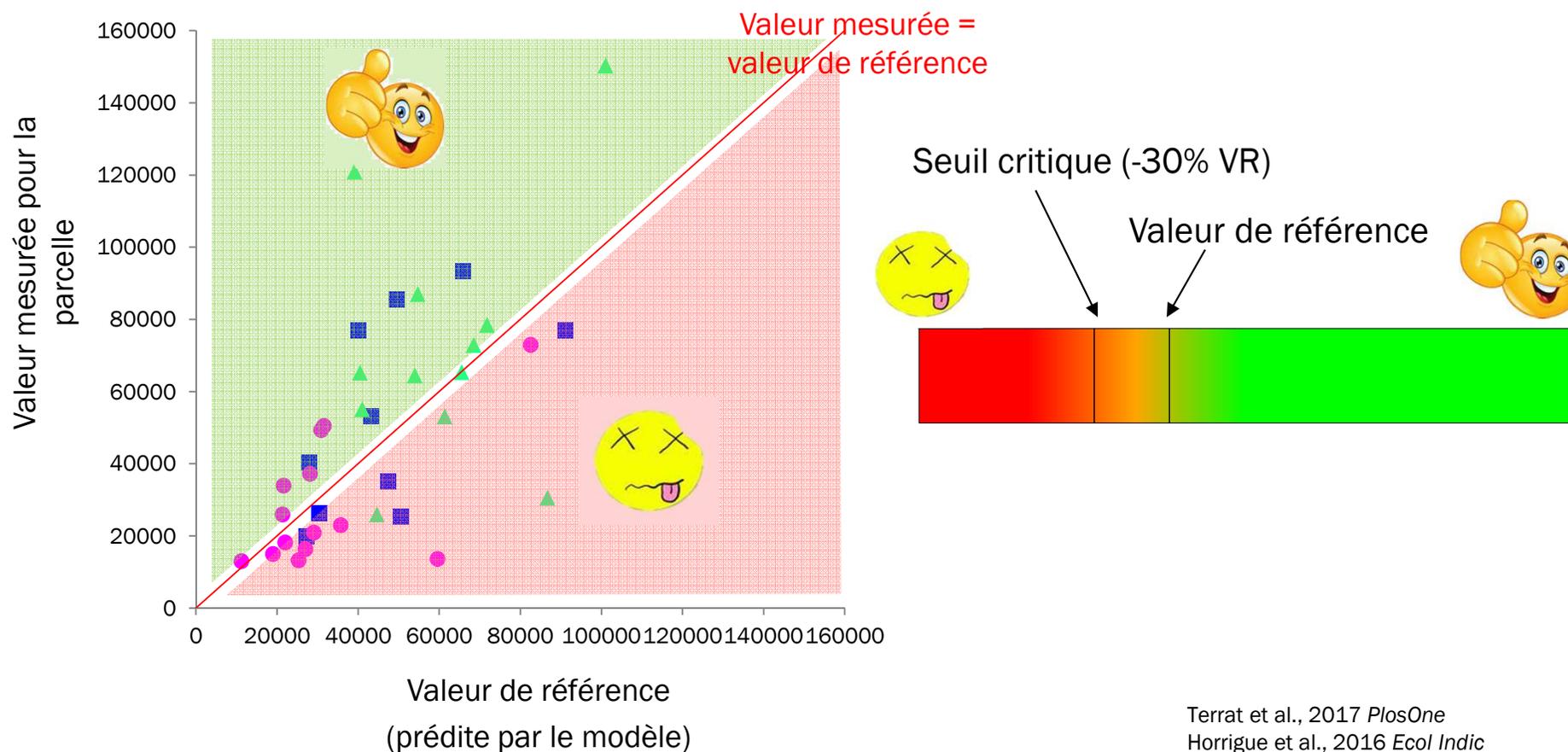
Diagnostic d'état biologique

## Des modèles prédictifs et un référentiel

Pour la biomasse microbienne et la diversité bactérienne :

des modèles complexes mais qui permettent d'avoir des valeurs de référence pour chaque type de sol

$$Y = \beta_0 + \sum (\beta_j X_j + \beta_j X_j^2) + \sum \sum \beta_{jk} X_j X_k + \varepsilon$$



## Encore plus près des exploitants ... Un diagnostic à l'échelle du paysage

Paysage agricole de Fenay (21)

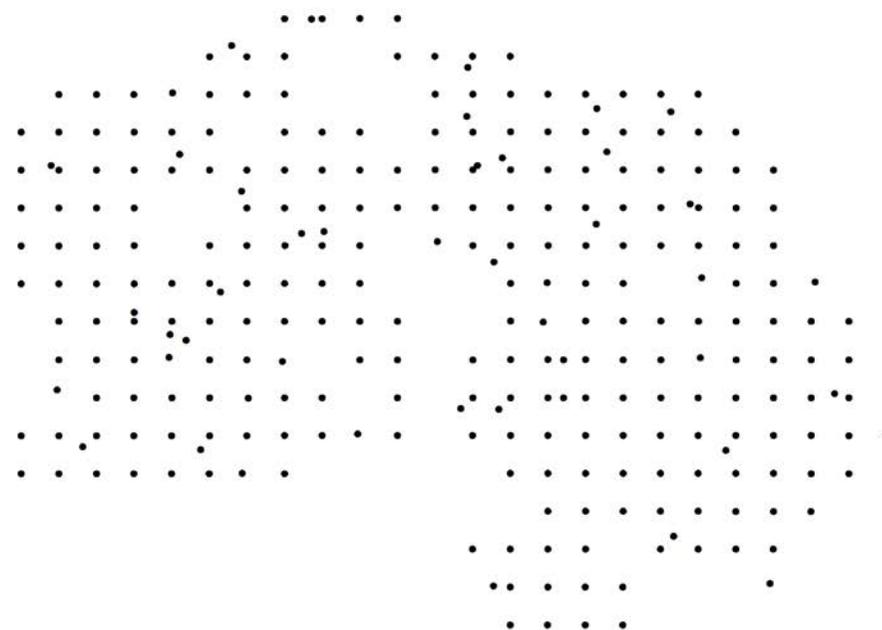
12 km<sup>2</sup>, 80% de surface en grande culture

