

Intérêt de la biologie des sols pour les productions agricoles : de la recherche aux agriculteurs

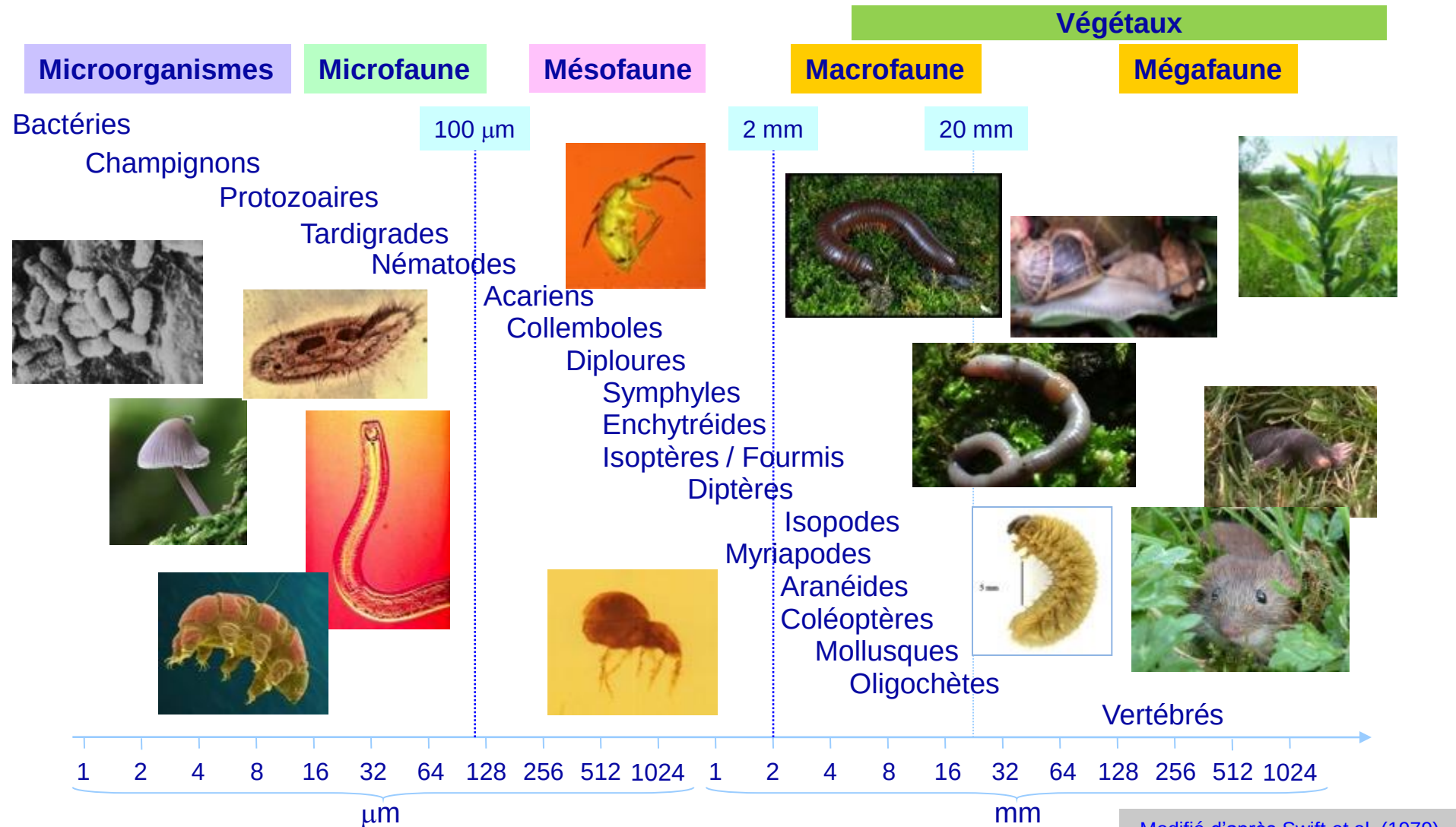


L. RANJARD
UMR Agroécologie - INRA Dijon



Le sol est un milieu « vivant »

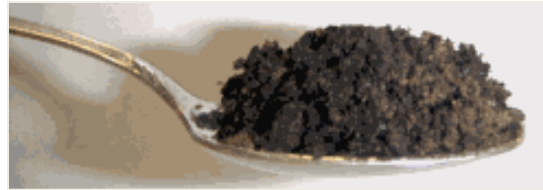
de l'infiniment petit au visible



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



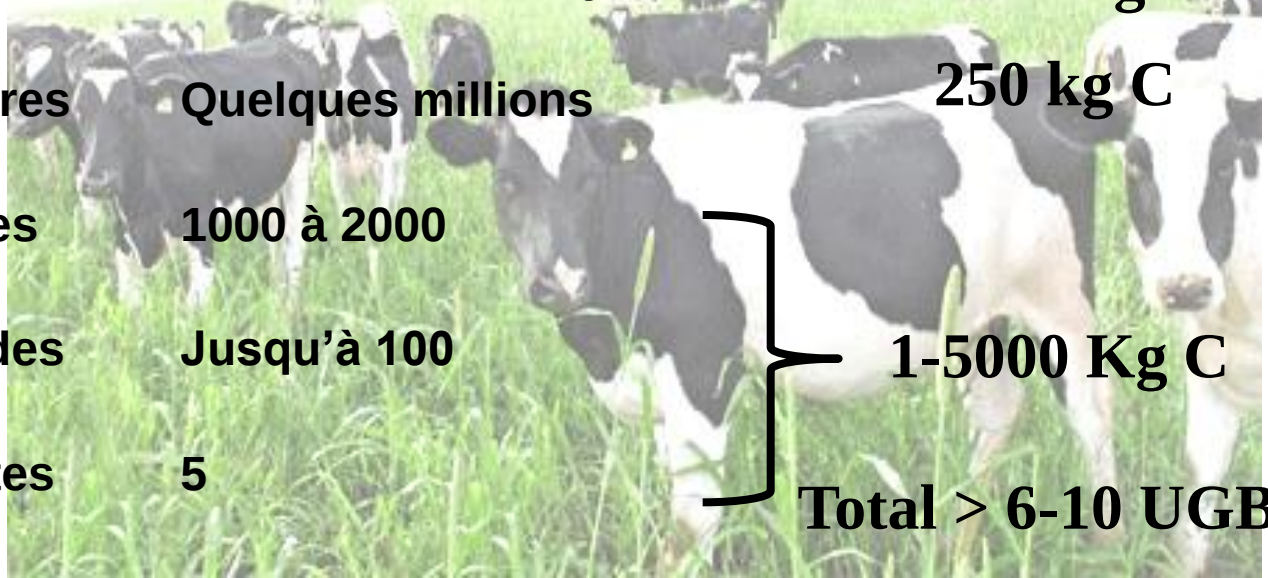
❖ Arthropodes Jusqu'à 100



❖ Oligochètes 5

1-5000 Kg C

Total > 6-10 UGB



Le sol est un milieu « vivant »

Combien d'espèces ?



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



Prédateurs

Contrôle des
populations
d'invertébrés

Microfaune



Régulation (prédation)
des microorganismes

*Régulateurs
biotiques*

Organismes
nuisibles



Bioagresseurs

Macrofaune (et racines)

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



Ingénieurs du sol

Méso- et macrofaune



Ingénieurs de la litière

Décomposition MO

Les communautés microbiennes, bioindicateurs pertinents

Enorme abondance et diversité



10^9 bactéries
 10^6 espèces



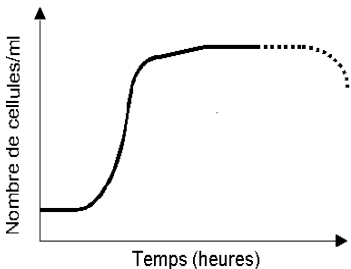
10^6 champignons
 10^3 espèces



Enorme capacité d'adaptation



Petite taille



Temps de génération court

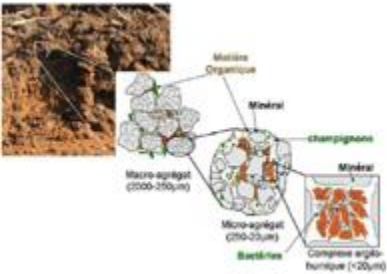


Plasticité du génome

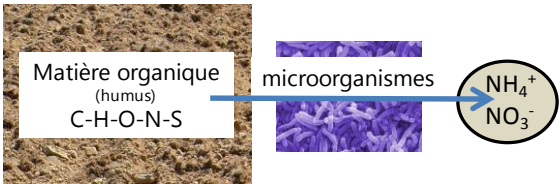


Réponse rapide aux modifications environnementales

Implications dans de nombreuses fonctions



Structuration du sol



Minéralisation matière organique, recyclage carbone, nutriments



Dépollution du sol

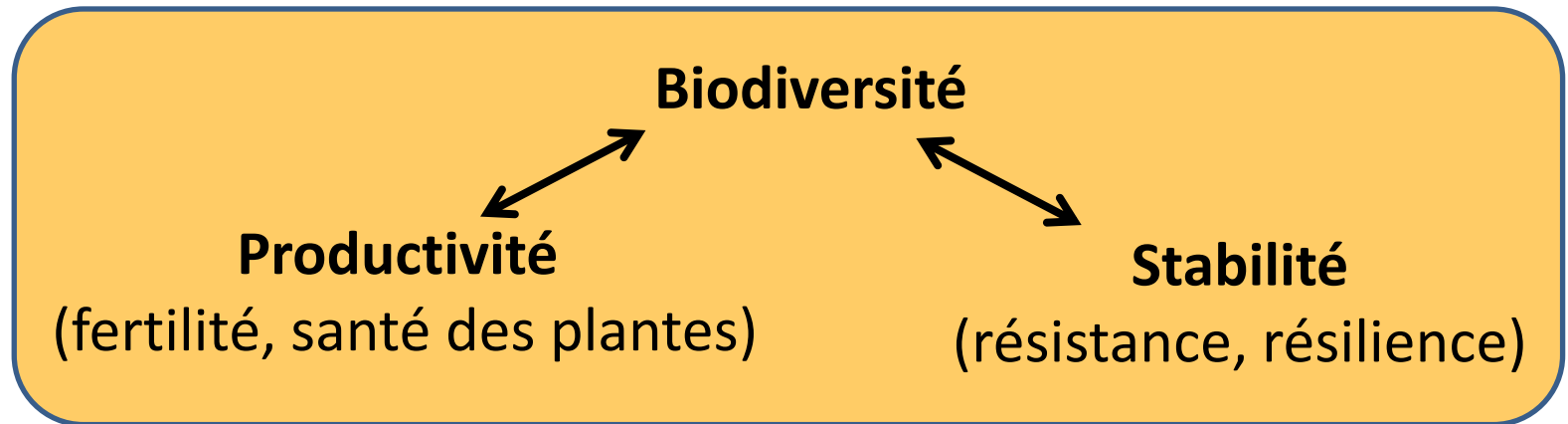


Lutte contre pathogènes



La biodiversité – une assurance pour l'avenir !

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

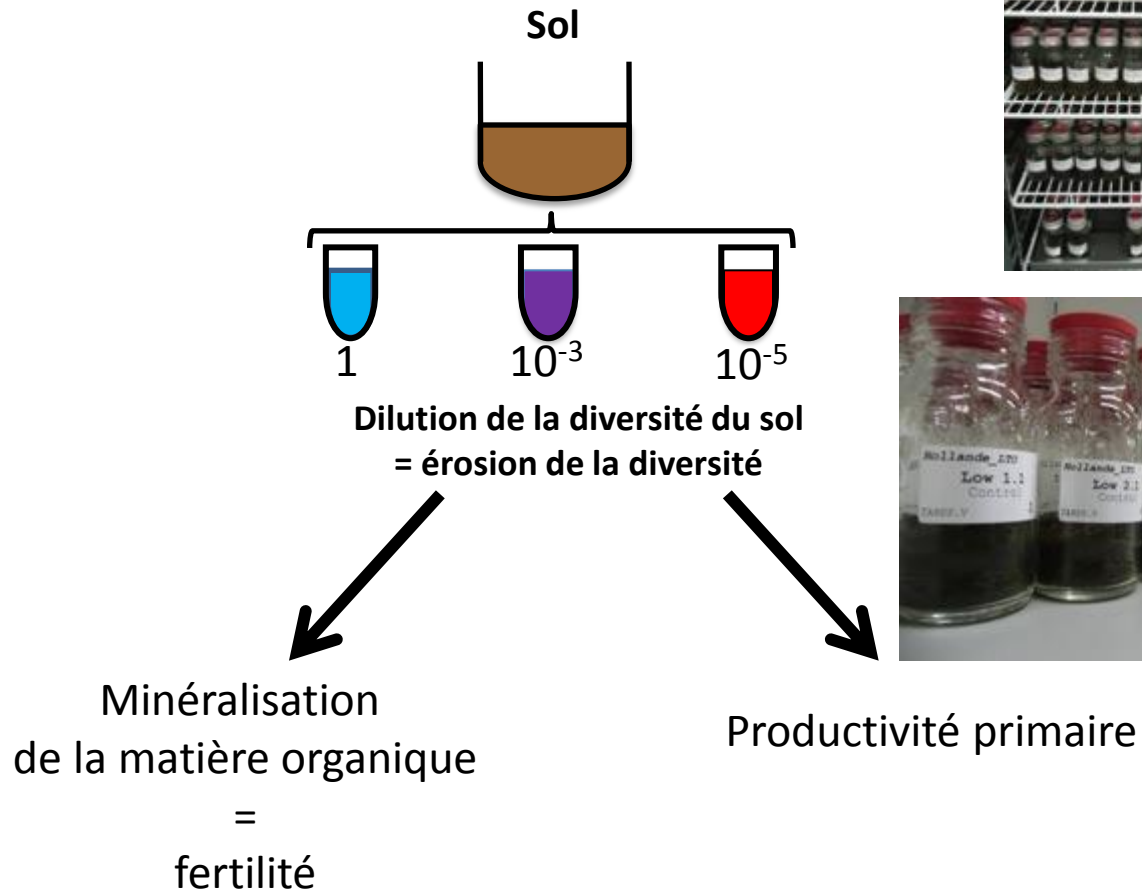


DURABILITE
(des productions, du patrimoine biologique)

