

Bioindicateurs de la qualité des sols agricoles



L. RANJARD
UMR Agroécologie - INRA Dijon



Outils de pilotage

Jusqu'à présent :

systematiquement

- pilotage basé sur des **analyses chimiques des sols** : reliquats azotés, teneur en P et K, teneur en carbone



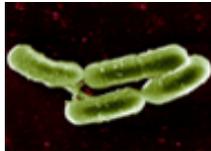
régulièrement

- pilotage basé sur des **analyses physiques des sols** : tassement, état de surface, profil cultural...



Rendements et qualité des productions

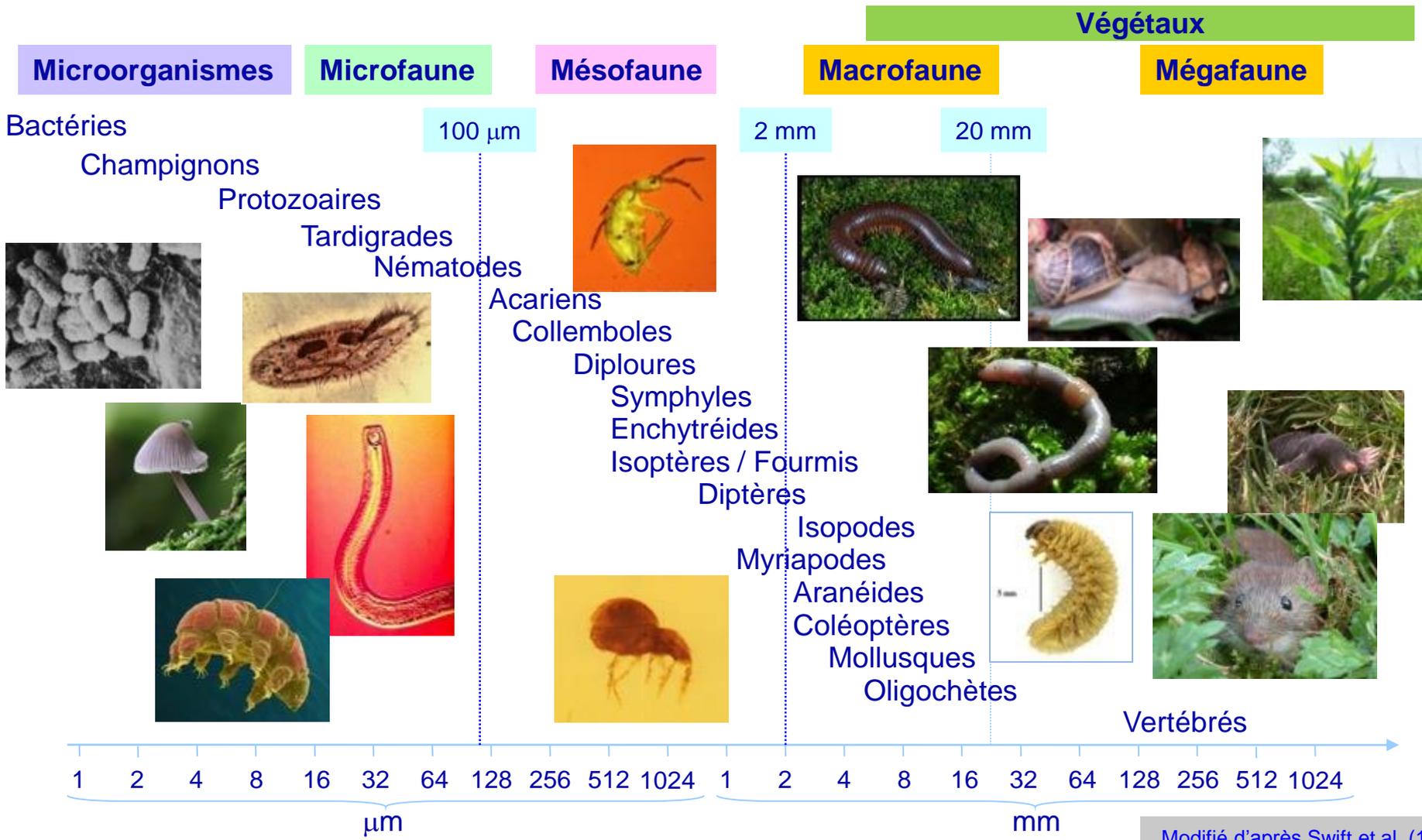
Initier un pilotage complémentaire basé sur **l'analyse biologique des sols**



Qualité et Durabilité des productions
Qualité Environnementale
Patrimoine

Le sol est un milieu « vivant »

de l'infiniment petit au visible



Modifié d'après Swift et al. (1979)

Le sol est un milieu « vivant »

Combien d'individus ?

1 g sol



1 hectare



❖ Bactéries 100 millions à 1 milliard

2500 kg C



❖ Champignons 1 à 3 mètres de mycélium

3500 kg C



❖ Protozoaires Quelques millions

250 kg C



❖ Nématodes 1000 à 2000



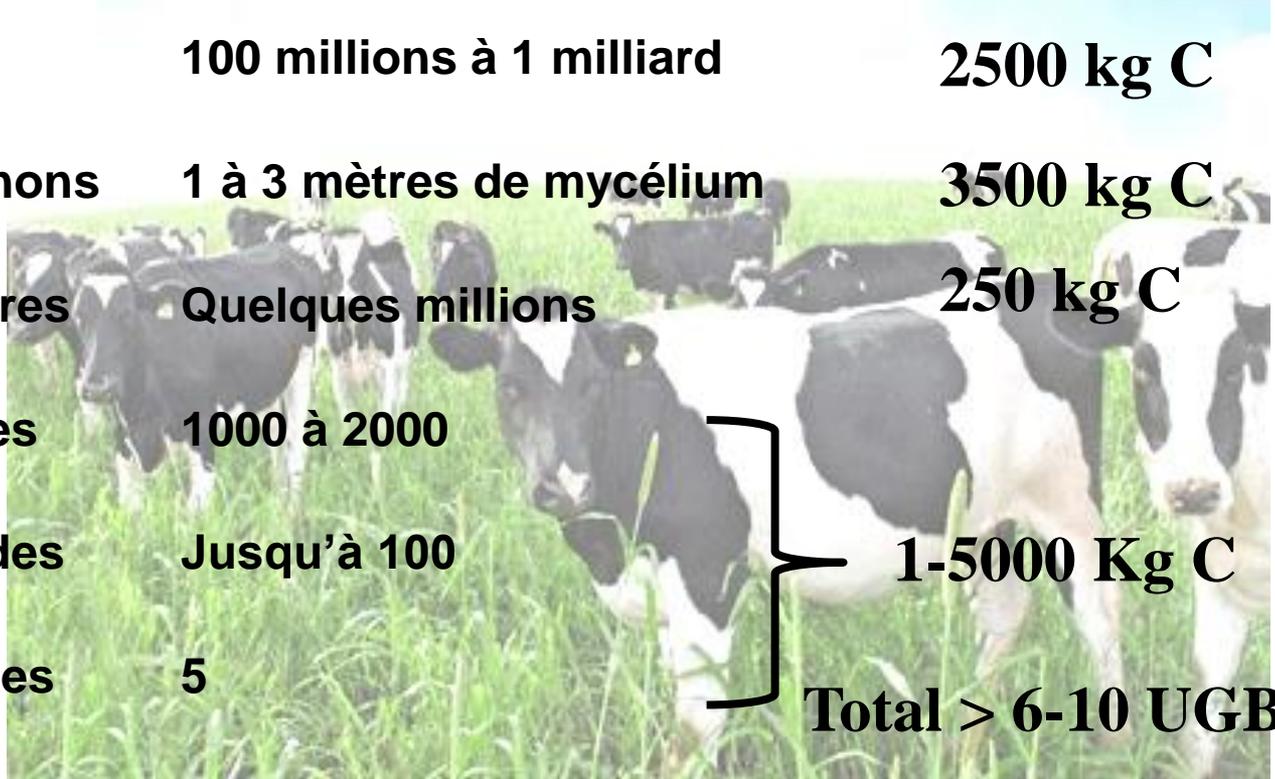
❖ Arthropodes Jusqu'à 100



❖ Oligochètes 5

1-5000 Kg C

Total > 6-10 UGB



Le sol est un milieu « vivant »

Combien d'espèces ?