270 sols échantillonnés selon une grille 250 m x 250 m

Intensité de travail du sol



-  Zone forestière
-  Culture pérenne
-  Travail sup. + CIPAN
-  Travail superficiel
-  Décompactage
-  Labour conventionnel

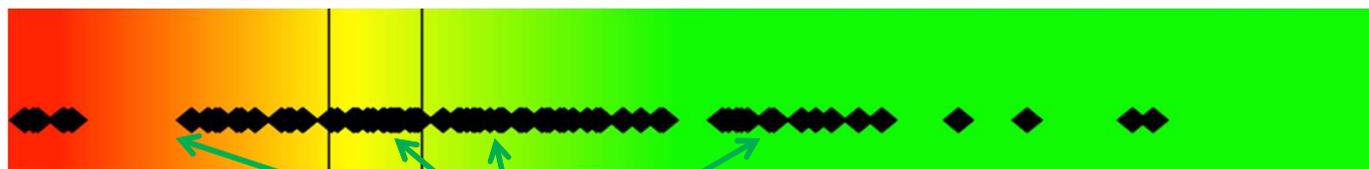


# Un diagnostic à l'échelle du paysage

## Paysage agricole de Fenay (21)

Biomasse microbienne

Seuil Critique Valeur Référence



Diversité bactérienne

SC VR



La majorité des parcelles ont une bonne qualité microbiologique  
Diversité des pratiques et de leur impact sur la microbiologie du sol

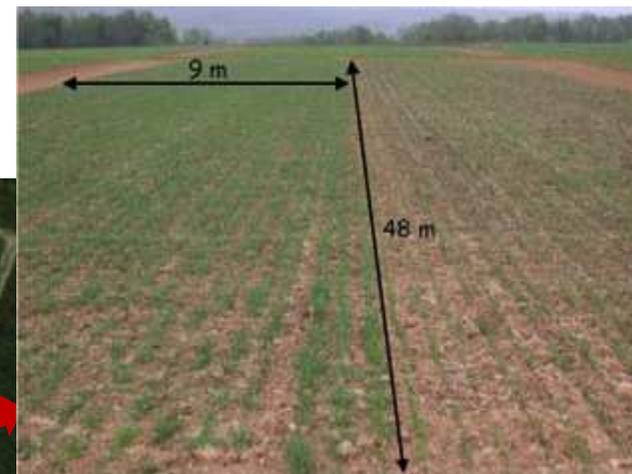
→ Identifier les systèmes innovants agroécologiques

# Encore plus près des exploitants ... Un essai longue durée

Ferme de Boigneville (91)

Essai sur 20 ans

Parcelles de 48 m x 9m

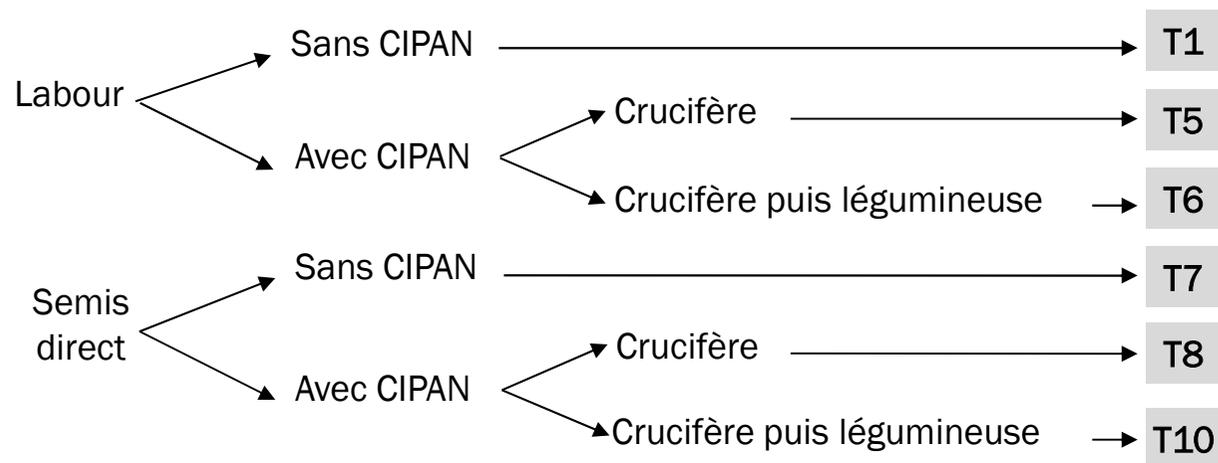


# Encore plus près des exploitants ... Un essai longue durée

Ferme de Boigneville (91)