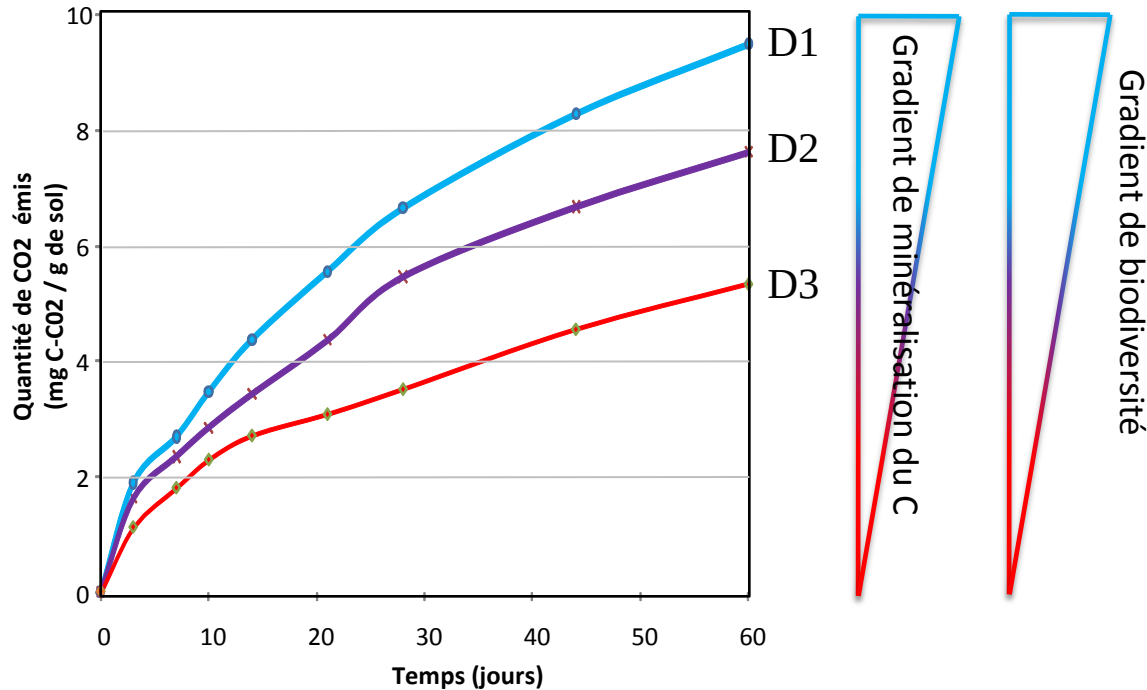
Biodiversité = assurance à court et moyen termes

Démonstration du rôle de la biodiversité microbienne

Manipulation expérimentale de la biodiversité microbienne d'un sol



Lien biodiversité – minéralisation de la matière organique du sol



Erosion de la biodiversité du sol = réduction de la minéralisation de la MO

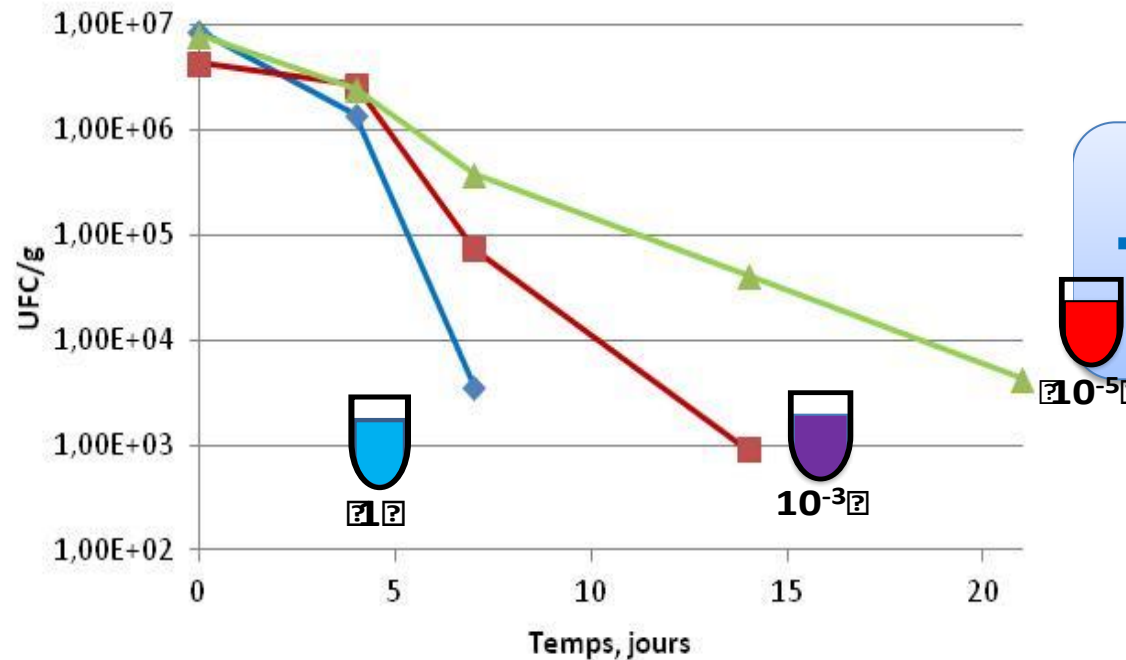


Baisse de la fertilité du sol
(eutrophisation, acidification, déstructuration du sol...)

Lien diversité microbienne – qualité sanitaire des sols

Survie de *Listeria monocitogenes* dans le sol en fonction de la diversité microbienne

Nbre cellules
Listeria vivantes



Biodiversité

Blue > Red > Green



10⁻⁵

10⁻⁵

10⁻³

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



Lien biodiversité microbienne – productivité primaire

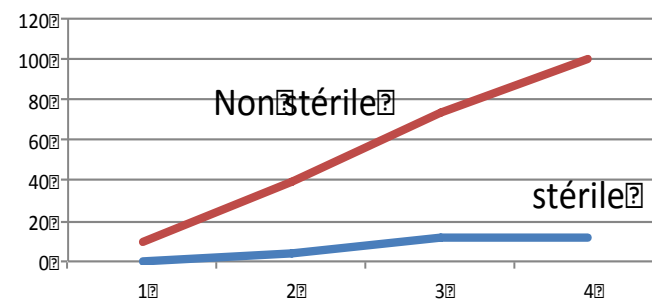
Luzerne



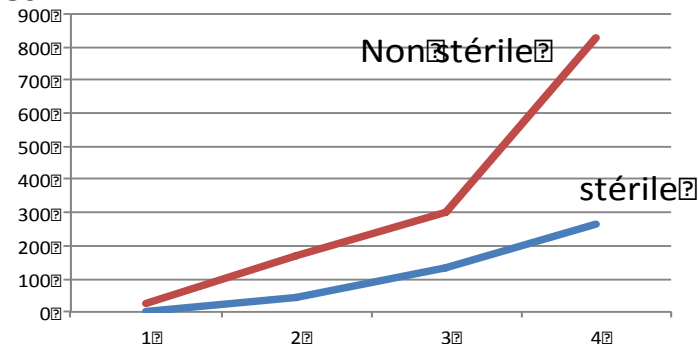
Sol stérile

Sol natif

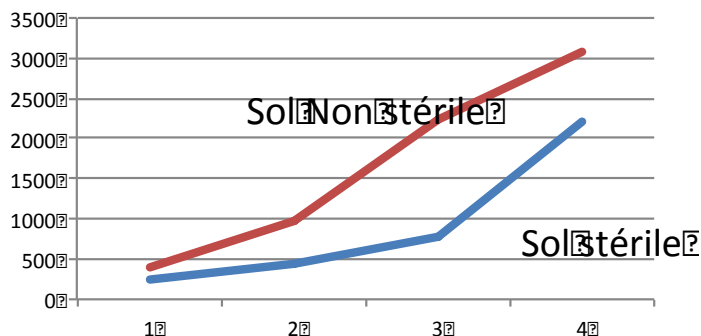
Sans NPK Surface foliaire



Avec NPK

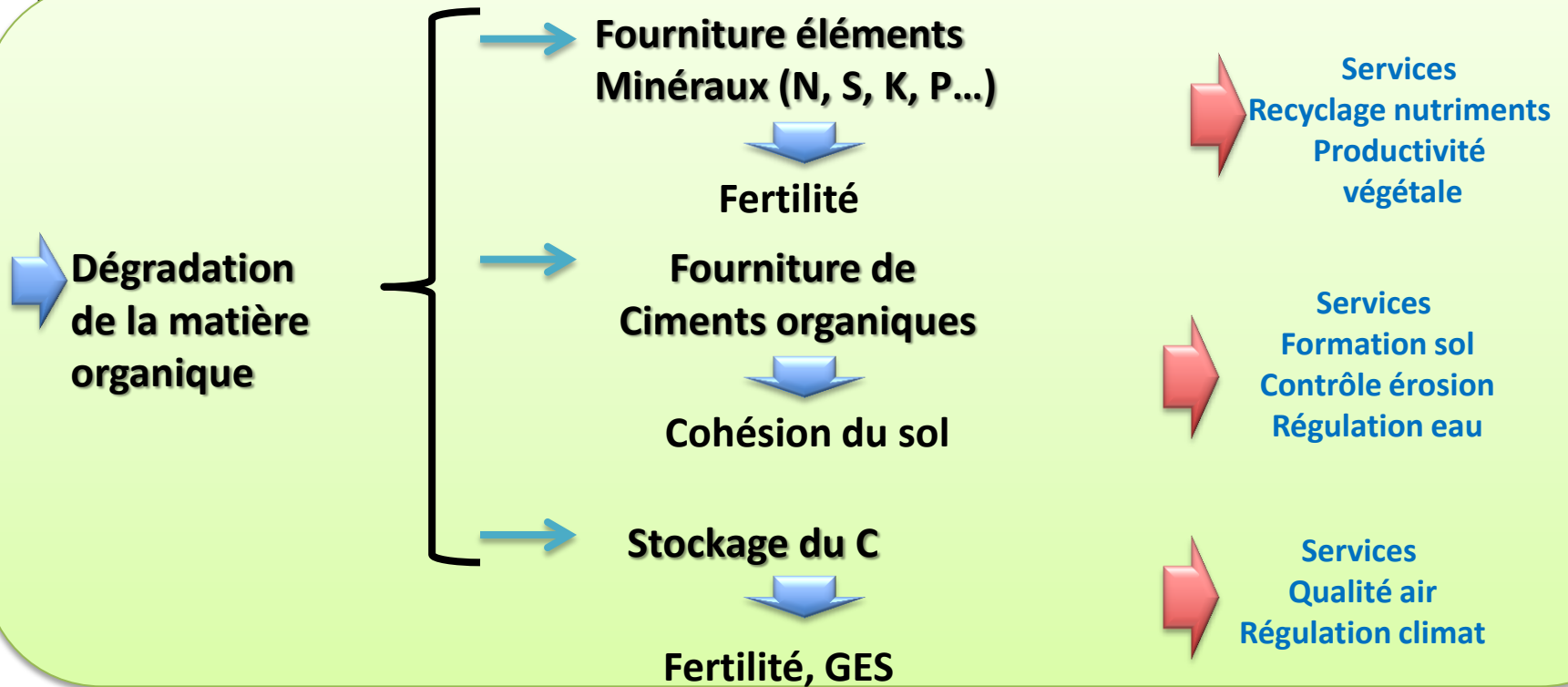


Blé



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

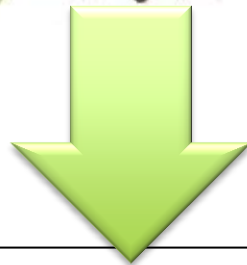
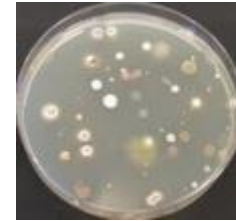
Lien diversité microbienne – fonctions - services



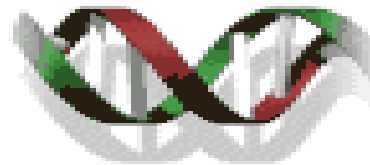
Comment aborder la diversité microbienne ?