> 1000 000 espèces de bactéries
> 100 000 sp de champignons

1 g

1 m²

1000 espèces d'invertébrés:

- 400 – 500 Acariens
- 60 – 80 Collemboles
- 90 Nématodes
- 60 Protozoaires
- 20 – 30 Enchytréides
- 10 – 12 Lombriciens
- 15 Diplopedes
- etc

D'après Decaëns. Torsvick et al. (1994), Hawksworth (2001), Schaefer et Schauer mann (1990)

Les fonctions biologiques

Microorganismes



Ingénieurs chimiques

Cycle de N, P, S....
Cycle du C : décomposition, humification
Structure du sol
Croissance des plantes
Détoxification, bioremédiation
Symbiotiques ou libres

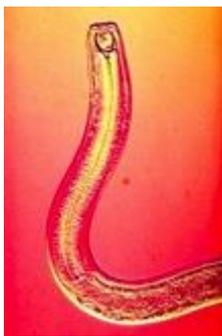
Macrofaune (et racines)

Bioturbation,
Décomposition de la MO
Stimulation des microorganismes
Modification cycles de C et nutriments



Ingénieurs du sol

Microfaune



Régulation (prédation) des microorganismes

Régulateurs biotiques

Méso- et macrofaune



Ingénieurs de la litière

Décomposition MO



Prédateurs

Contrôle des populations d'invertébrés

Organismes nuisibles



Bioagresseurs

Des fonctions biologiques pour des services écosystémiques

Recyclage des nutriments

Capture
Dynamique
Biodisponibilité N et P



Transformations du carbone

Décomposition
Dynamique de la MO

Maintenance de la structure du sol

Rétention en eau
Erosion
Fourniture d'habitats

Régulation des populations

Contrôle des bioagresseurs

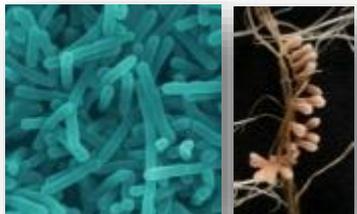


SERVICES ECOSYSTEMIQUES

d'après Blanchart et al.

Les communautés microbiennes, bioindicateurs pertinents

Enorme abondance et diversité



10⁹ bactéries
10⁶ espèces

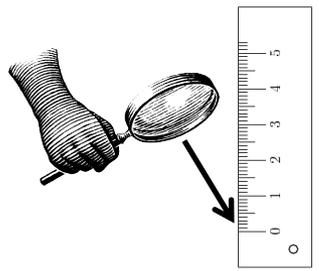


1g sol

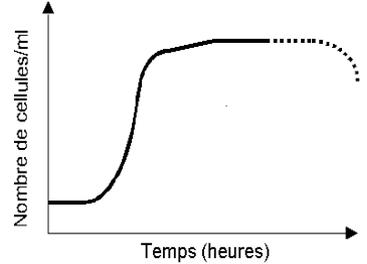
10⁶ champignons
10³ espèces



Enorme capacité d'adaptation



Petite taille



Temps de génération court

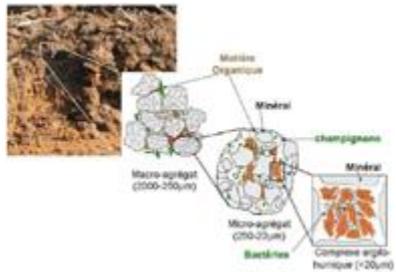


Plasticité du génome

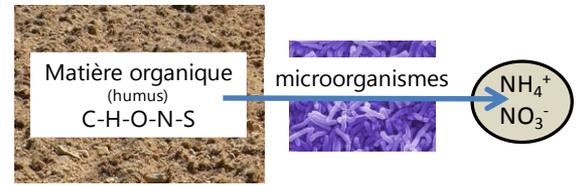


Réponse rapide aux modifications environnementales

Implications dans de nombreuses fonctions



Structuration du sol



Minéralisation matière organique, recyclage carbone, nutriments



Dépollution du sol

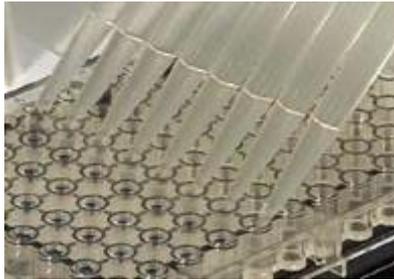


Lutte contre pathogènes

Comment mesurer les activités microbiennes dans le sol ?

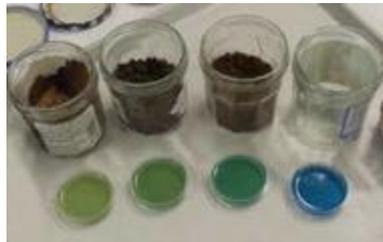
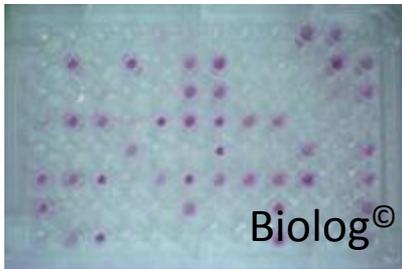


Catabolisme

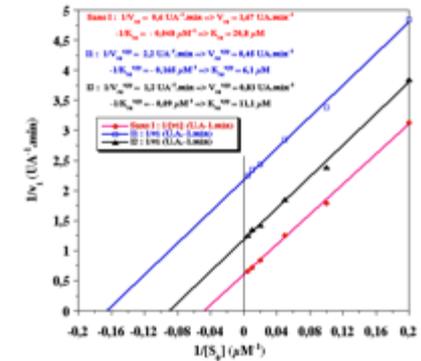


Mesure de produits finis ou intermédiaires

CO₂
NH₄⁺
N₂O
...