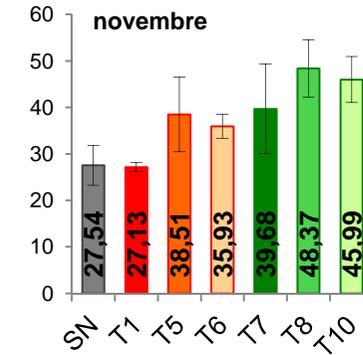
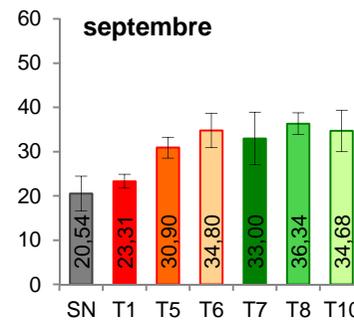
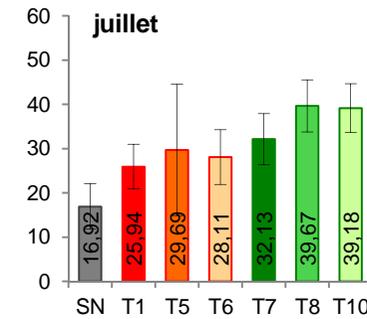
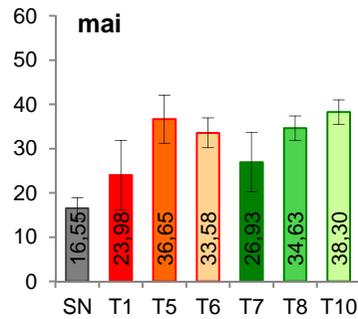
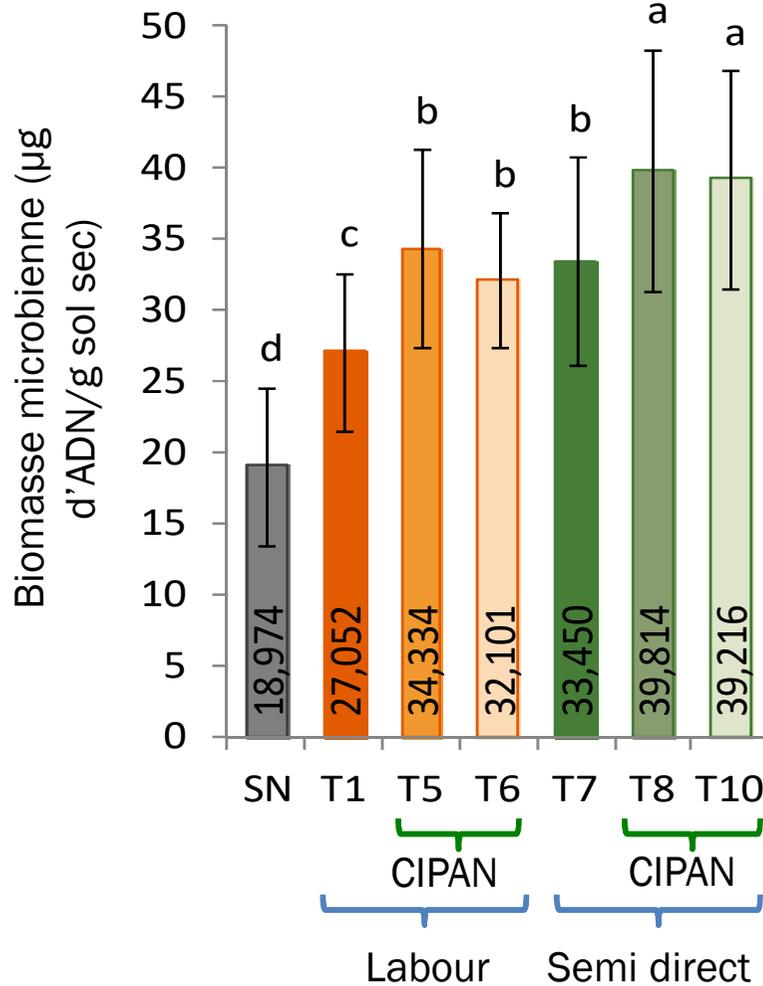


Impact du travail du sol  
(6 traitements)



# Encore plus près des exploitants ... Un essai longue durée

Ferme de Boigneville (91)



Indicateur stable dans le temps  
Effet CIPAN toute l'année

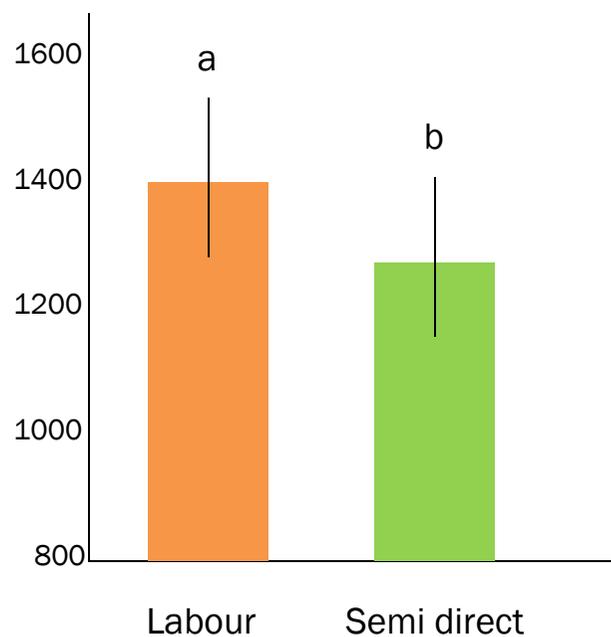
Impact du labour, effet positif des CIPAN