Une nouvelle voie : l'écologie moléculaire microbienne

Sol



ADN



Métagénome

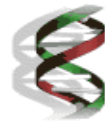
Abondance
Diversité
génétique/taxonomique/fonctionnelle



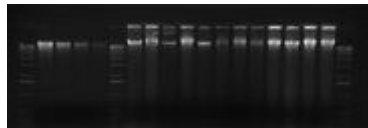
Les outils disponibles



ADN sol

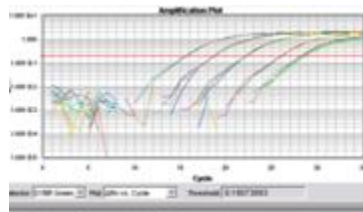


Quantité ADN sol



Biomasse moléculaire microbienne

qPCR 16S/18 rDNA

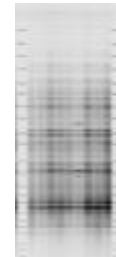


Densité bactérie

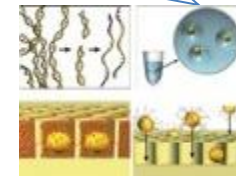
Densité champignons

Rapport champ./Bactéries

DNA fingerprint



Genotypage



Inventaire
Taxonomique
Séquençage massif



Abondance microbienne

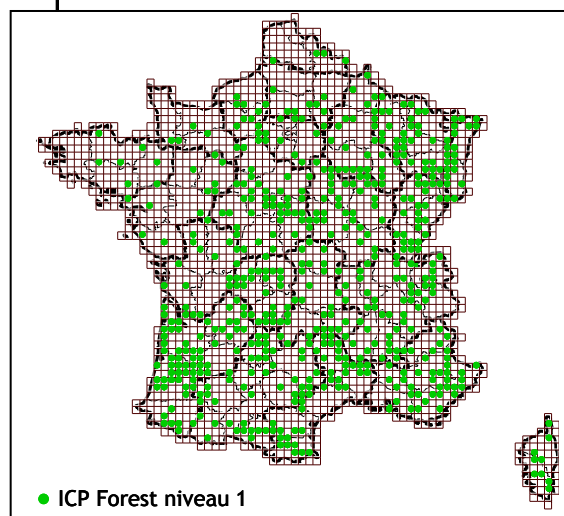
Structure génétique

Indice de diversité

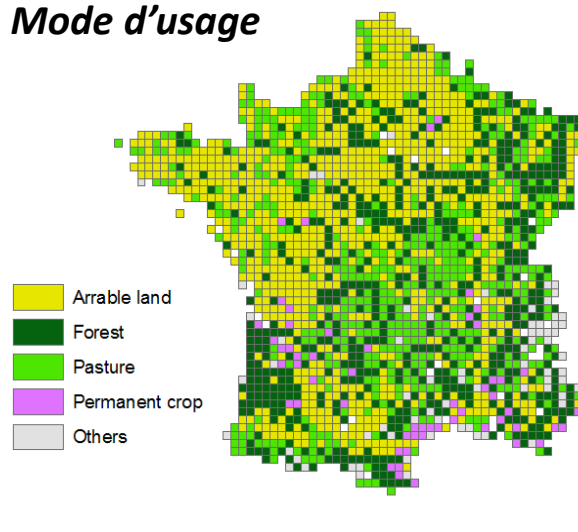
Composition taxonomique

Une initiative française et structurante : ECOMIC-RMQS

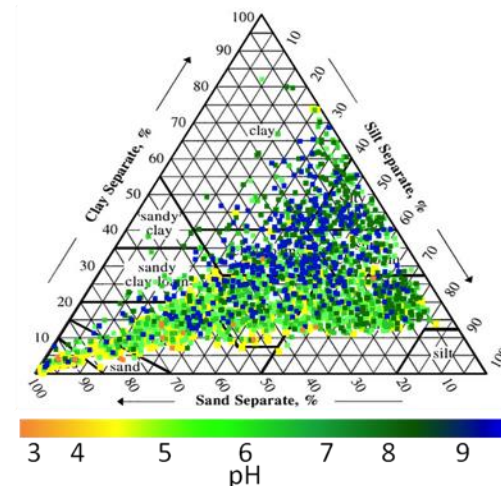
RMQS : Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, mis en place en 2002 (INRA INFOSOL, Orléans, partenaire 2), grille d'échantillonnage des sols français : 16 kmx16km sur toute la France $\Rightarrow$ 2200 sites



Mode d'usage



Classe texturale



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

Cartographie de la qualité des sols basée uniquement sur les paramètres physico-chimiques :

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



ECOMIC-RMQS

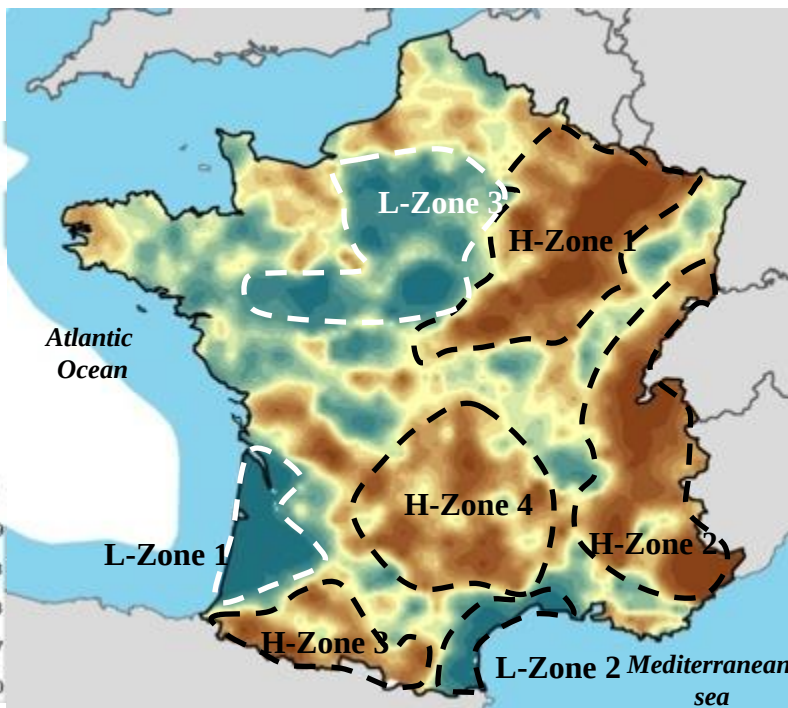
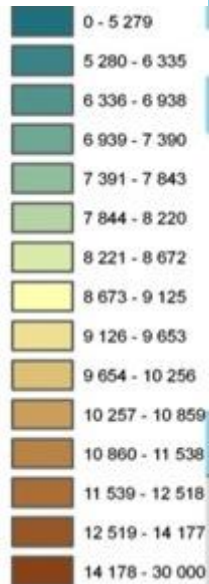
Prise en compte de la composante microbienne (abondance et diversité)



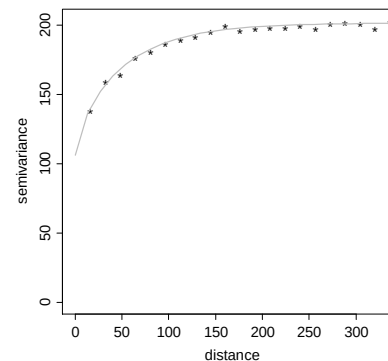
Cartographie nationale de la biomasse moléculaire des sols

➔ Distribution hétérogène de la biomasse, structurée en profils biogéographiques

DNA yield
ng.g⁻¹ soil



Hot-spot de biomasse
Low-spot de biomasse



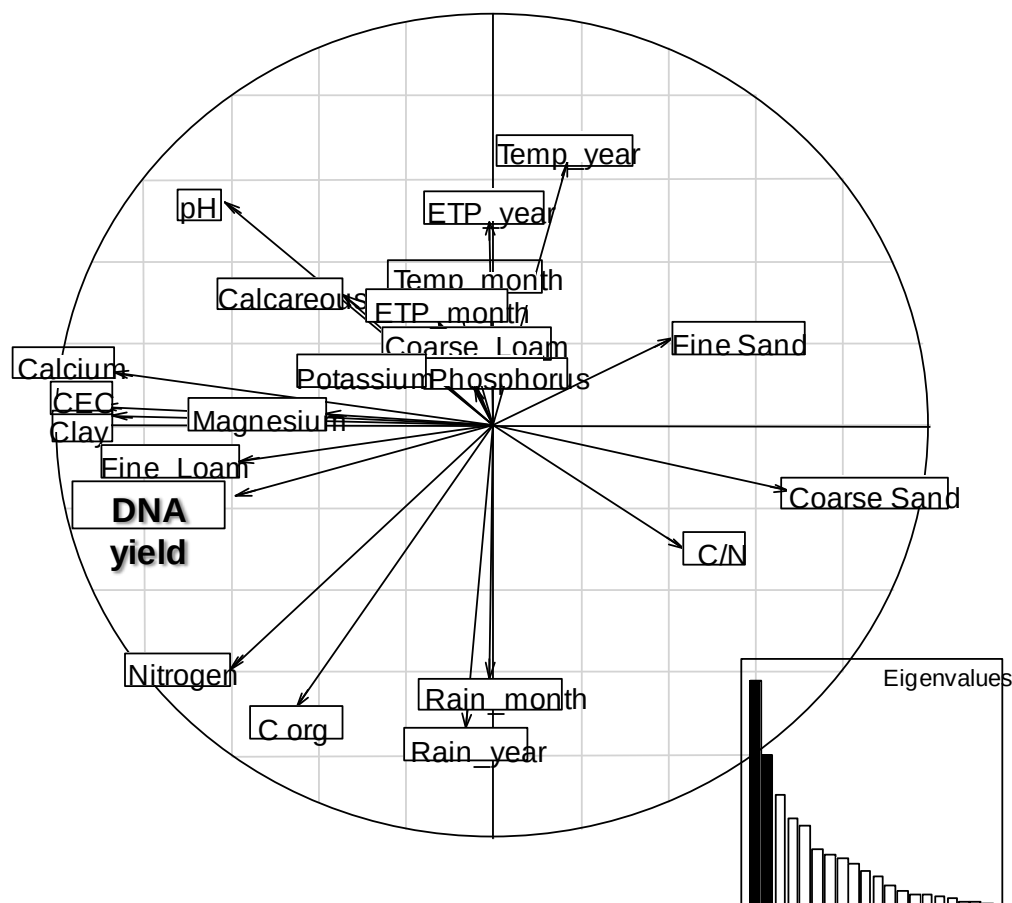
➔ Auto corrélation 160 km (patch de 100^{aine} km)

➔ Échelle de variation des grands
ensembles pédologiques – mode d'usage

➔ petit v (lissage), variation à courte distance



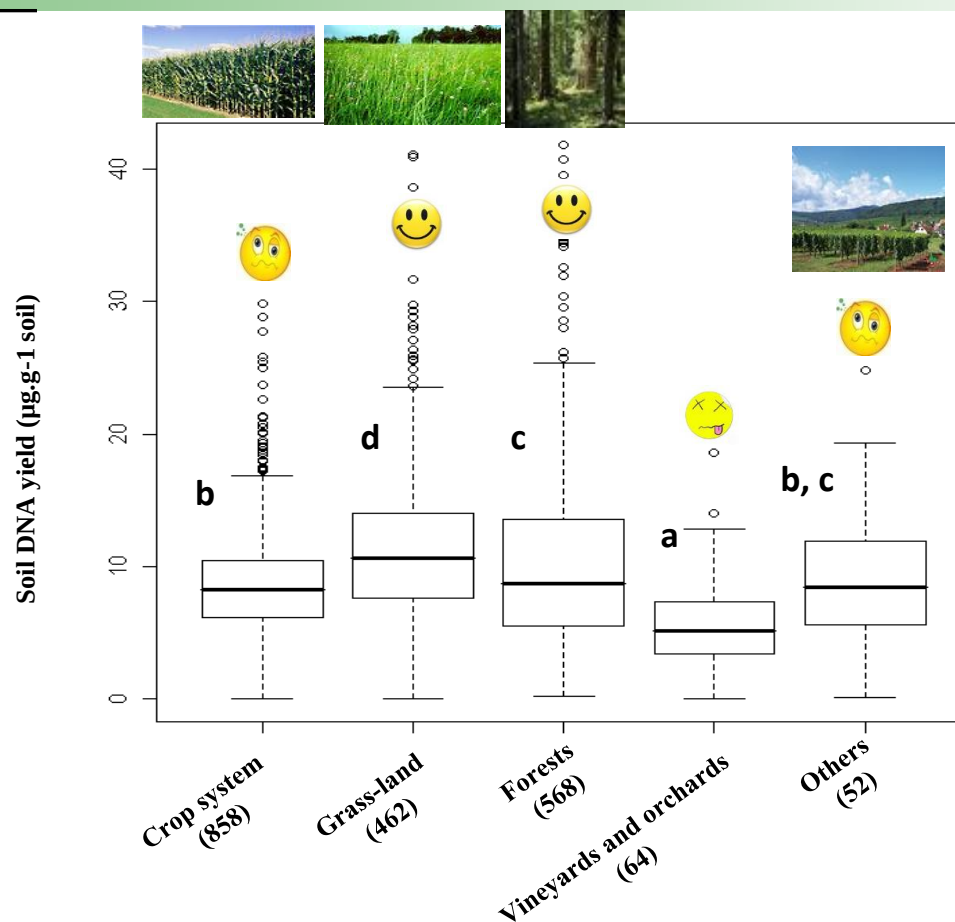
Influence des caractéristiques pédo-climatiques des sols



Texture, CEC > C.org, N, pH, C/N >>> paramètres climatiques

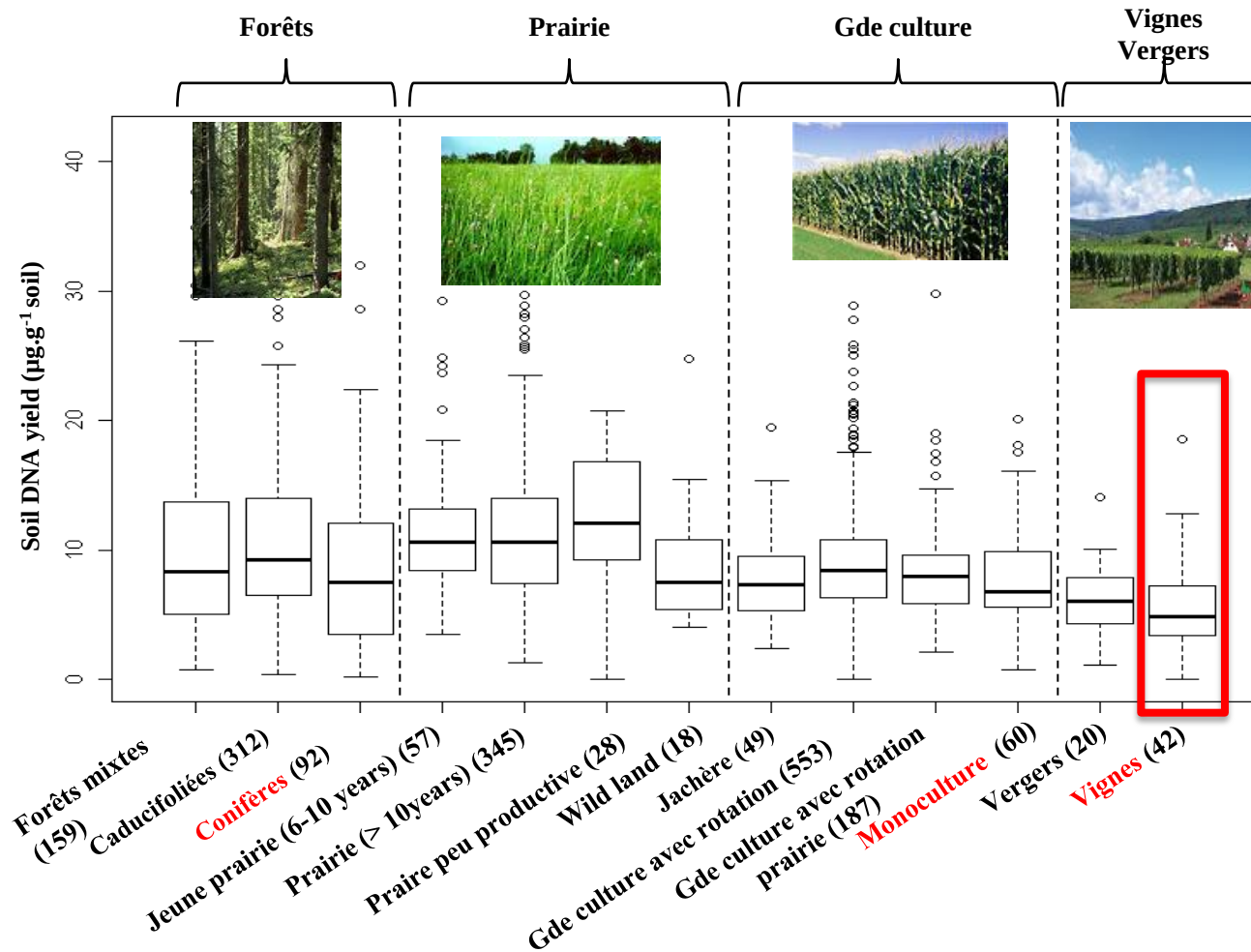


Influence du mode d'usage des sols (niveau 1)