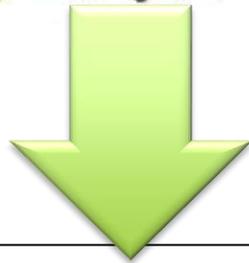
Mesures enzymatiques



Comment mesurer l'abondance et la diversité microbienne des sols

Une nouvelle voie : l'écologie moléculaire microbienne

Sol



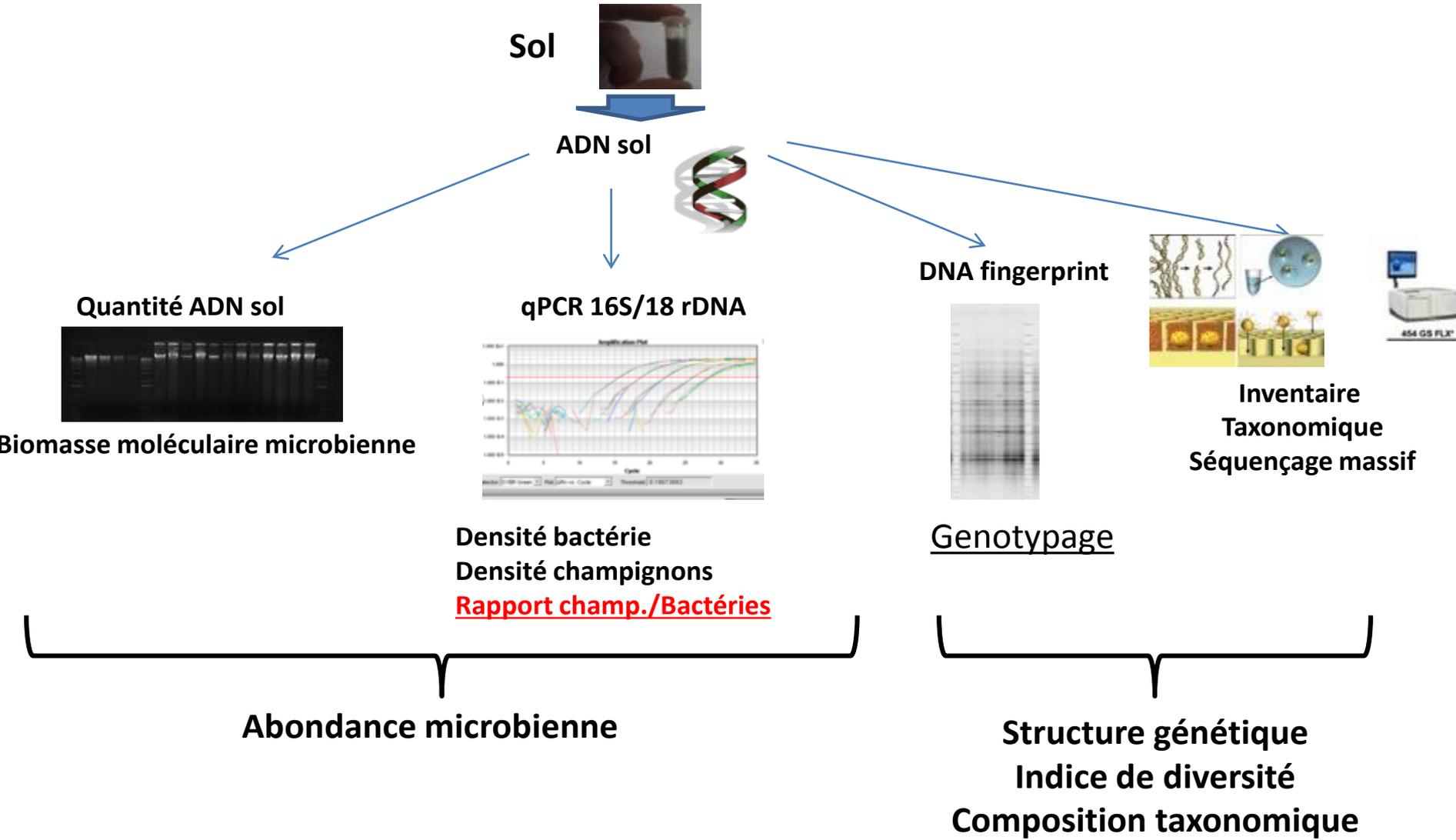
ADN



Métagénome

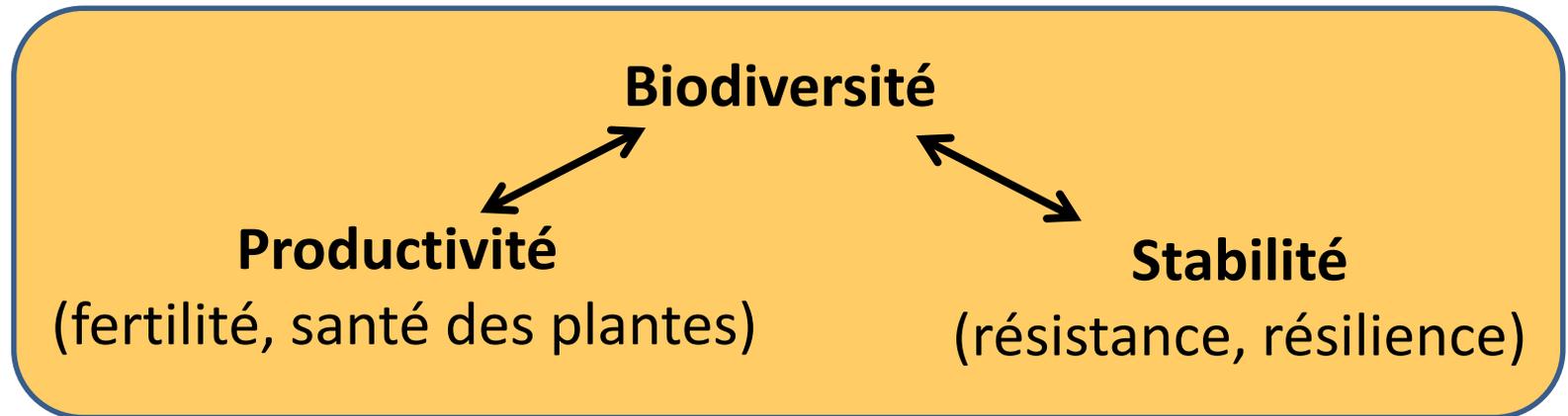
Abondance
Diversité
génétique/taxonomique/fonctionnelle

Les outils disponibles



La biodiversité – une assurance pour l’avenir des productions agricoles!

Une loi écologique forte : l’assurance écologique (Loreau et al. 2000)

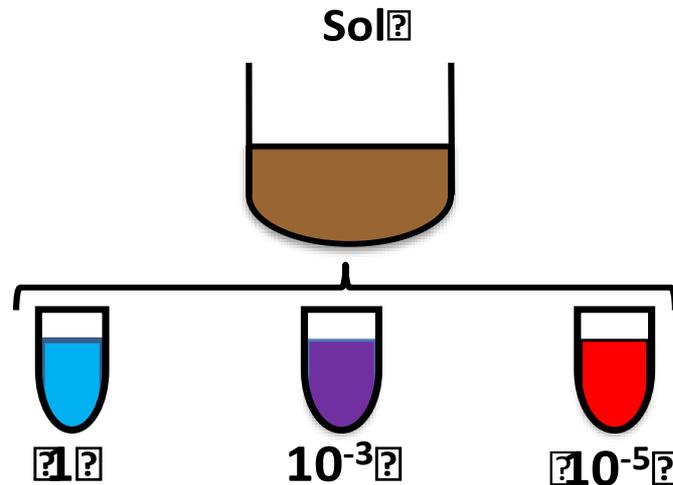


DURABILITE
(des productions, du patrimoine biologique)

Biodiversité = assurance à court et moyen termes

Rôle fonctionnel de la biodiversité microbienne

Manipulation expérimentale de la biodiversité microbienne d'un sol



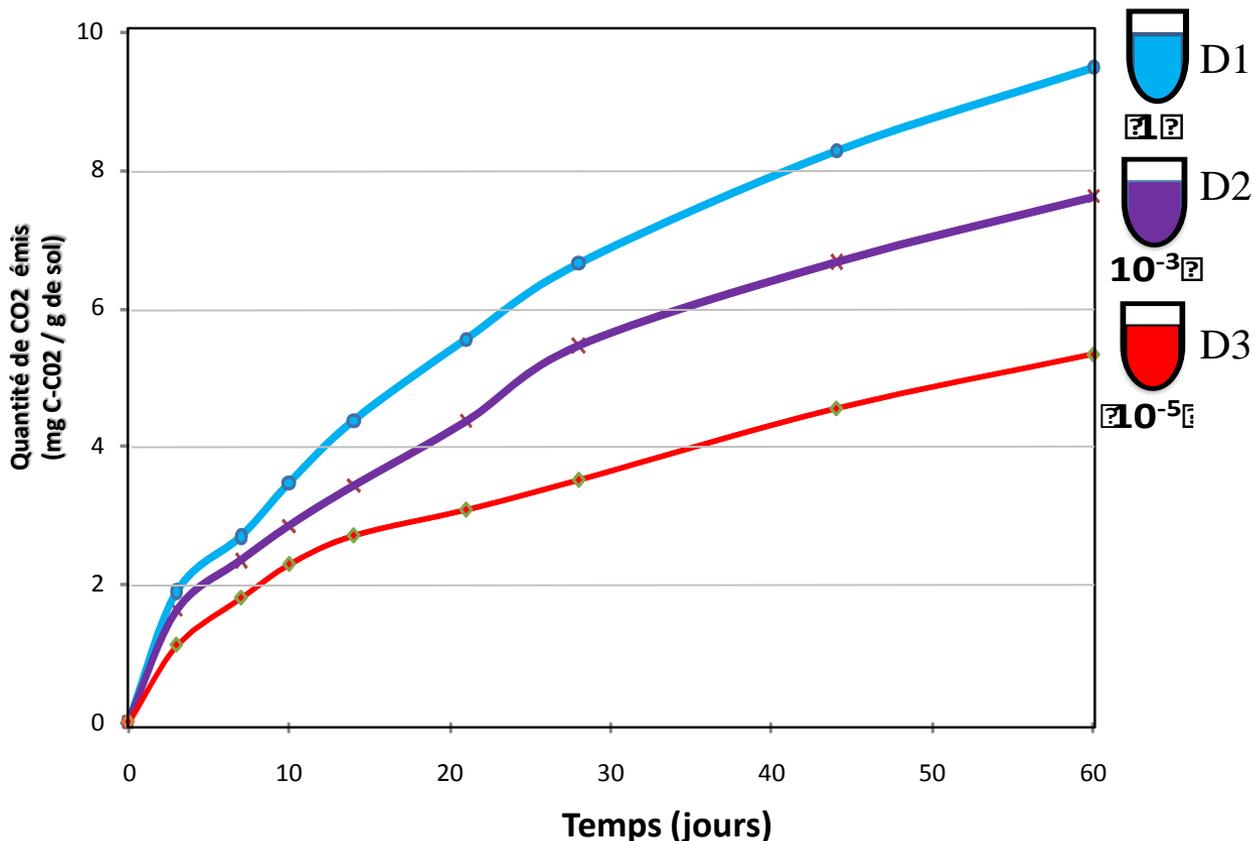
Dilution de la diversité du sol
= érosion de la diversité