# Encore plus près des exploitants ... Un essai longue durée

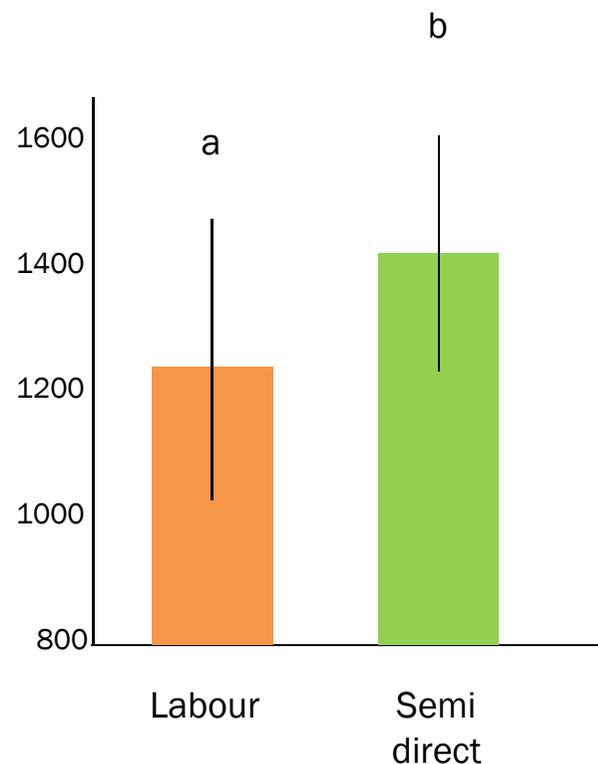


Ferme de Boigneville (91)

Diversité en bactéries



Diversité en champignons



**Le labour favorise la diversité bactérienne et diminue la diversité en champignons**

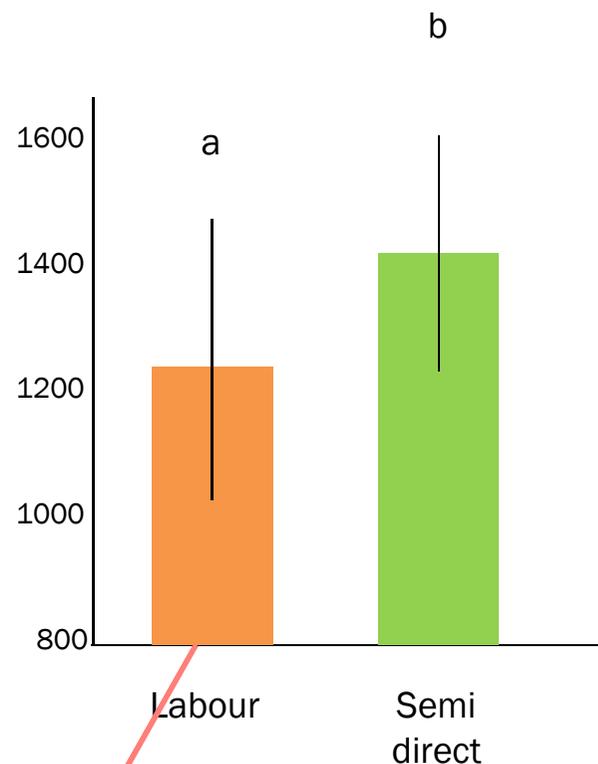
# Encore plus près des exploitants ... Un essai longue durée

Ferme de Boigneville (91)