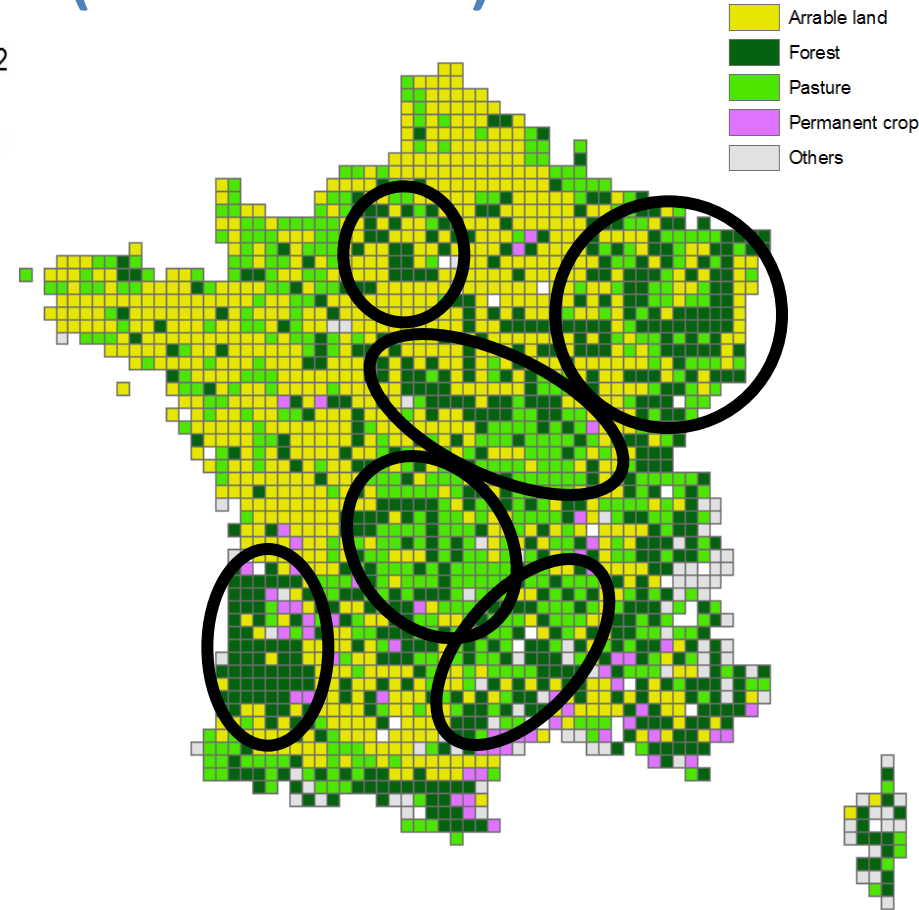
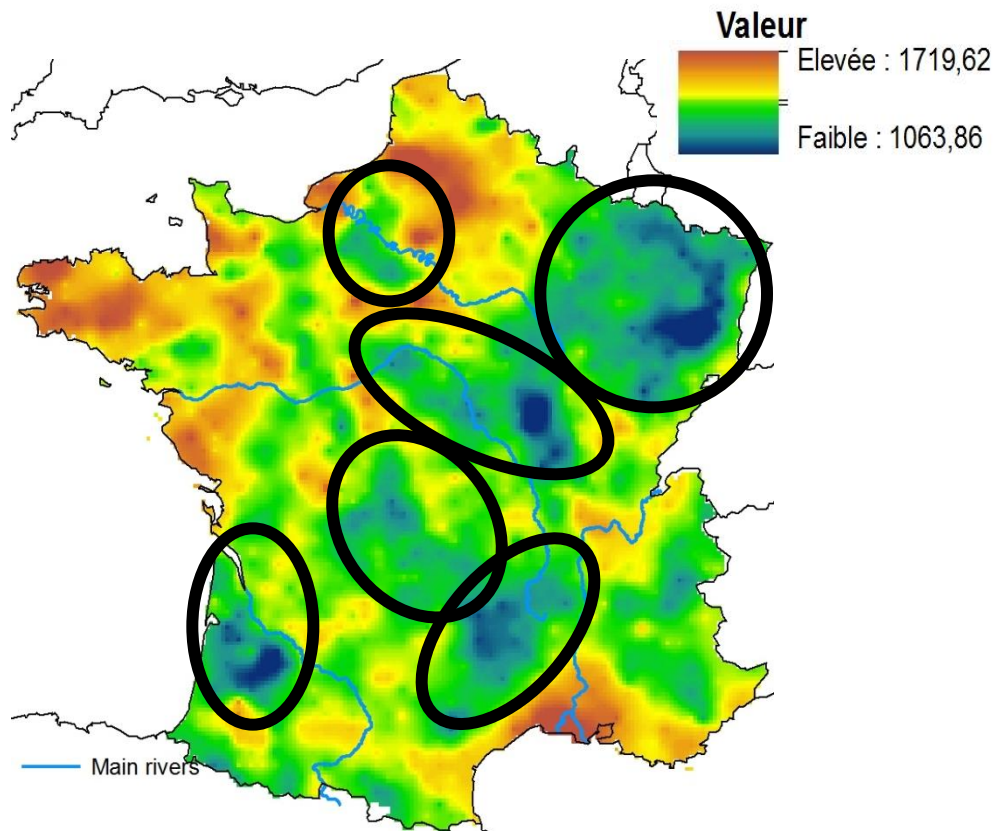


Prairie > Forêts > grande culture >> Vignes/vergers

Biomasse Moléculaire Microbienne

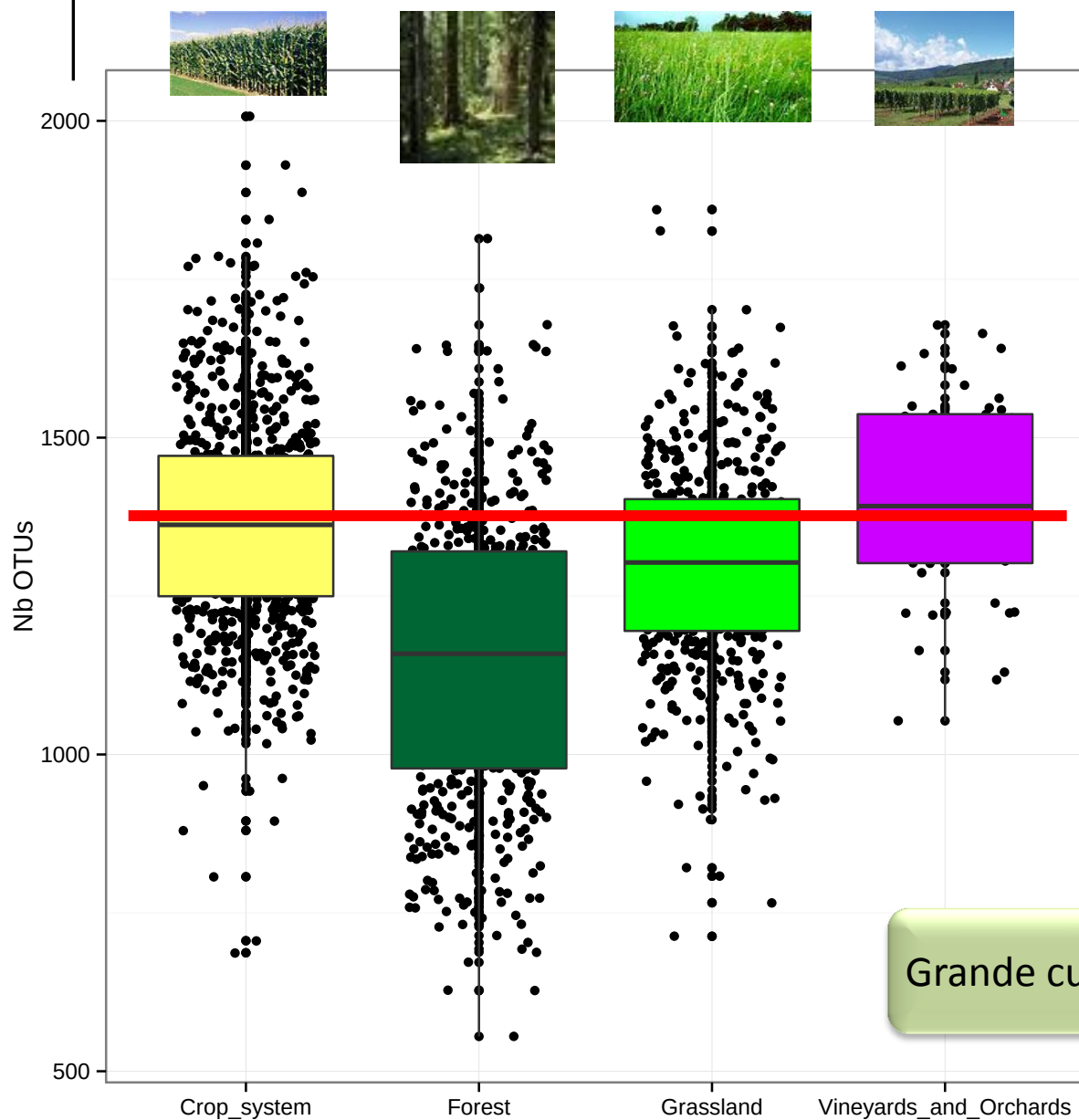


Diversité Bactérienne (Richesse)



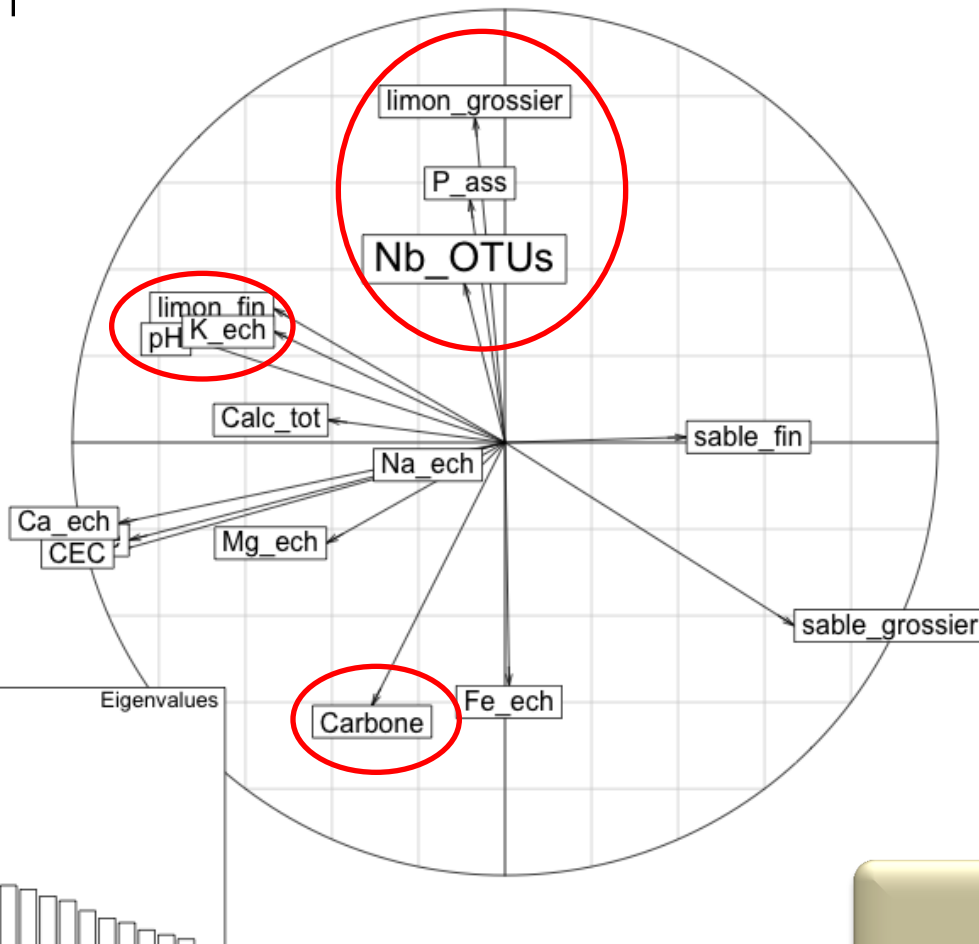
Structures spatiales à l'échelle du territoire nationale ➔ Richesse bactérienne plus influencée par le mode d'usage des sols

Relation entre richesse bactérienne et mode d'usage



Grande culture = Vignes > Prairie > Forêts

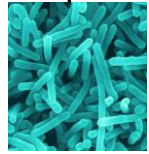
Corrélation entre caractéristiques des sols et richesse bactérienne



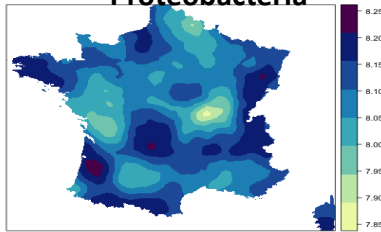
Texture , C et P sont les paramètres les plus structurants