Minéralisation
de la matière organique

Etat sanitaire

Croissance des plantes

Lien diversité microbienne – minéralisation matière organique

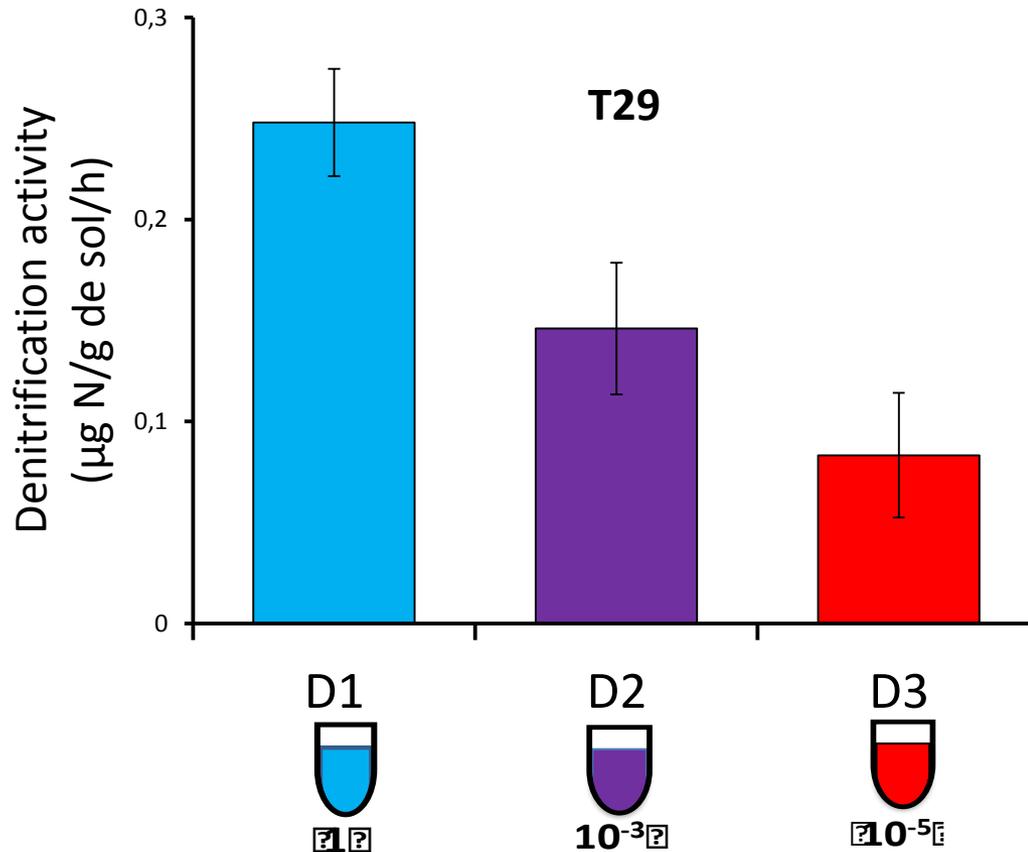


Erosion de la biodiversité du sol = réduction de la minéralisation de la Matière Organique



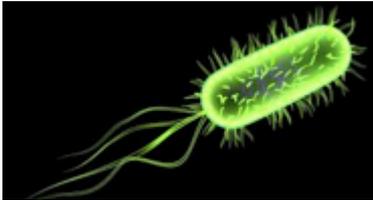
Baisse de la fertilité biologique du sol (eutrophisation, acidification, déstructuration du sol...)

Cycle de l'azote - Dénitrification (Philippot et al., INRA de Dijon)

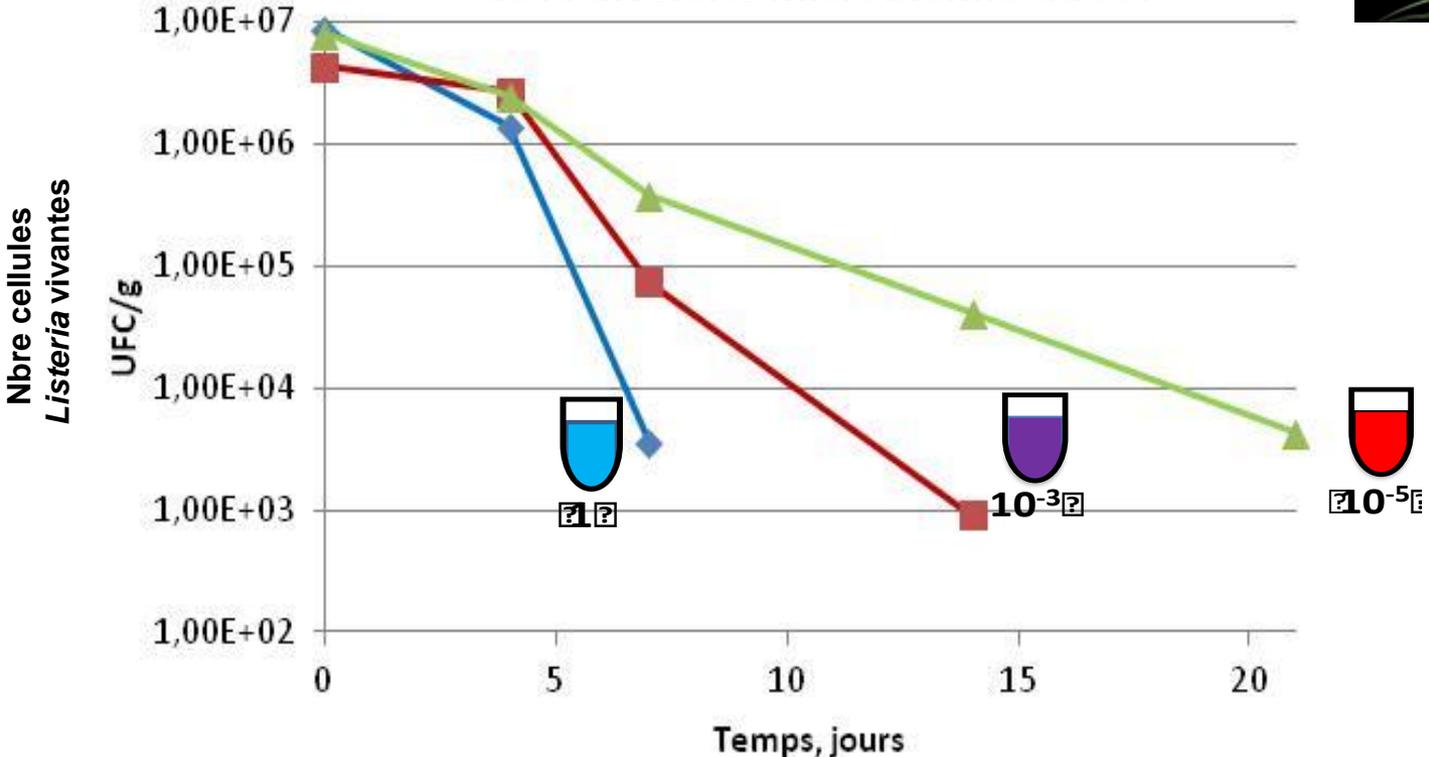


Erosion de la biodiversité du sol = baisse de la dénitrification de 48 à 88%

Lien biodiversité microbienne – état sanitaire des sols



Survie de *Listeria monocytogenes* en fonction de la diversité microbienne du sol