Diversité en bactéries



Diversité en champignons



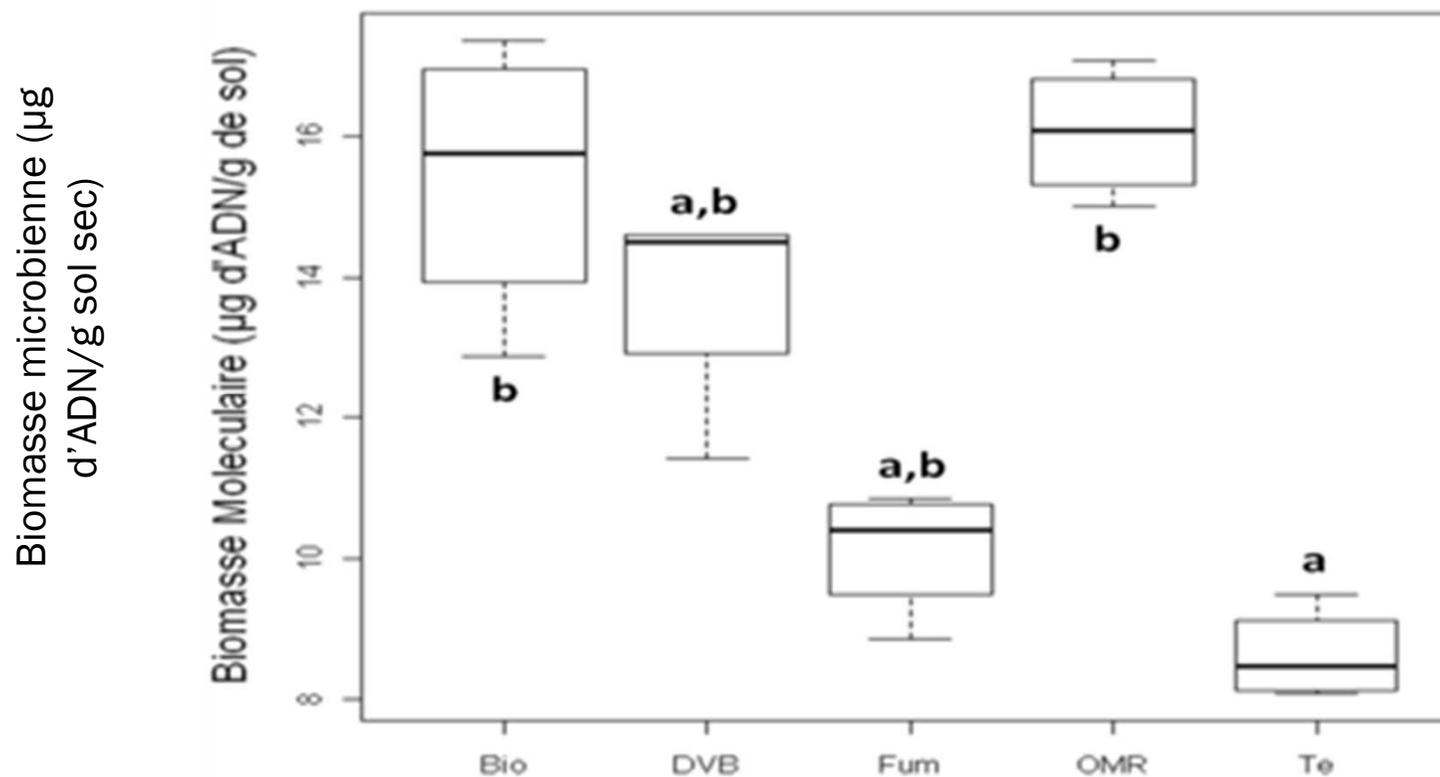
**Populations indicatrices d'envts perturbés  
Stimule les populations opportunistes,  
pathogènes**

## Encore plus près des exploitants ...



Sites de Feucherolles (78)

Impact des amendements organiques (5 traitements)



Les amendements organiques stimulent la biomasse microbienne  
mais l'effet dépend du type de sol et du type d'amendements

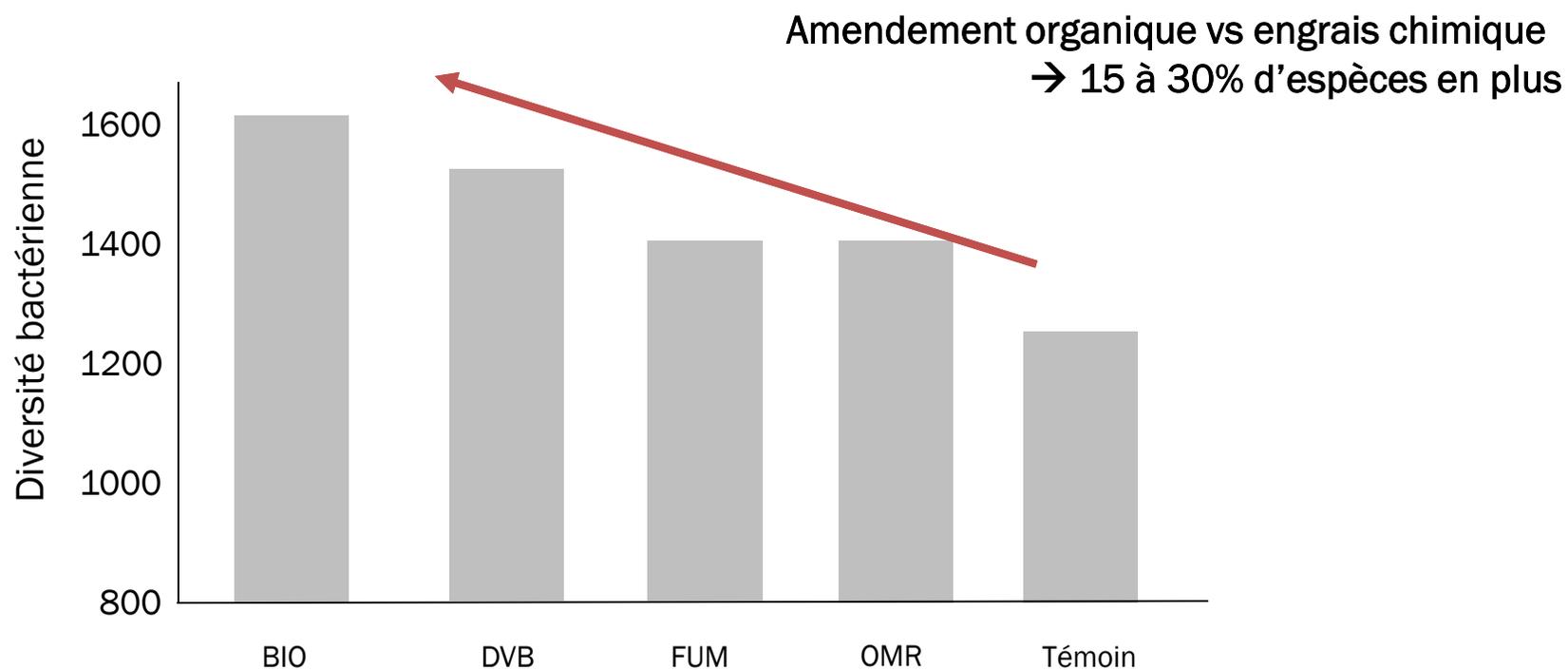
## Encore plus près des exploitants ...