Moins d'influence du pH

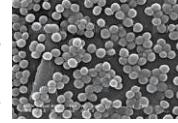
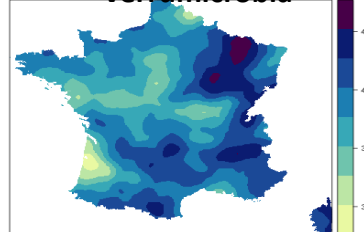
Cartographie des taxons



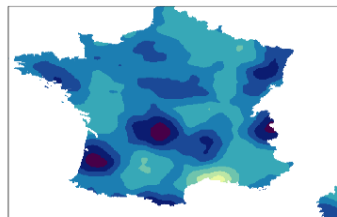
Proteobacteria



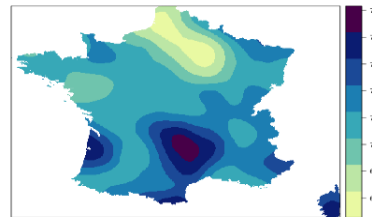
Verrumicrobia



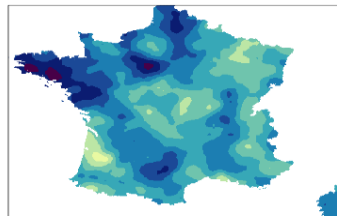
Acidobacteria



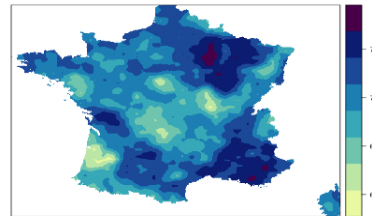
Actinobacteria



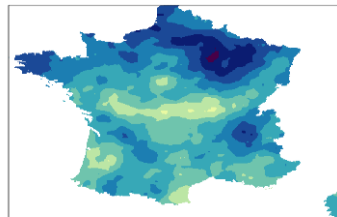
Armatimonadetes



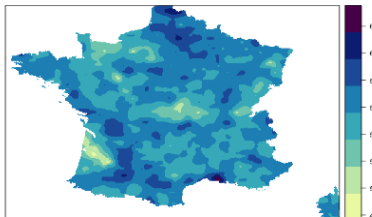
Bacteroidetes



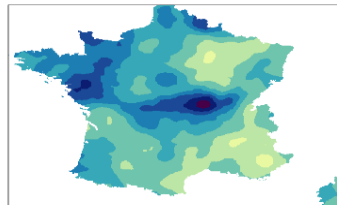
Chlorobi



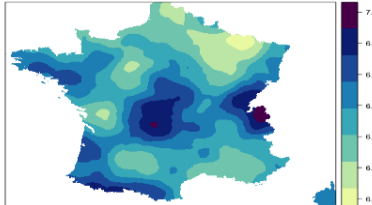
Chloroflexi



Firmicutes



Planctomyces

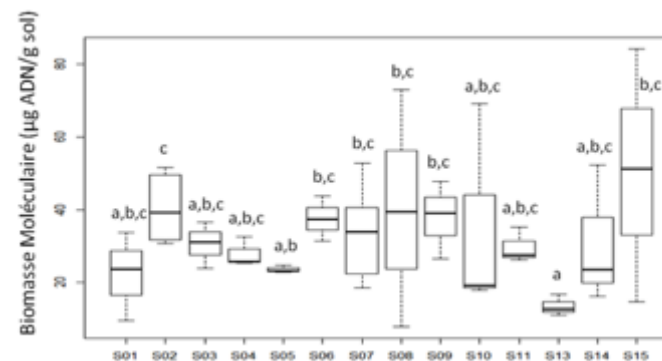
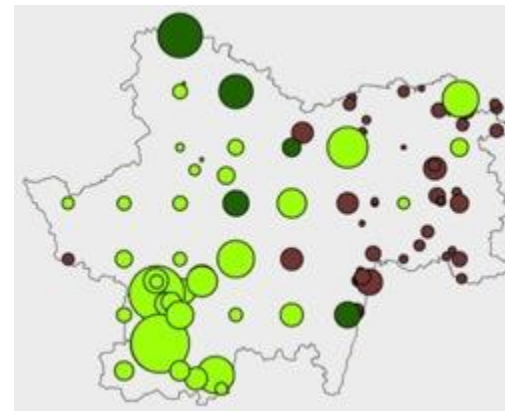
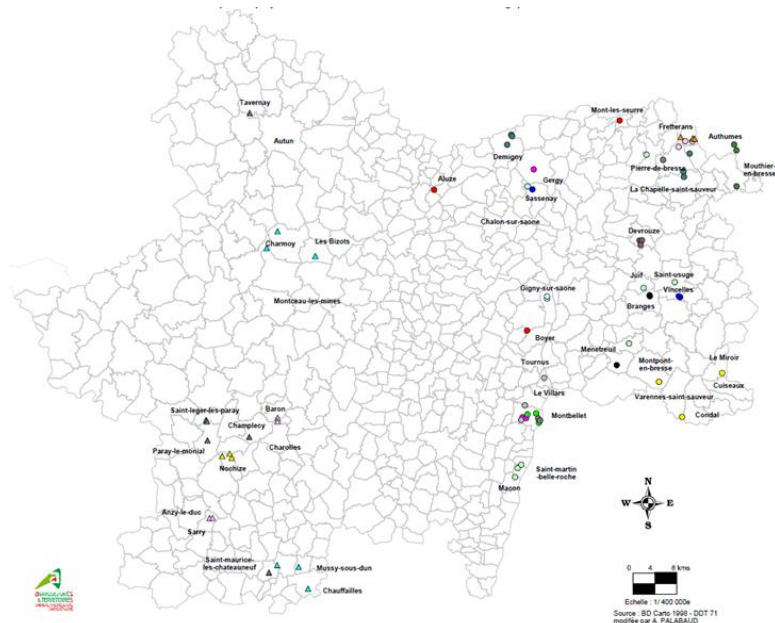


Chaque taxon à sa propre distribution :

- Sensibles à différents paramètres de l'environnement
- Capacités de dispersion variables

Des référentiels plus locaux

Initiative Saône et Loire

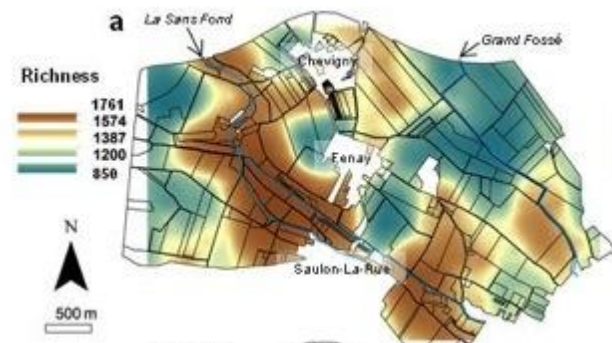
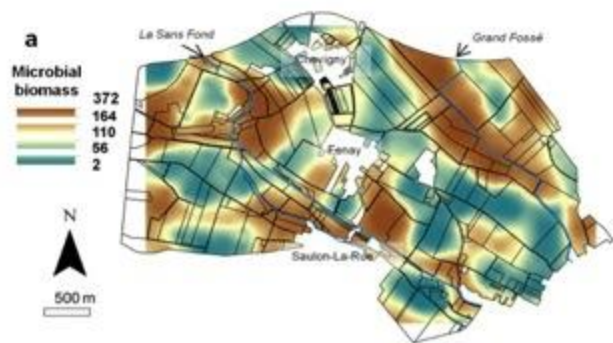


Référentiel sur la biologie des sols
en fonction du pédoclimat local et des
modes de production locaux

Encore plus près des exploitations agricoles...

Paysage agricole Féney

Paysage (12km², 80% surface en gde culture)
270 sols échantillonnés selon une grille 250mx250m



≠

Physico-chimie du sol > mode d'usage agricole

Physico-chimie du sol = mode d'usage agricole

Sols Forêts > Sols gde culture

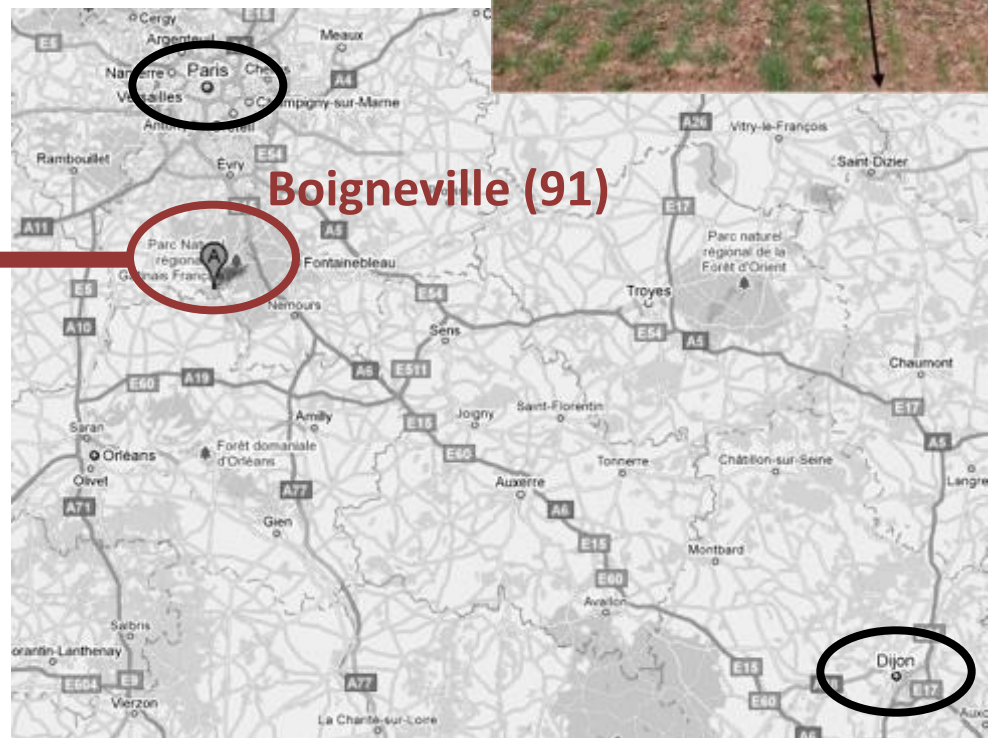
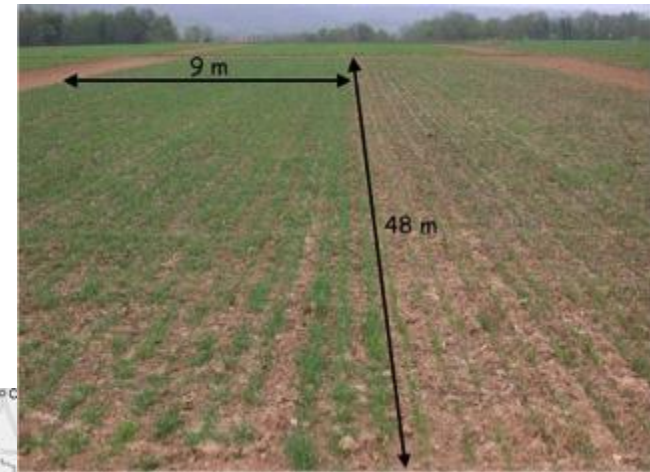
Sols gde culture > Sols forêts
(impact positif du labour)



Essai environnement – Ferme Boigneville

- Essai longue durée de 20 ans
- Parcelles de 48 m x 9 m

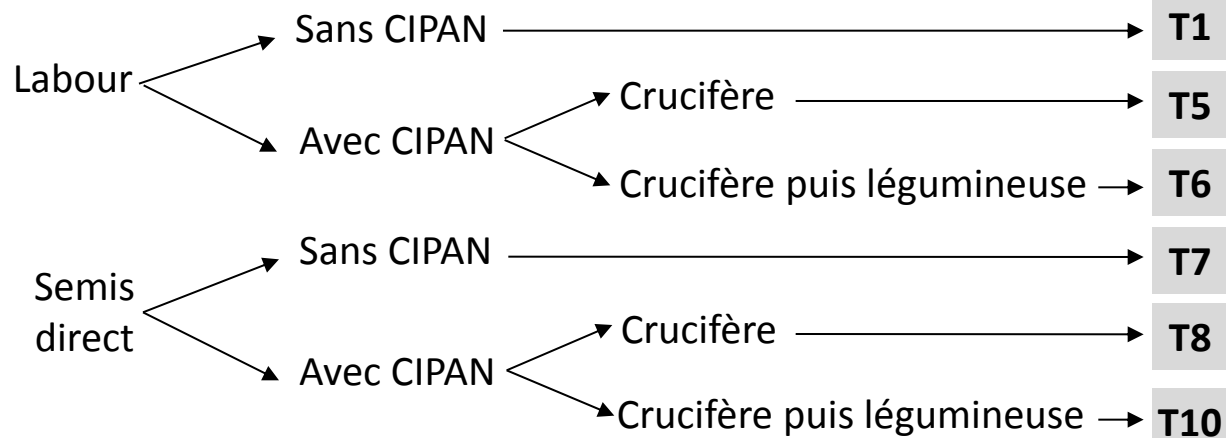
ARVALIS
Institut du végétal



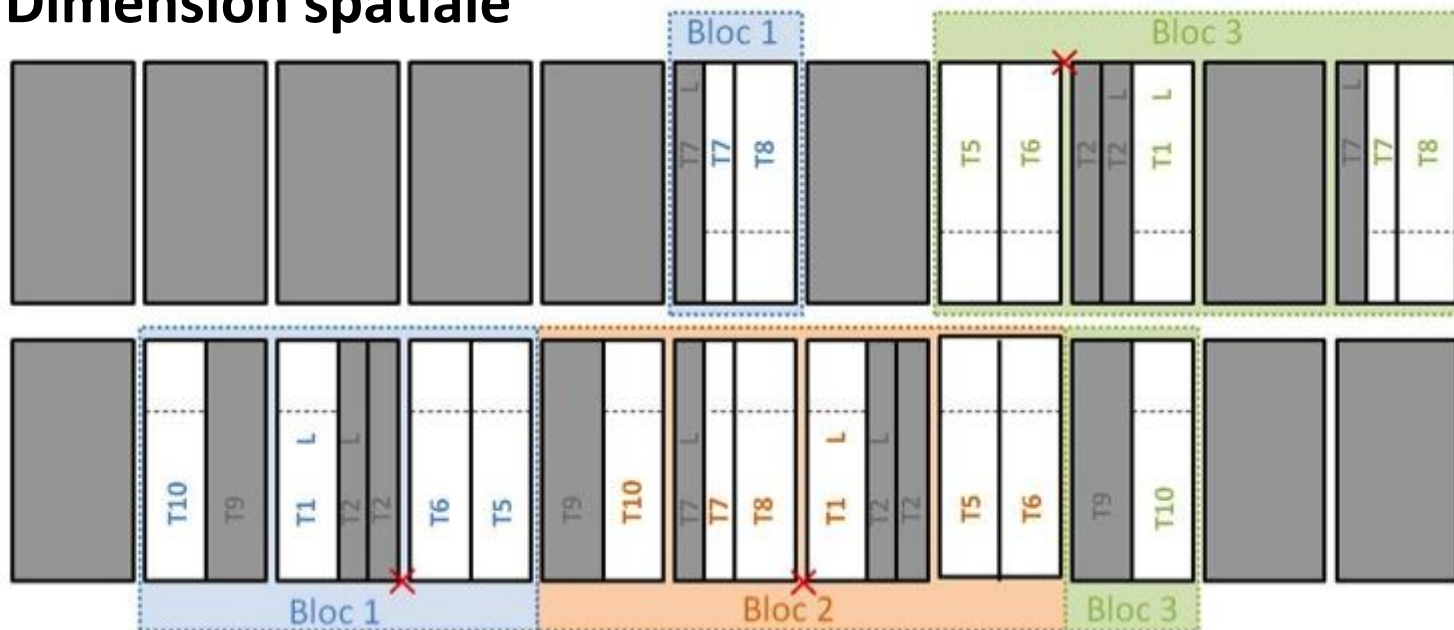


Essai environnement

- Essai longue durée de 20 ans
- Parcelles de 48 m x 9 m
- 6 traitements choisis
- 3 blocs par traitement