**Biodiversité =
Barrière aux espèces invasives (pathogènes)**

Lien biodiversité microbienne – croissance végétale

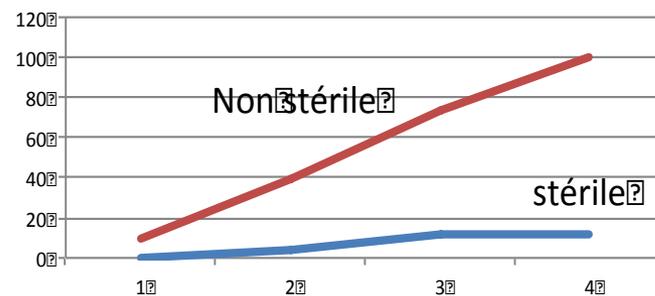
Luzerne



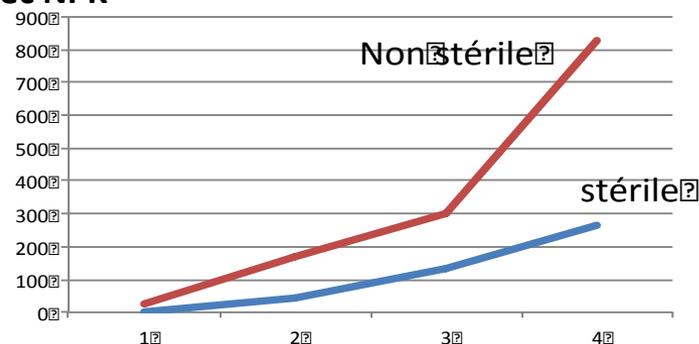
Sol stérile

Sol natif

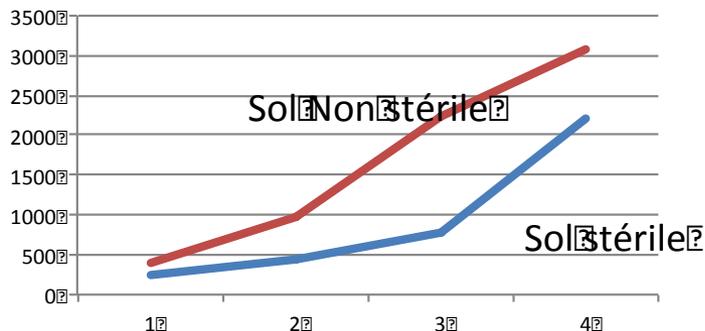
Sans NPK Surface foliaire



Avec NPK



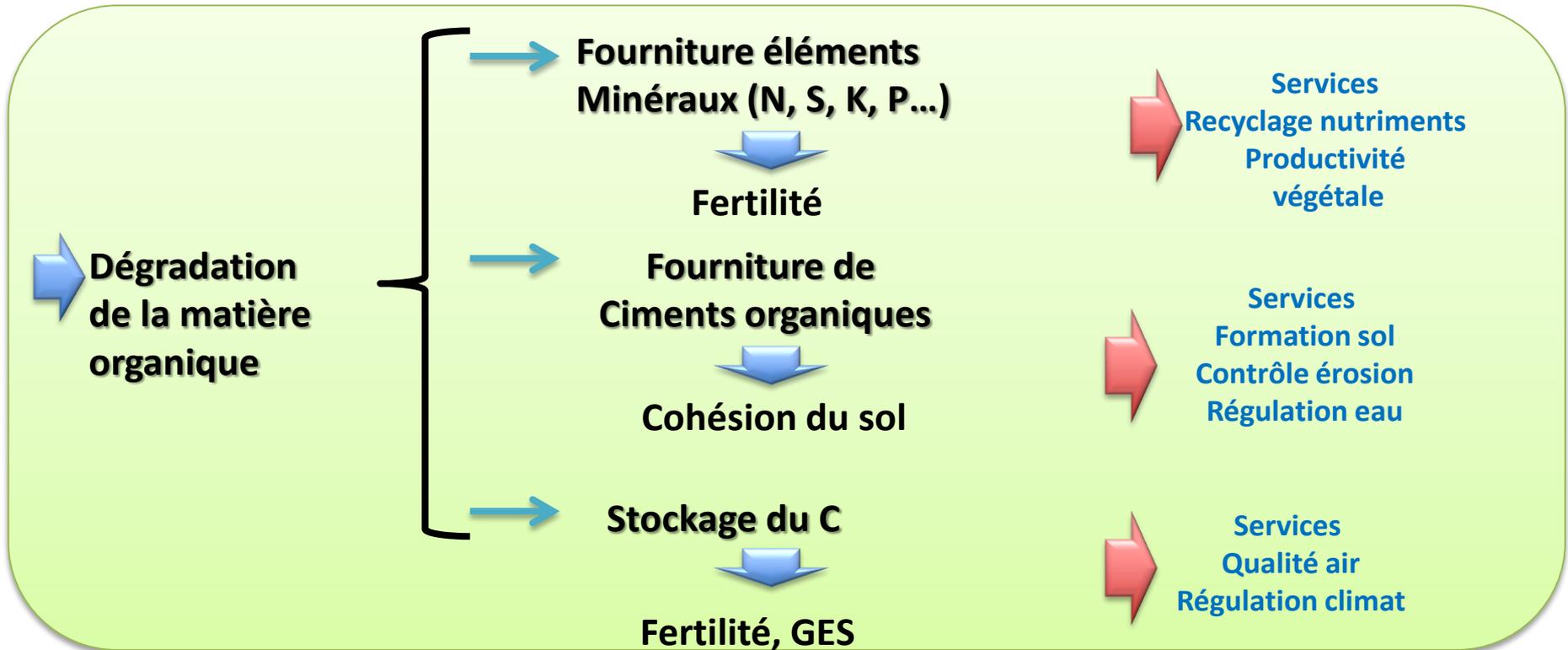
Blé



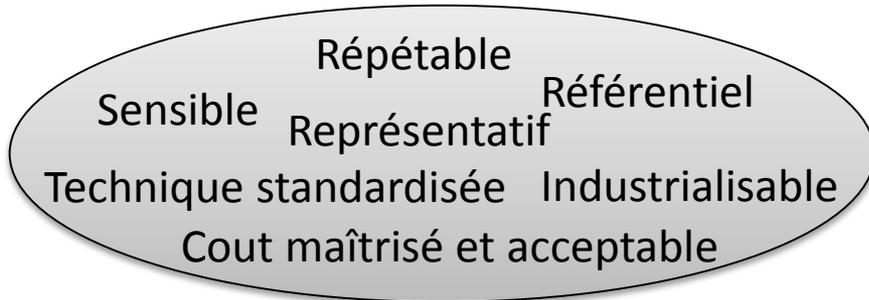
Erosion de la biodiversité du sol = réduction de la croissance végétale



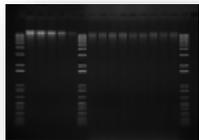
Lien diversité microbienne – fonctions - services



« Des indicateurs microbiens opérationnels »



Biomasse moléculaire microbienne



Inventaire de diversité

Séquençage massif



- Bioindicateur quantitatif global
- Abondance microorganismes du sol



Quantité d'ADN extrait du sol

- Bioindicateur qualitatif
- Richesse (nb. genres, nb. OTUs), équitabilité, diversité (Shannon)
- Composition taxonomique

Mise en place de « référentiels » pour l'interprétation

Échelle Globale Réseaux (observation – surveillance)

Avec ou sans *a priori*

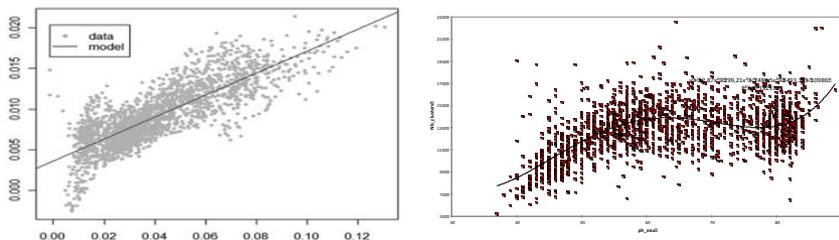
Intègre variabilité pédoclimatique et agronomique

Analyse des modes d'usage (RMQS) voire des systèmes (AgrInnov)