Sites de Feucherolles (78) et de Colmar (69)

Impact des amendements organiques (5 traitements)

Feucherolles (78)



# Résumé sur l'impact des pratiques agricoles



## Biomasse microbienne



## Diversité microbienne





# Programme CASDAR AgrInnov

(2011 – 2015)

L Ranjard  
INRA UMR Agroécologie, centre INRA Dijon

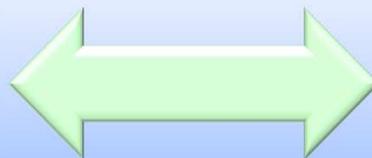
E Vérame  
Observatoire Français des sols vivants, Domaine de Danne



# AgrInnov



Monde  
Agricole

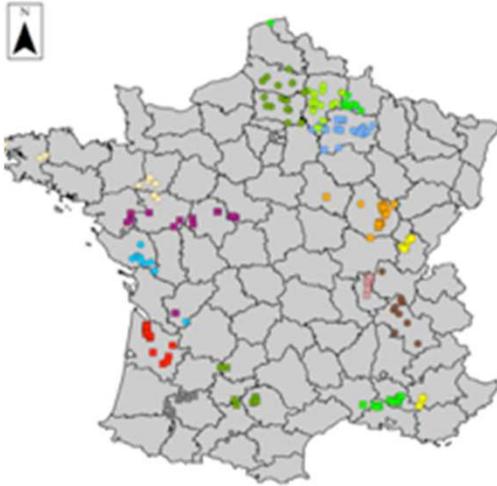


Monde de la  
recherche

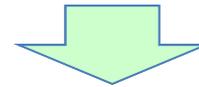


Valider des outils **opérationnels de type bioindicateurs**  
pour équiper les agriculteurs afin qu'ils puissent évaluer  
**l'impact de leurs pratiques** sur la  
biologie de leur sol

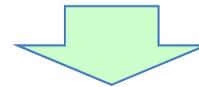
# Développer le diagnostic de la qualité des sols agricoles *pour et par* les agriculteurs



**Etape 1** : Mise en place un **Réseau** d'agriculteurs  
(250 fermes, 300 agriculteurs, technicien CA, ...)



**Etape 2** : Développer une **Formation** théorique et pratique  
sur la biologie des sols agricoles



**Etape 3** : Valider et appliquer un **Tableau de bord  
de bioindicateurs** de la qualité des sols



**Diagnostic** de la qualité biologique des sols agricoles



Identifier les **pratiques** les plus  
**innovantes**

# Tableau de bord d'indicateurs

## Indicateurs élémentaires

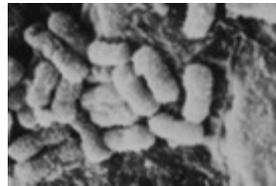
Test bêche



LEVAbag<sup>MD</sup>



Abondance/diversité microbienne



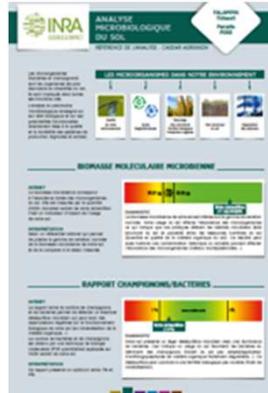
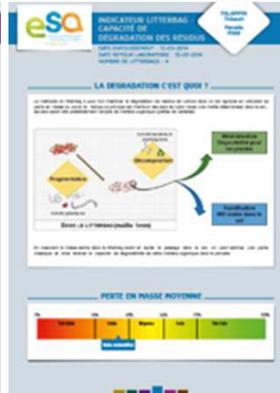
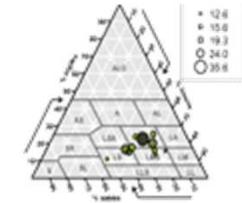
Abondance diversité nématodes



Abondance diversité lombrics



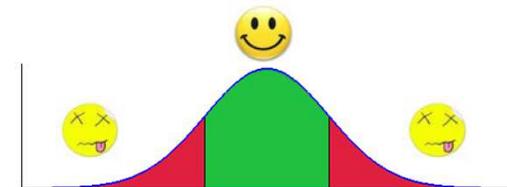
Physico-chimie



Le plus, le mieux !



Le moins, le mieux !



Optimum

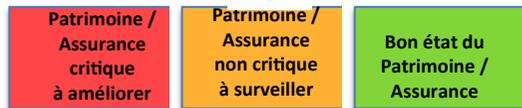
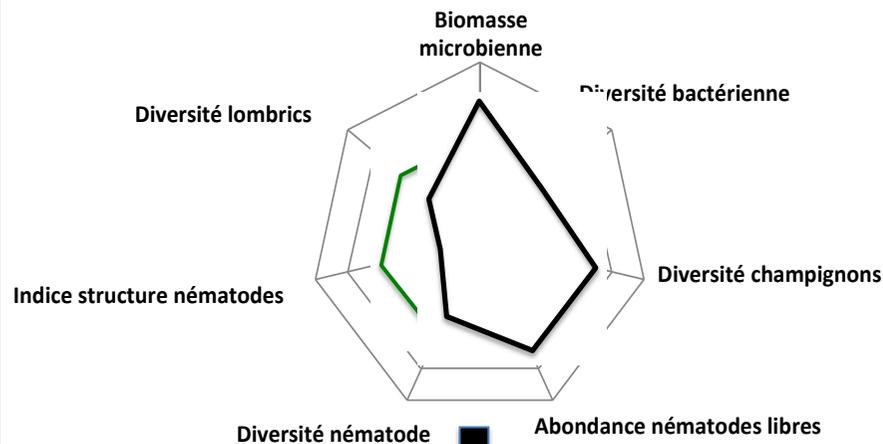
# Tableau de bord d'indicateurs