Dimension spatiale

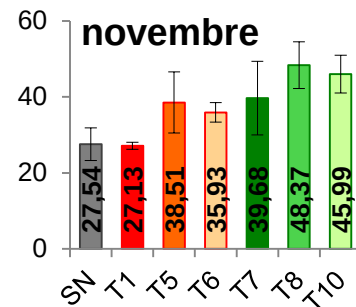
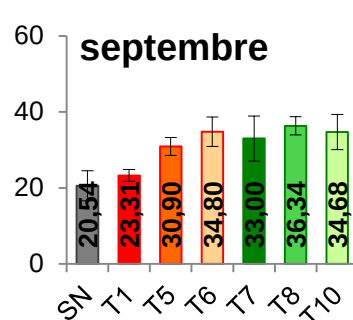
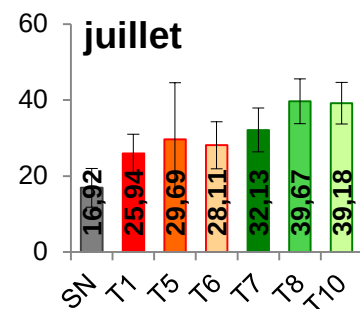
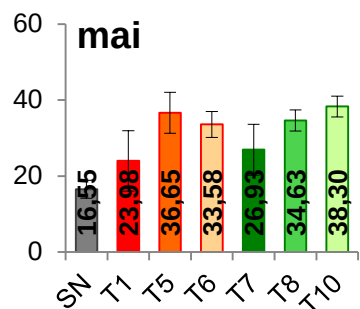
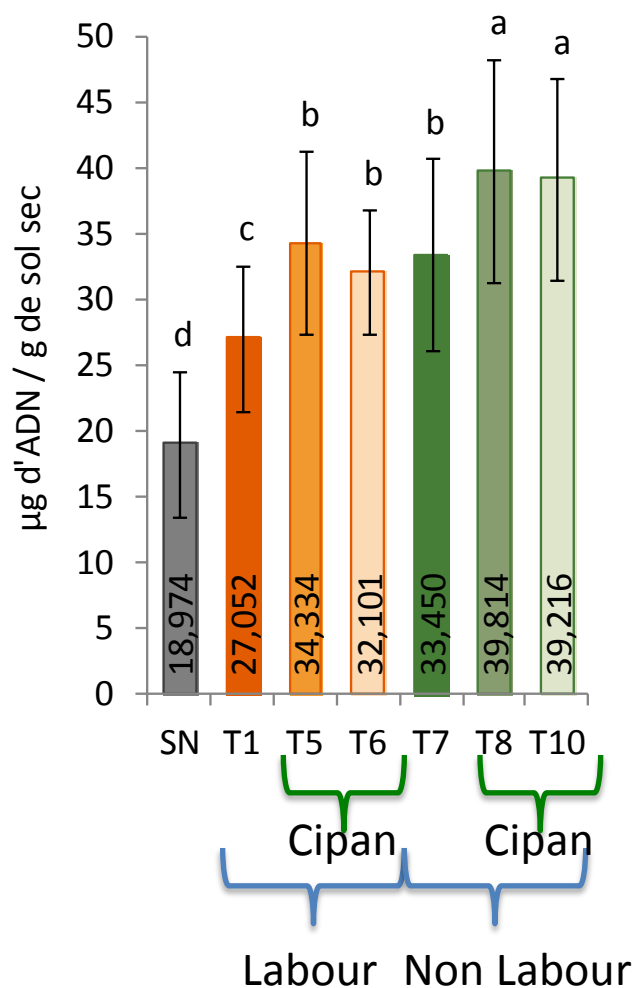


 Hors dispositif de suivi

 Sol nu



Impact du travail du sol sur la biomasse microbienne du sol



Indicateur stable dans le temps
Effet CIPAN toute l'année

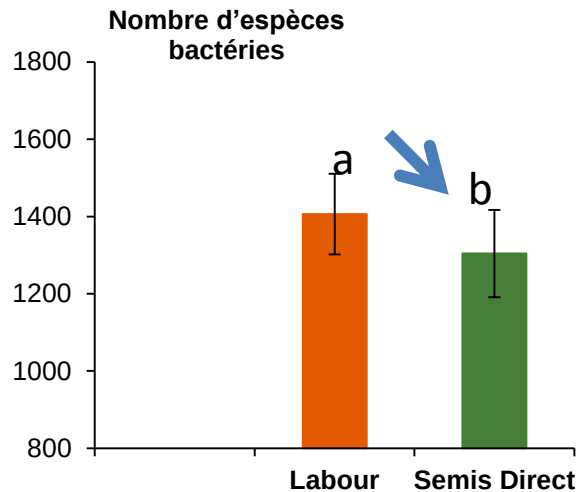
Impact du labour, effet positif des CIPAN

Impact du travail du sol

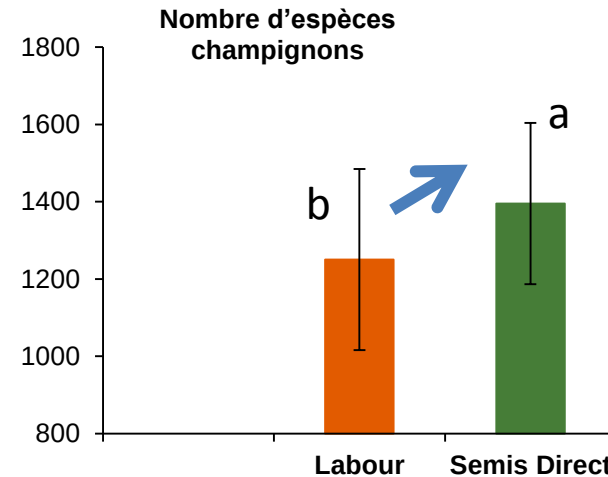


Analyse de la diversité taxonomique des communautés microbiennes de l'essai environnement

Communautés bactériennes



Communautés champignons

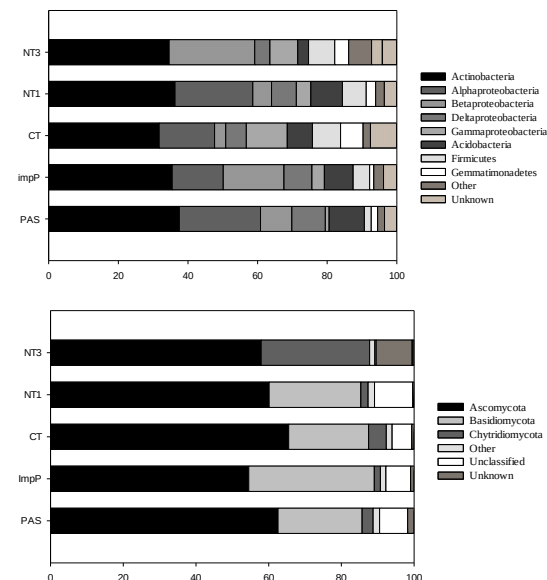
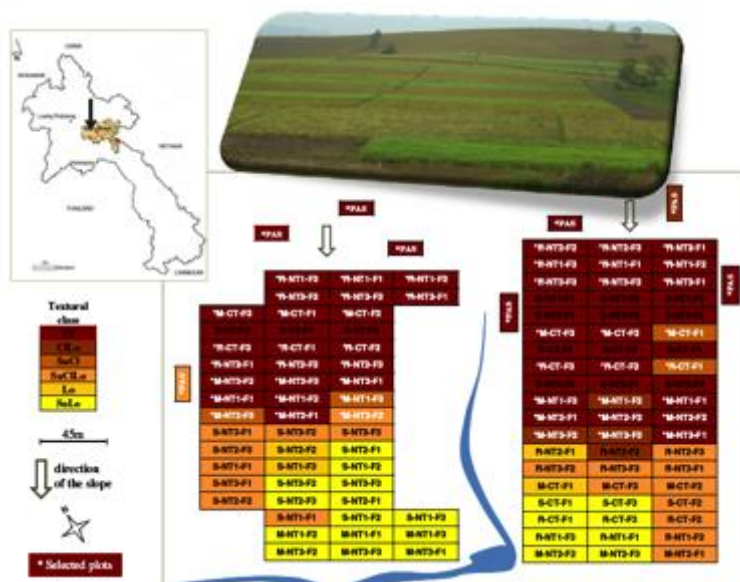


➡ **Labour augmente la diversité bactérienne et baisse la diversité de champignons**

Applications : Effet du travail du sol sur les communautés microbiennes



Sols : Etude du travail du sol sur les communautés microbiennes de sols agricoles (Pao, LAOS).



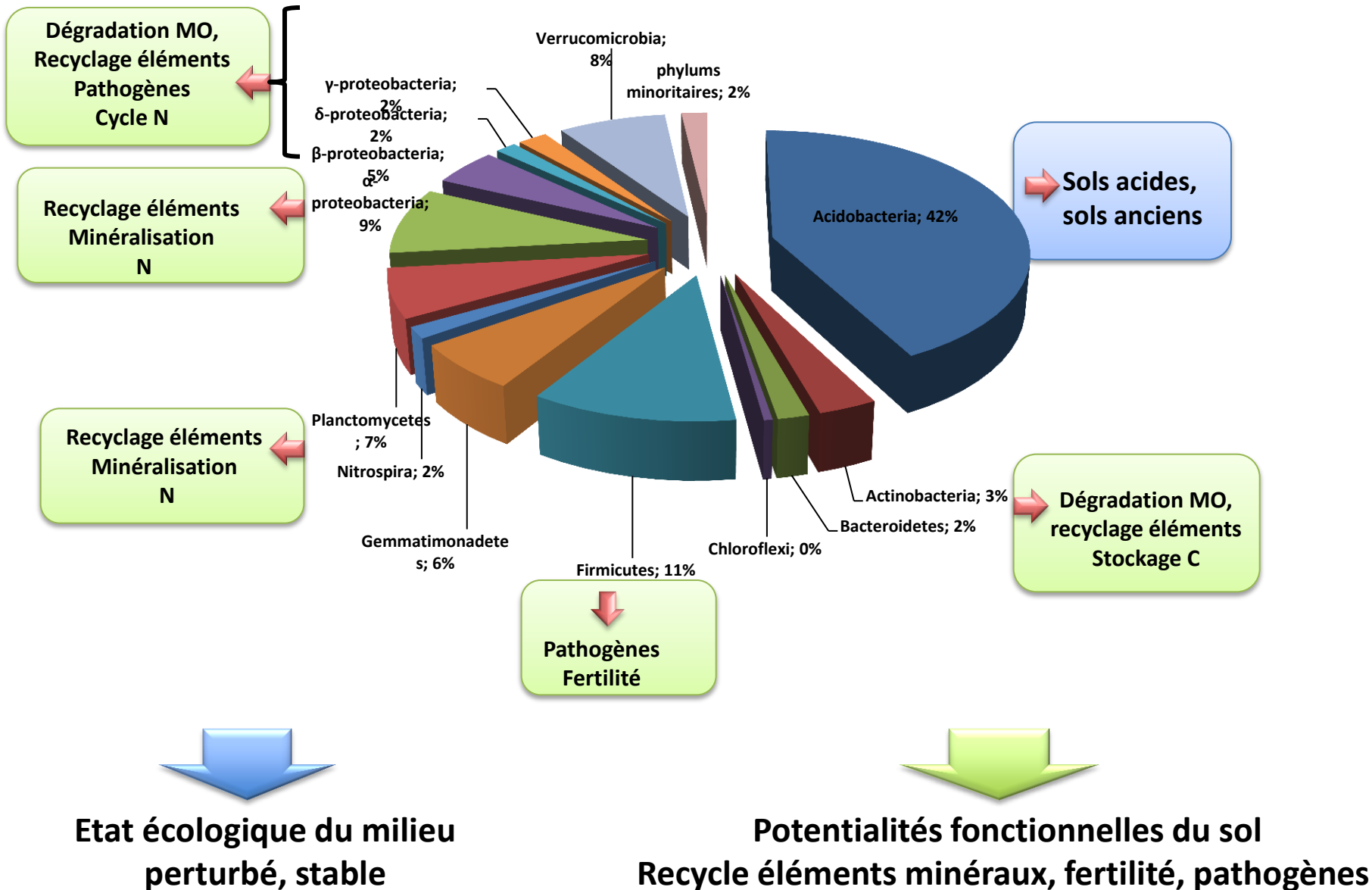
Travail Sol

Land use	Clay (%)	pH H ₂ O (1:5)	SOC (g kg ⁻¹)	N tot (g kg ⁻¹)	C:N	Σ base (cmol kg ⁻¹)	Biomass* (mg of DNA g ⁻¹ of SOC)	Diversity					
								Bacterial			Fungal		
								MOTU	H'	J	MOTU	H'	J
PAS	57	4.9	38.6	2.6	14.8	2.1	1.40 ± 0.11 [a]	361	3.9	0.67	392	4.8	0.80
ImpP	59	5.1	36.8	2.5	14.8	4.2	1.15 ± 0.02 [b]	431	4.0	0.67	335	4.3	0.73
NT1	60	5.3	39.3	2.7	14.4	4.6	0.58 ± 0.06 [c]	507	4.3	0.7	467	4.9	0.80
NT3	63	5.2	45.1	3.1	14.5	4.3	0.70 ± 0.01 [c]	477	4.4	0.72	341	4.5	0.78
CT	55	5.0	28.9	1.9	15.0	2.5	0.35 ± 0.11 [d]	528	4.4	0.7	236	3.9	0.72

Labour favorise la **diversité bactérienne**, mais **diminue la diversité fongique**.