Approche générique

Difficile d'analyser l'historique

Approche nuage de points – Modélisation statistiques



**Gamme de variation
Modèle prédictif (permet
d'éliminer l'effet sol)**

Échelle locale - Sites expérimentaux

Avec *a priori*

Intègre variabilité agronomique

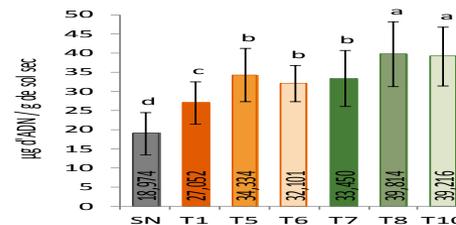
Analyse des systèmes et des pratiques

Approche d'une faible généralité

Possibilité d'intégrer l'historique

Possibilité d'intégrer des objectifs de production

Statistique descriptive-comparative
(ANOVA ou autres)



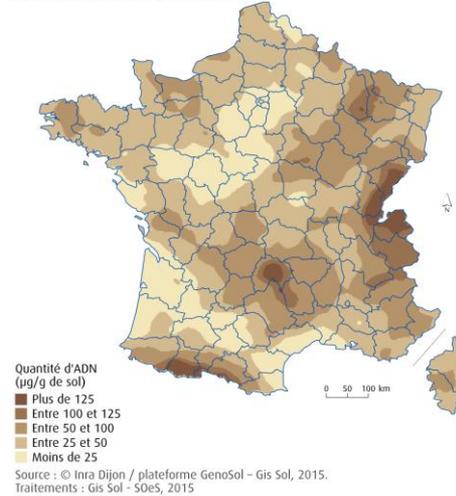
**Hierarchie des
pratiques**

Exemple de référentiels

Quel référentiel pour quelle fonction ?

Biomasse moléculaire microbienne

Biomasse microbienne des sols



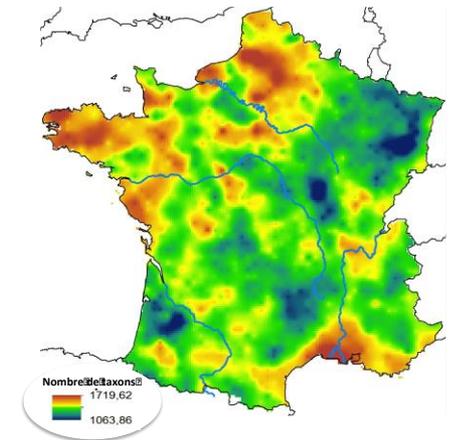
Approche réseaux nationaux (RMQS)



Modèle prédictif :

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

Inventaire de diversité



Valeur de référence écologique pour un type pédoclimatique
Diagnostic d'état biologique



<http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biodiversite-bacterienne-des-sols>

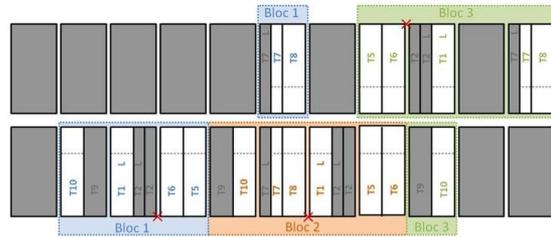


<http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-biomasse-microbienne-des-sols-en-metropole>

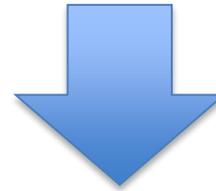
Exemple de référentiels

Quel référentiel pour quelle fonction ?

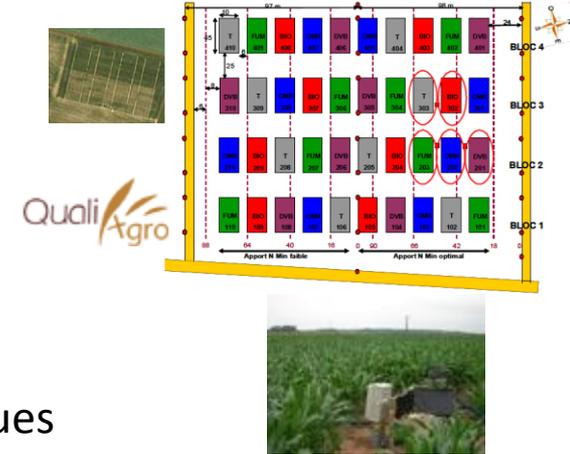
Approche sites expérimentaux



ARVALIS
Institut du végétal



Analyse fine des impacts des pratiques
Relation avec des objectifs de
production



Hiérarchie de l'impact des pratiques

Travail du sol > fertilisation > rotation > phytoprotection

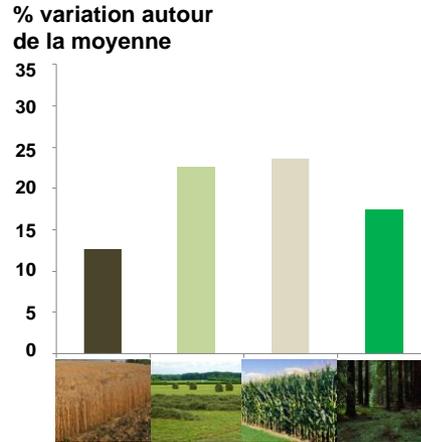
Σ Impact des pratiques \neq Impact de ITK

Difficile de prédire l'impact d'un système

Recul technique nécessaire sur les indicateurs

Variabilité méthodologique

- Effet machine
- Effet manipulateur
- Effet jour



**Variabilité méthodologique
Biomasse moléculaire
20%**

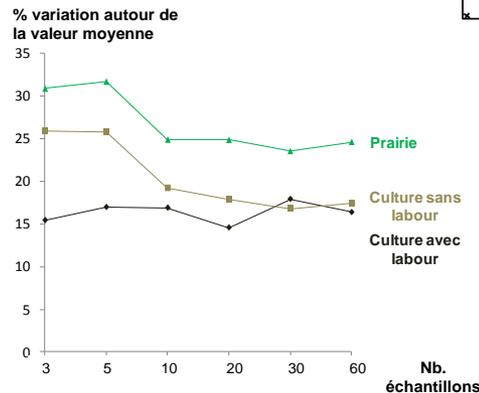
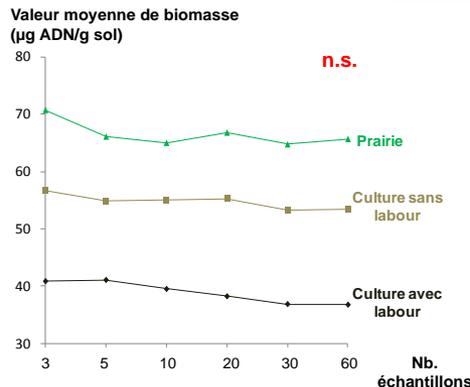
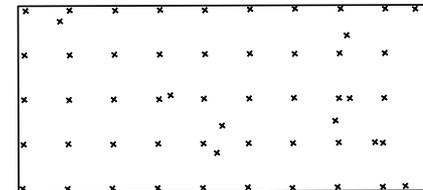


**Définir les seuils de
différences significatives**

Variabilité biologique

En fonction du mode d'usage

Prairie Culture sans labour Culture avec labour

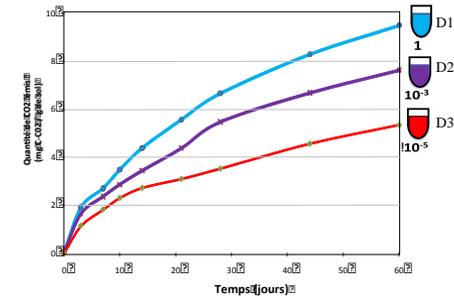
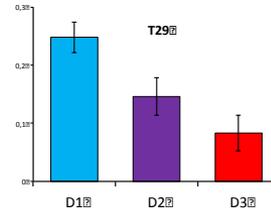


**Définir la stratégie
d'échantillonnage
3-5 échantillons / ha**

Recul (agro)écologique sur les bioindicateurs

Diversité microbienne (nombre de taxons) :

- démonstration expérimentale en conditions contrôlées
minéralisation MO = f(Diversité)