## Indicateurs de synthèse

### Patrimoine Biologique Assurance Ecologique

Abondance, diversité et équilibre biologique  
des organismes vivants du sol

— Seuil d'alerte — Optimum — Parcelle analysée



Un mauvais indicateur de Patrimoine/Assurance écologique peut être du :

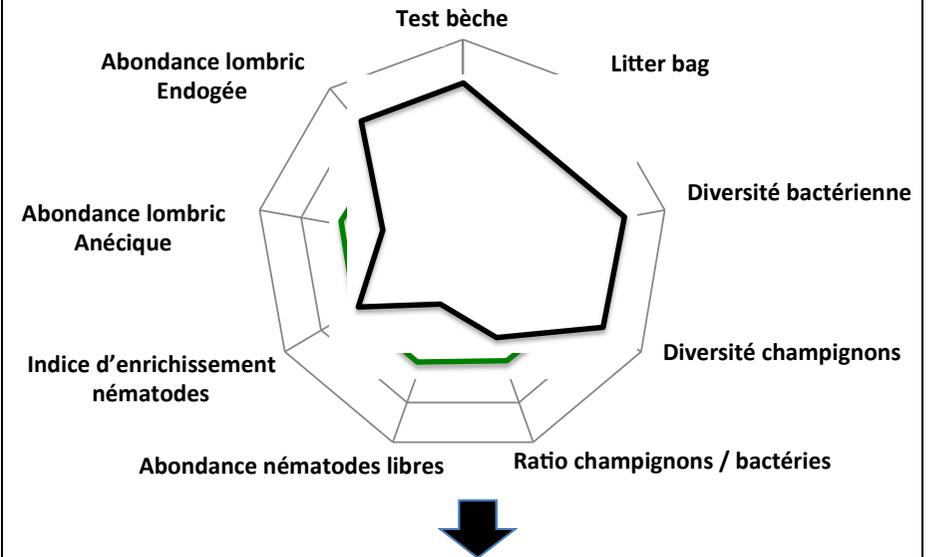
- mauvais état structural du sol et/ou
- faibles ressources nutritives (quantité et qualité de matière organique) et/ou
- pollution significative du sol (organique ou métallique)

**Une mauvaise assurance écologique peut entraîner une mauvaise résistance et capacité de réhabilitation du fonctionnement biologique du sol et donc une faible durabilité des pratiques**

### Fertilité biologique du sol

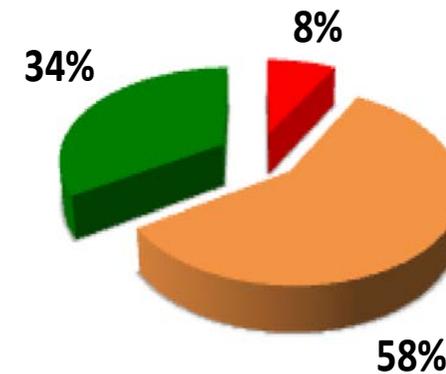
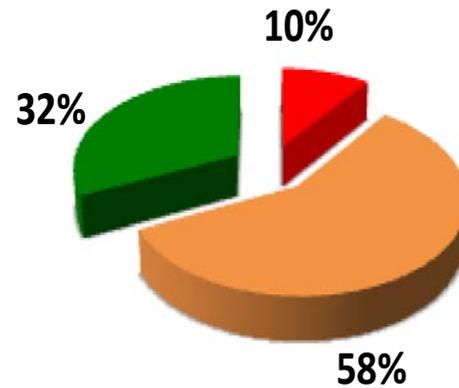
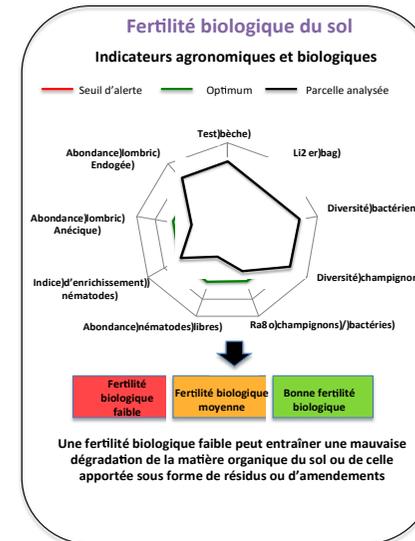
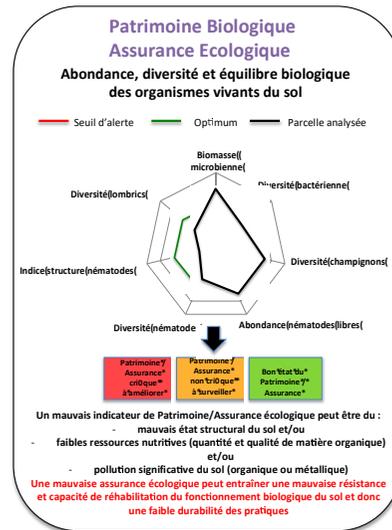
Indicateurs agronomiques et biologiques