Analyse de la qualité de la biodiversité : lien avec les fonctions et services





Impact du travail du sol sur la qualité de biodiversité

Labour



Augmente la diversité bactérienne



Populations indicatrices d'envts perturbés



**Stimule les populations opportunistes,
pathogènes**



**Baisse la diversité des champignons
Stimule les champignons opportunistes,
pathogènes**



Semis direct



Baisse la diversité bactérienne 😞
Populations indicatrices d'envt stable 😊
**Stimule les populations impliquées
dans la fertilité**
**Augmente (préserve) la diversité des
champignons** 😊
**Stimule les champignons impliqués
dans la dégradation de la matière
organique** 😊

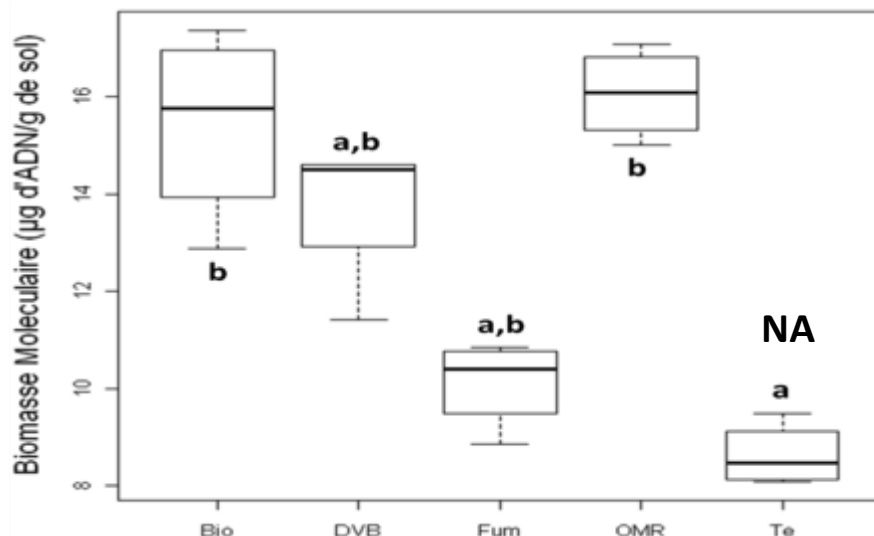


SERVICES

Applications : Impact d'amendements organiques

Sites Feucherolles (78)

Quali Agro



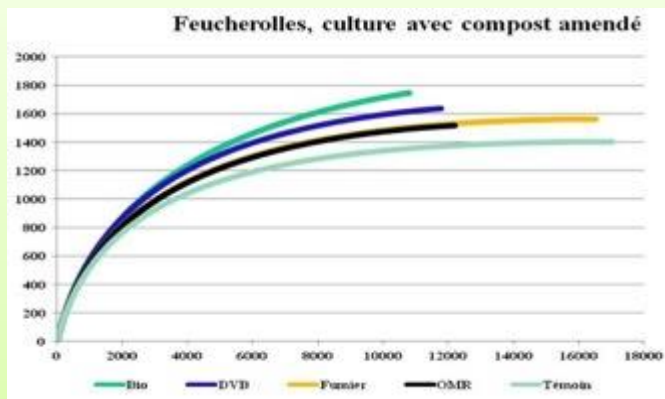
Biomasse Microbienne

Les amendements organiques stimulent la biomasse microbienne

Tous les types d'amendements n'ont pas la même efficacité



Inventaire diversité Microbienne



Amendements organiques vs engrais chimiques : +15% à 30% d'espèces en plus





Des outils standardisés

Des référentiels

Une bonne connaissance de leur réactivité et écologie

Une routinisation opérationnelle (débit et coût)



Bilan de la biodiversité des sols Français

Évaluer les modes d'usages agricoles

**Intégrer des modèles d'outils d'aide à la décision
(ONB)**

Biomasse / Biodiversité microbienne : variation et déterminisme

Biomasse moléculaire microbienne



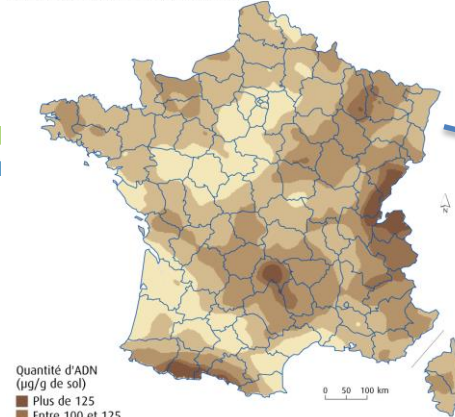
Diversité bactérienne des sols



RMQS

GisSol

Biomasse microbienne des sols



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

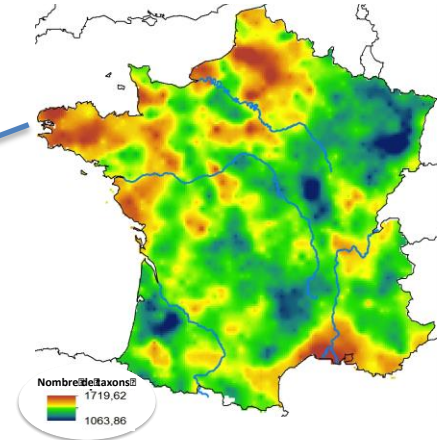


Modèle prédictif :

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

Valeur de référence écologique pour un type pédoclimatique

Diagnostic d'état biologique



« Indicateur national sol »

Dequiedt et al., 2011 Glob Ecol Biogeo



« Indicateur national sol »

Ranjard et al., 2013 Nature Comm; Horrigue et al., 2016 Ecol Indic.

Référentiel – Mise au point de modèles prédictifs sur la biomasse et la biodiversité des sols



Biomasse moléculaire

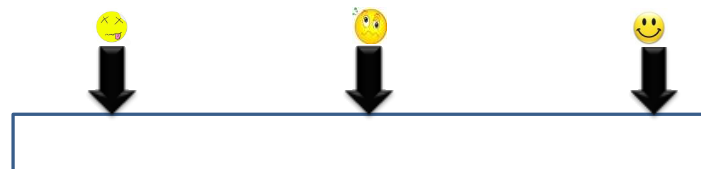
mesurée

Biomasse moléculaire

Modèle polynomial non linéaire

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

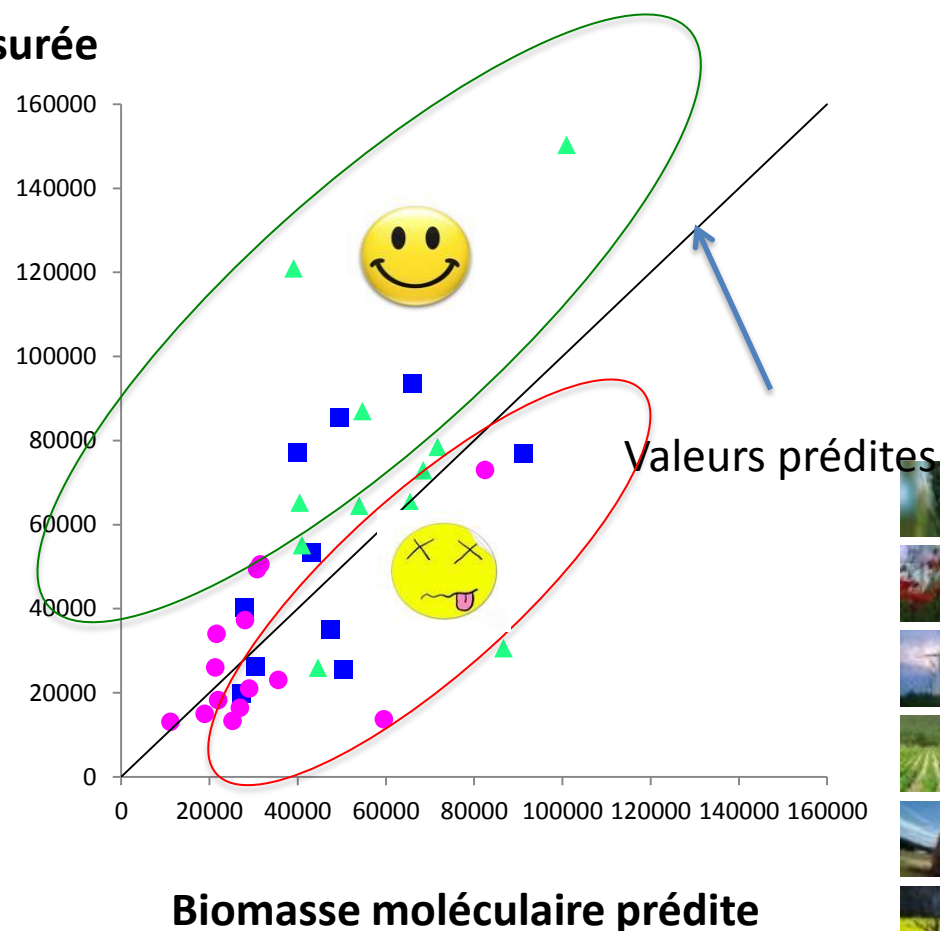
Biodiversité
(même type de modèle)



Niveau Bas

Niveau Moyen

Niveau Haut



Programme CASDAR AgrInnov

L Ranjard
INRA UMR Agroécologie, centre INRA Dijon

E Vérame
Observatoire Français des sols vivants, Domaine de
Danne

Contexte agricole

Produire autant voire plus, mais mieux !



**Contexte d'augmentation de la
population mondiale / baisse de la
surface de terres arables (par habitant)
!**



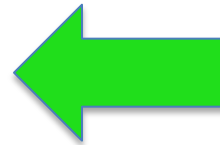
**Outils de pilotage des
productions**



**« Mieux » en termes de qualité des
productions !**



**Qualité Alimentaire !
Qualité Environnementale !
Qualité Economique !**



Initier un pilotage des systèmes de productions basé sur les analyses biologiques des sols

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**



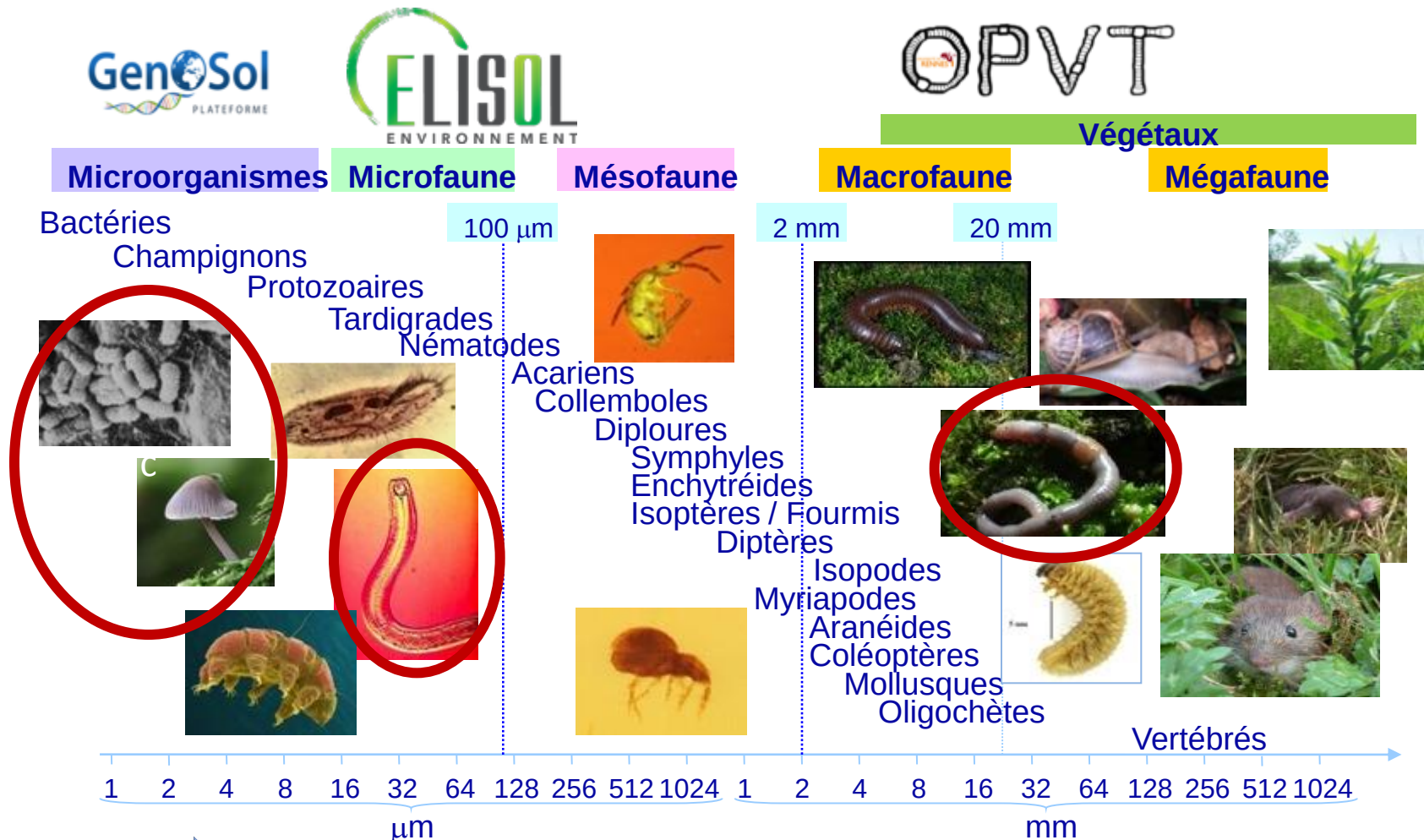
Qualité et la durabilité des productions
Qualité environnementale
Patrimoine