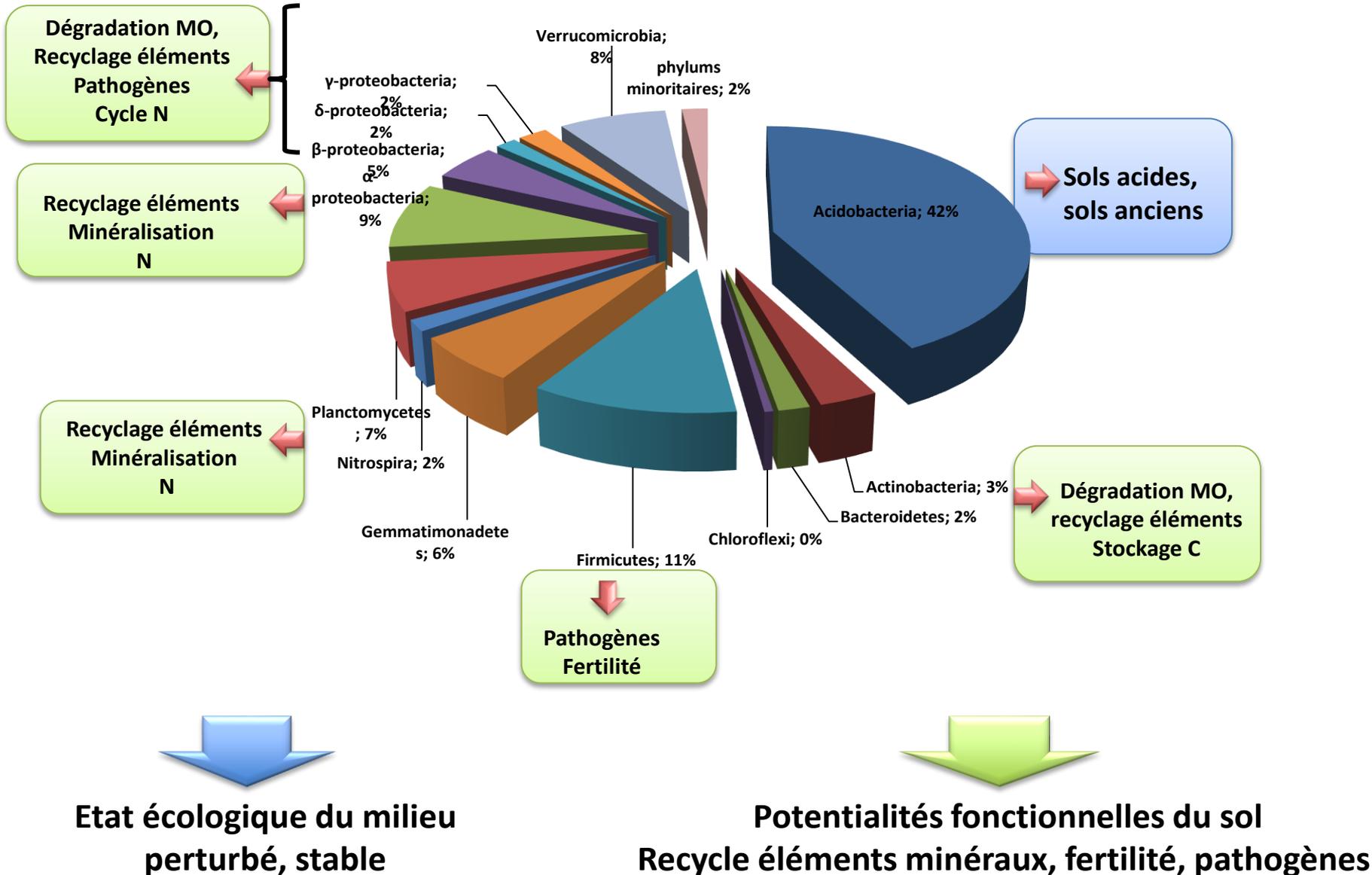
- **au terrain** : est ce que la minéralisation de la MO dépend de la diversité microbienne ?



➔ Méta-analyse sur sites expérimentaux et réseau RMQS :

- différentes pratiques entraînent différents niveaux de diversité microbienne
- effets significatifs donc confirmation de l'importance de la diversité (10-80% de la variance expliquée)
- toutefois, l'effet peut être **positif** ou **négatif** (bactéries vs champignons).

Analyse de la qualité de la biodiversité = qualité de la composition (dépend de l'objectif)

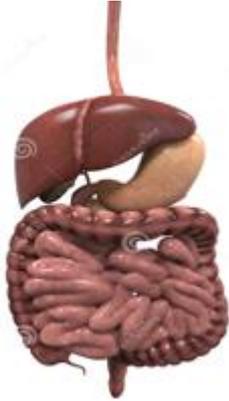




Définir des nouveaux indicateurs basés sur la composition microbienne

Tube digestif

10^{14} bactéries



Déséquilibre ratio
Firmicutes / Bacteroidètes



Obésité
Diabète
Bien être ...

Sol



Déséquilibre ratio
microbien



mauvais fonctionnement
du sol



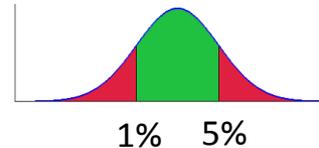
Ratio Champignons / Bactéries



Ratio bactéries pathogènes /
Bactéries antagonistes



Définir d'autres Ratio microbiens

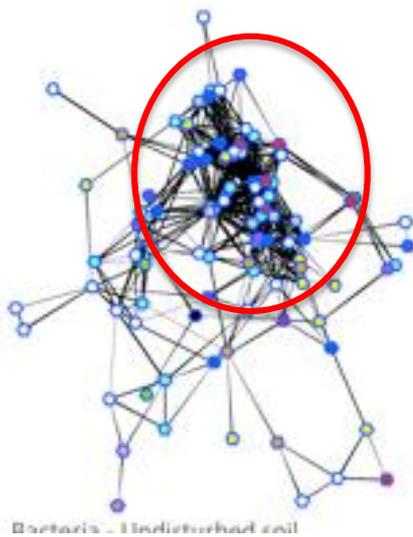




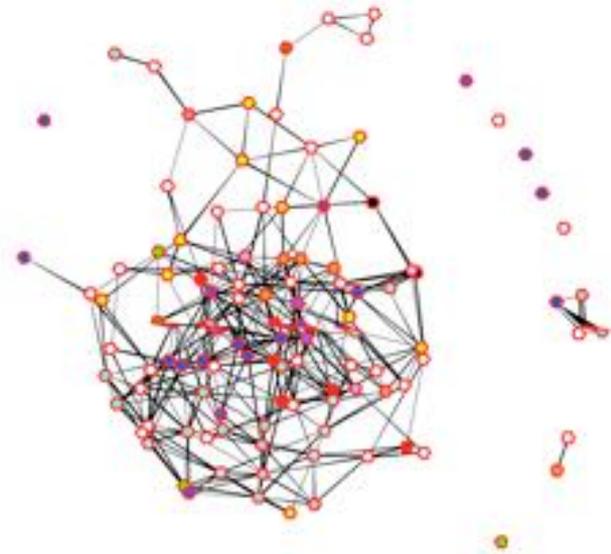
Autre piste : les réseaux de cooccurrence

Rendent compte de la **complexité** et de la **connectivité** des relations entre les taxons bactériens d'une communauté
« **social network** »

Hyper connecté



Sol non pollué



Sol pollué

Pas de différence de diversité
Réseau plus complexe et plus connecté

Bio indicateurs ne répond pas à des objectifs de production mais à des objectifs d'évaluation du patrimoine biologique et de la durabilité des pratiques

Bioindicateurs

≠

Reliquats azotés



Etat du patrimoine biologique

Durabilité des pratiques

Niveau de fertilité biologique d'un sol

Pas de lien direct avec indicateur économique

« Conseil pour l'évolution des systèmes

dans un contexte de réduction des intrants

et du travail du sol »

Lien direct avec le rendement

Conseil pour l'action de fertilisation

Lien direct avec indicateur économique

Un même objectif : l'agroécologie différents métiers

Ecologue

- Les outils
- Les référentiels (écologiques *via* réseau observation)
- L'interprétation du diagnostic

Agronome

- Les questionnements agricoles
- Les référentiels agronomiques (via sites expérimentaux)
- Le développement du conseil agronomique

Les laboratoires d'analyses

- L'industrialisation des nouveaux outils
- La baisse des coûts
- La filière économique (échantillonnage-analyse- diagnostic)
- Diffusion du conseil



Merci de votre attention ...