— Seuil d'alerte — Optimum — Parcelle analysée



**Une fertilité biologique faible peut entraîner une mauvaise dégradation de la matière organique du sol ou de celle apportée sous forme de résidus ou d'amendements**

# Bilan national des indicateurs de synthèse



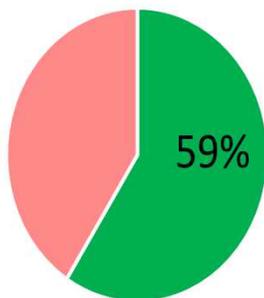
**Les sols agricoles ne sont pas morts !  
 Toutefois ils sont à surveiller !**

## Résultats marquants au terme d'AgriInnov

**97% !**



Intégration de la biologie du sol  
dans leur questionnaire



**59%**

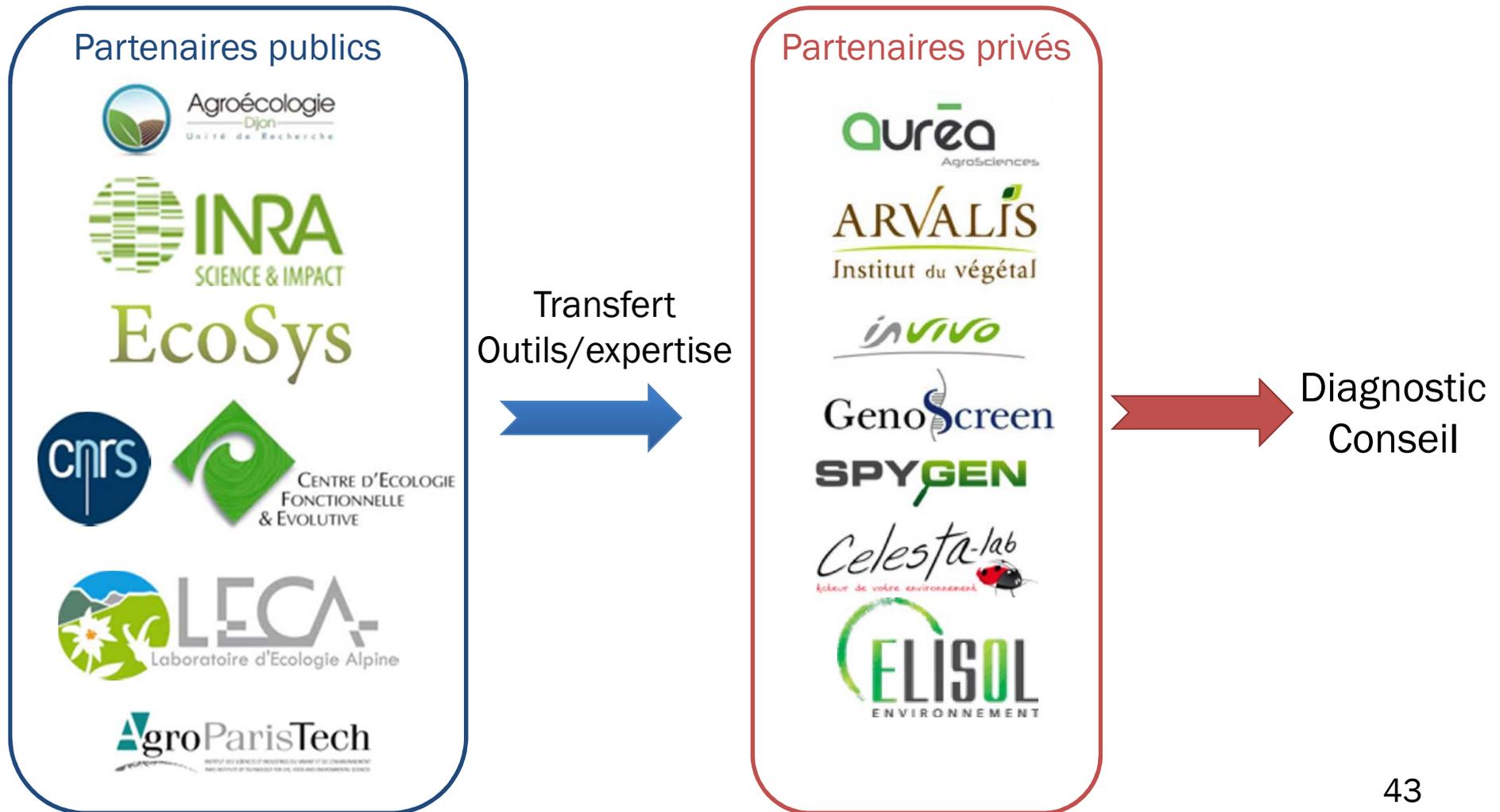
Changement dans les pratiques



# Projet Investissement d'Avenir2 – AgroEcoSol (2017-2020)



Industrialiser les bioindicateurs  
« Proposer une séquence  
Diagnostic de la qualité biologique des sols agricoles – Conseil agronomique  
pour la piloter»



## Ouvrages de référence



<http://www.ademe.fr/biologie-moleculaire-service-diagnostic-environnemental>



<http://www.leclub-biotope.com/en/biodiversity/1076-atlas-français-des-bactéries-du-sol-9782366622195.html>



Financé par  
**ANR**

Merci pour votre attention