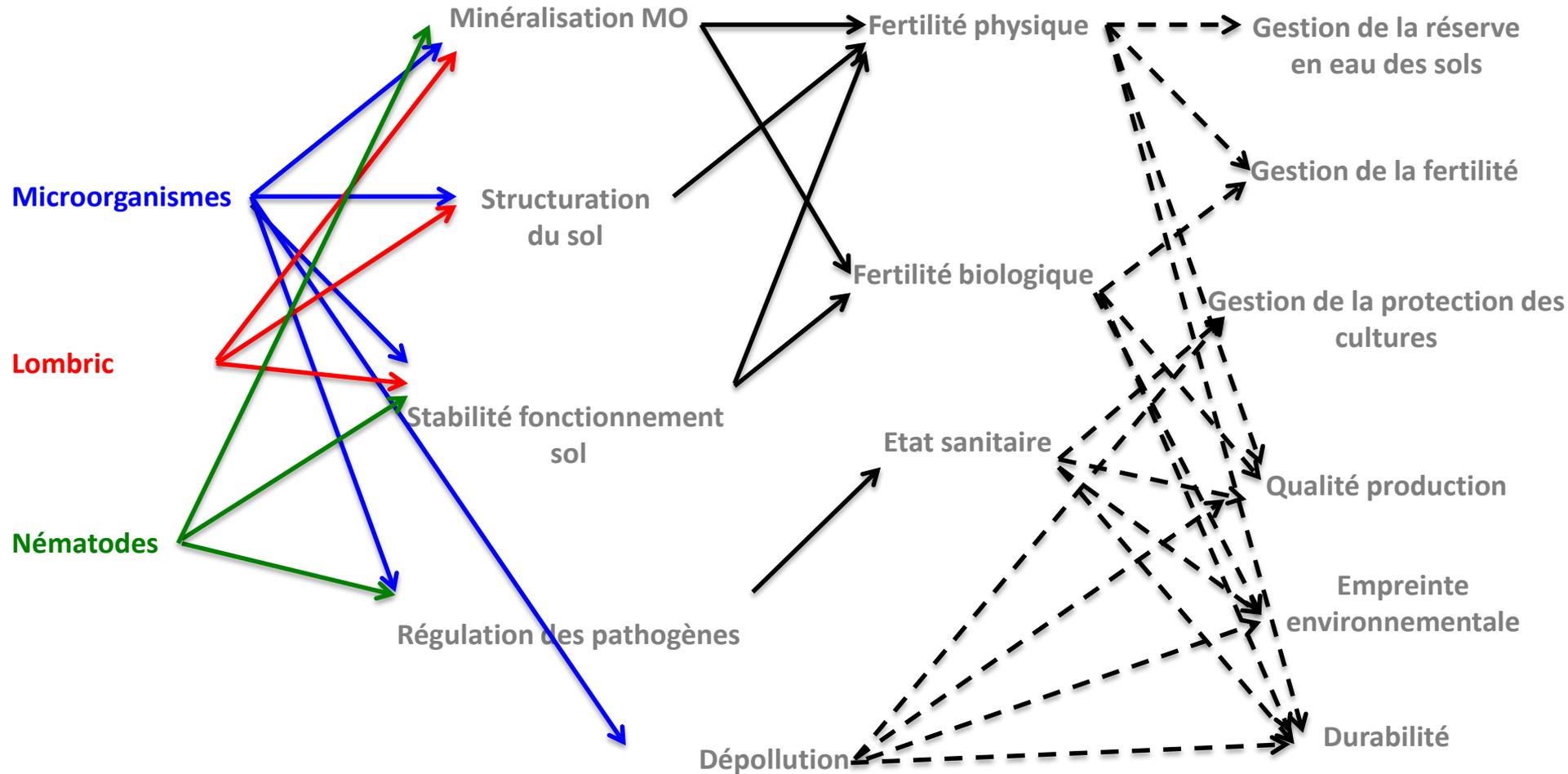
Organismes - fonctions biologiques – questionnements agronomiques

Patrimoine biologique

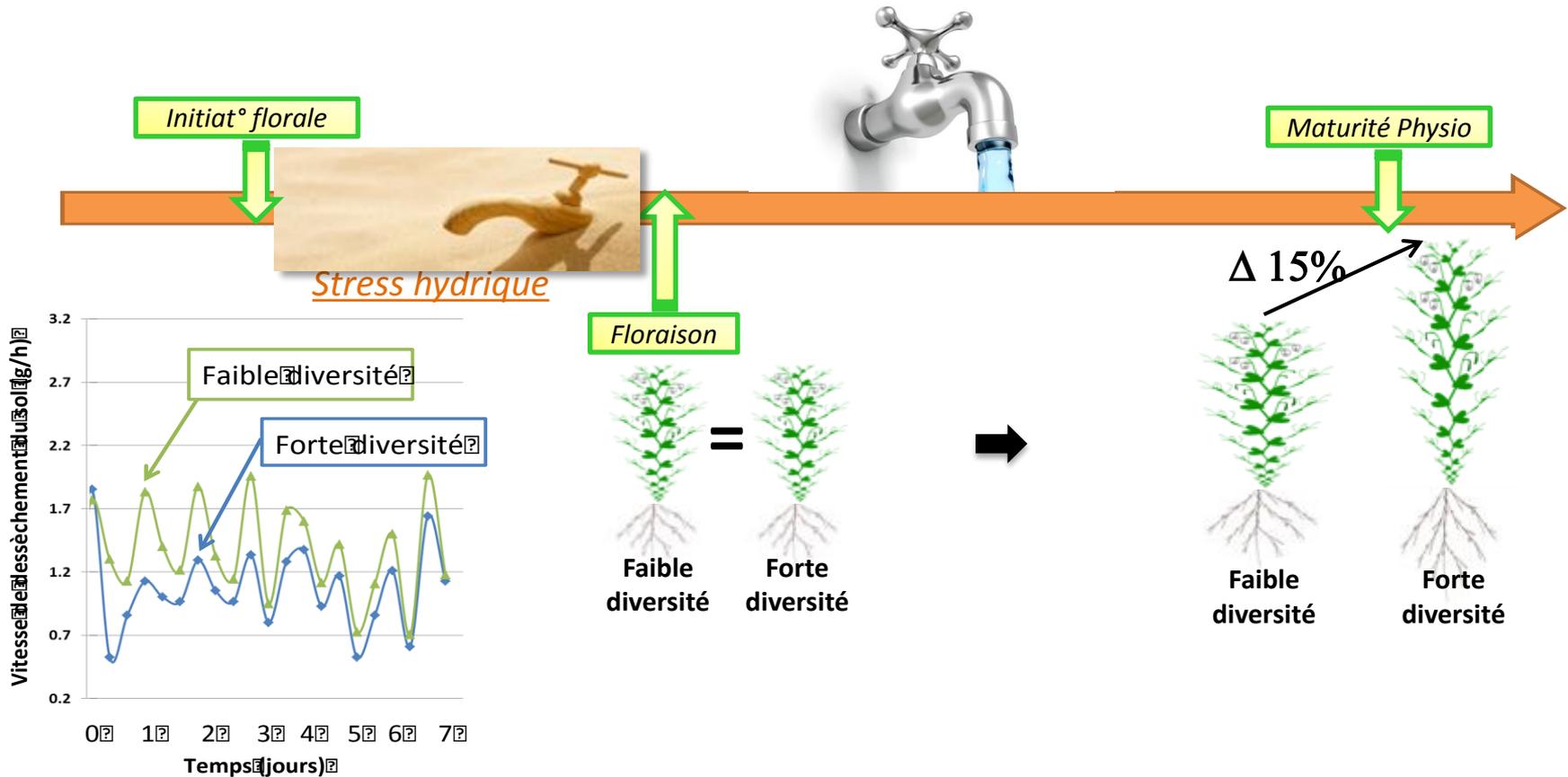
Fonctions biologiques

Fonctions agronomiques

Questionnements agricoles



Lien diversité microbienne – résistance à la sécheresse du sol



Dessèchement du sol = f(diversité microbienne)

Lien diversité microbienne – Stabilité structurale du sol