AgrInnov



Mettre en place 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

Indicateurs biologiques



➡ Organismes importants à différents niveaux de la chaîne trophique du sol

➡ Organismes impliqués dans des services écosystémiques

Organismes - fonctions biologiques – questionnements agronomiques

Chercheurs

Agriculteurs

Patrimoine biologique

Fonctions biologiques

Fonctions agronomiques

Questionnements
agricoles

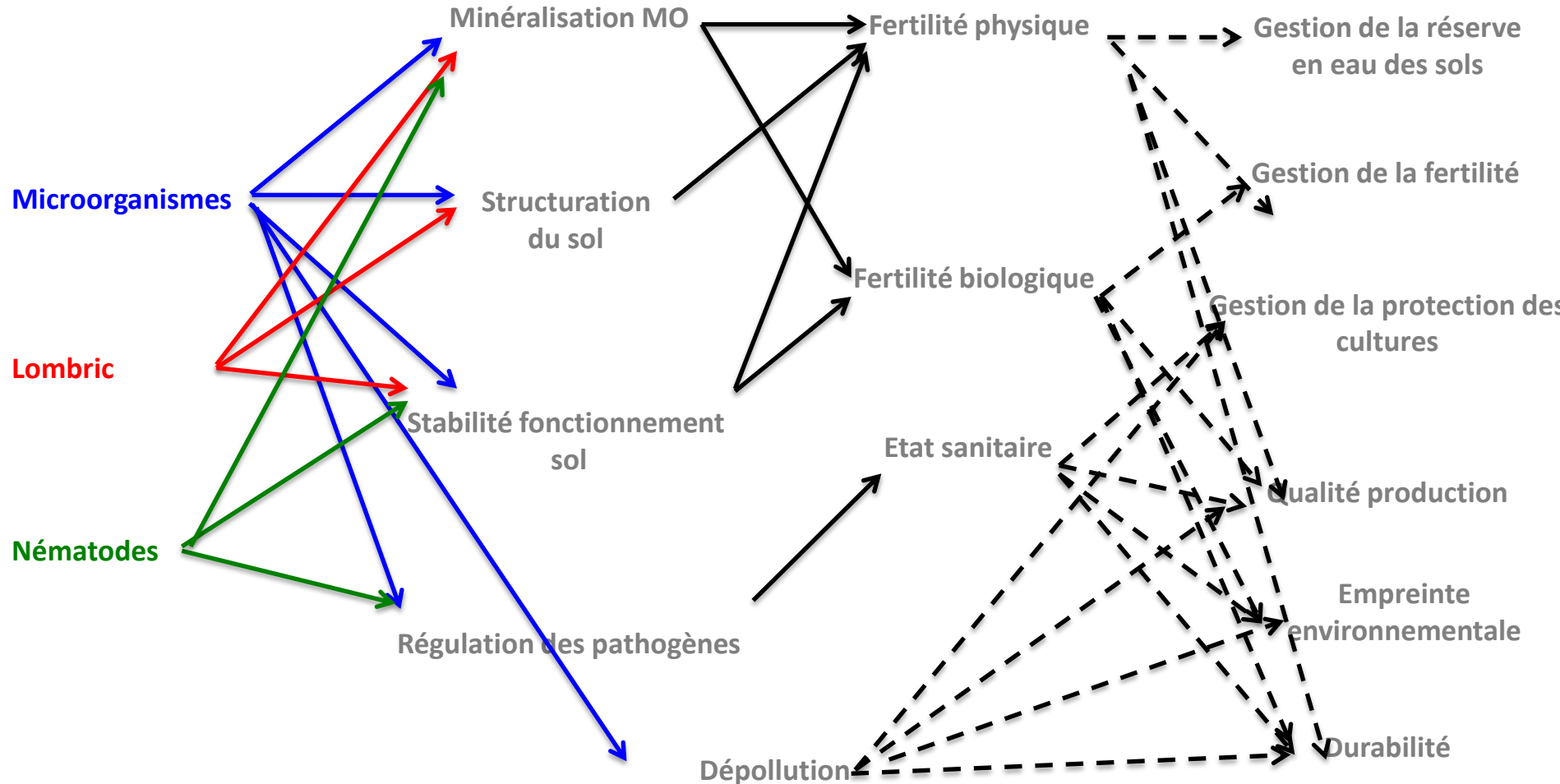


Tableau de Bord



Il est constitué d'indicateurs élémentaires qui servent à élaborer des indicateurs de synthèse.

Indicateurs élémentaires

Test bêche



Litterbags



Abondance/diversité
microbienne



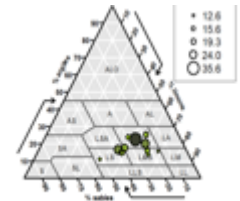
Abondance
diversité
nématodes



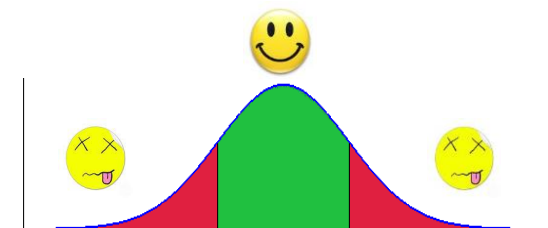
Abondance
diversité
lombrics



Physico-chimie



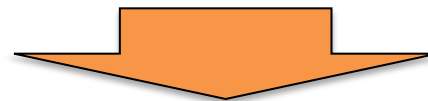
Interprétation :



Le plus, le mieux
(l'essence dans le moteur)

Le moins, le mieux
(particules dans les gaz d'échappement)

Optimum
(température du moteur)



Indicateurs de synthèse

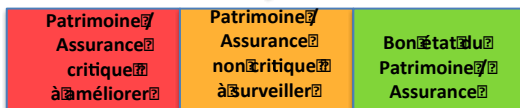
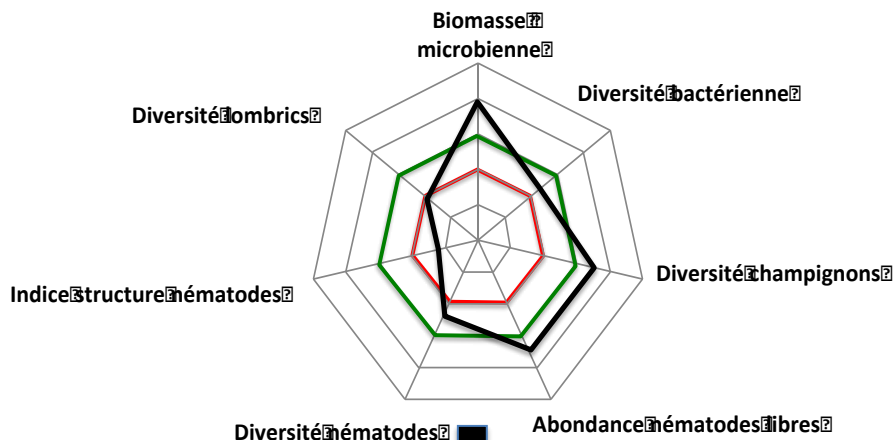
Tableau de bord

Indicateurs de synthèse

Patrimoine Biologique Assurance Ecologique

Abondance, diversité et équilibre biologique
des organismes vivants du sol

— Seuil d'alerte — Optimum — Parcelle analysée



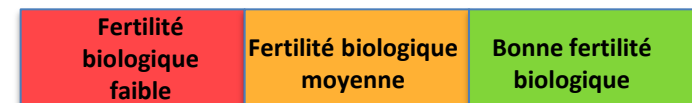
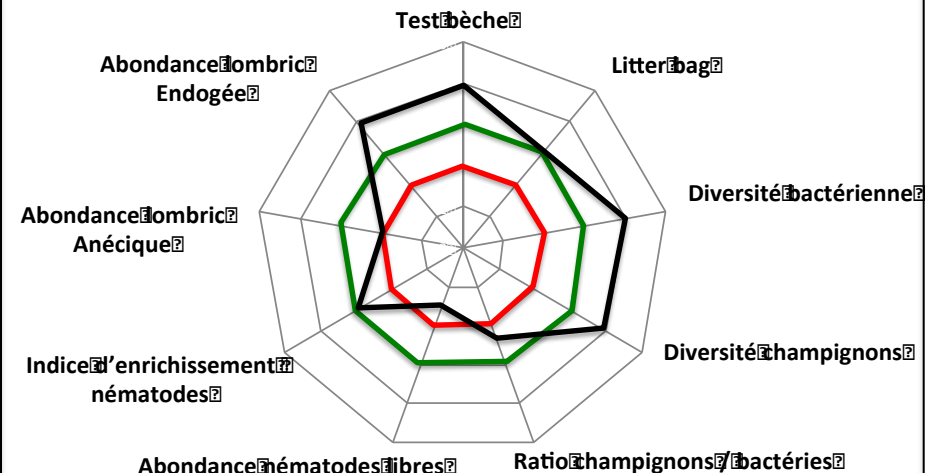
- Un mauvais indicateur de Patrimoine/Assurance écologique peut être du :
- mauvais état structural du sol et/ou
 - faibles ressources nutritives (quantité et qualité de matière organique) et/ou
 - pollution significative du sol (organique ou métallique)

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

Réseau d'Agriculteurs

125 Gde culture



+

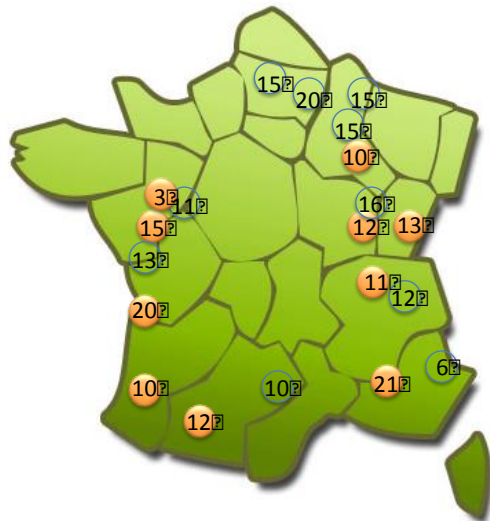
123 Viticulture



248 exploitants

24 extérieurs vitis + 20 GC

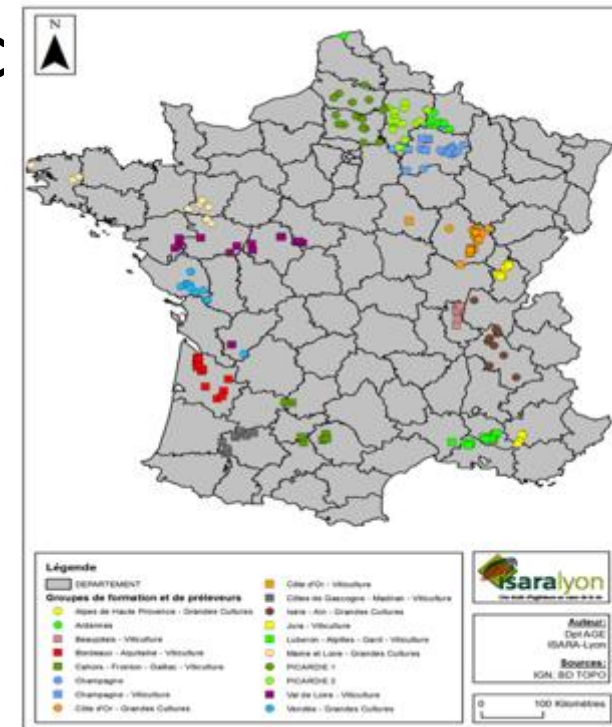
Réseau stagiaires sans extérieurs



Formation grande culture



Formation viticulture



Enquête sur les pratiques Agricoles

Grande culture



Travail du sol : Labour vs TCSL vs Semis direct



Diversité des couverts : nombre de familles rotation + couverture



Fertilisation : amendements organiques vs engrais minéraux



Protection phytosanitaire : nombre traitements et types de produits



Matin : *formation théorique* (en salle)

- Intérêt de la biologie du sol pour les productions agricoles
- Impact des pratiques,
- Nouveaux indicateurs, échantillonnage et interprétation



Après midi : *formation pratique* sur site (parcelle agricole) de la stratégie d'échantillonnage des indicateurs



2 - 4 semaines qui suivent : échantillonnage par les agriculteurs sur leur parcelle



2-3 mois qui suivent : analyses au laboratoire des indicateurs

6 mois après la formation : exposé des résultats aux agriculteurs



Guide d'échantillonnage AgrInnov[®]



GUIDE TECHNIQUE d'ECHANTILLONNAGE

AGRINNOV
Formation 2013

- SOLS VITICOLES -

révisé par un groupe de travail constitué de :

Line BOULONNE, Claudy JOLIVET (INRA [infosol](#) Orléans)

Nathalie CASSAGNE (ESA Angers)

Natacha DELAIVEAU (UMR [EcoBio](#), Rennes 1)

Jean-François VIAN (ISARA Lyon)

Remerciements à l'ensemble des partenaires d'AGRINNOV pour leur relecture



GUIDE TECHNIQUE d'ECHANTILLONNAGE

AGRINNOV
Formation 2013

- SOLS de GRANDE CULTURE -

révisé par un groupe de travail constitué de :

Line BOULONNE, Claudy JOLIVET (INRA [infosol](#) Orléans)

Nathalie CASSAGNE (ESA Angers)

Natacha DELAIVEAU (UMR [EcoBio](#), Rennes 1)

Jean-François VIAN (ISARA Lyon)

Remerciements à l'ensemble des partenaires d'AGRINNOV pour leur relecture



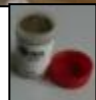
Sur le terrain comment cela se passe !

Indicateurs terrain
(nbre lombrics, test bêche)

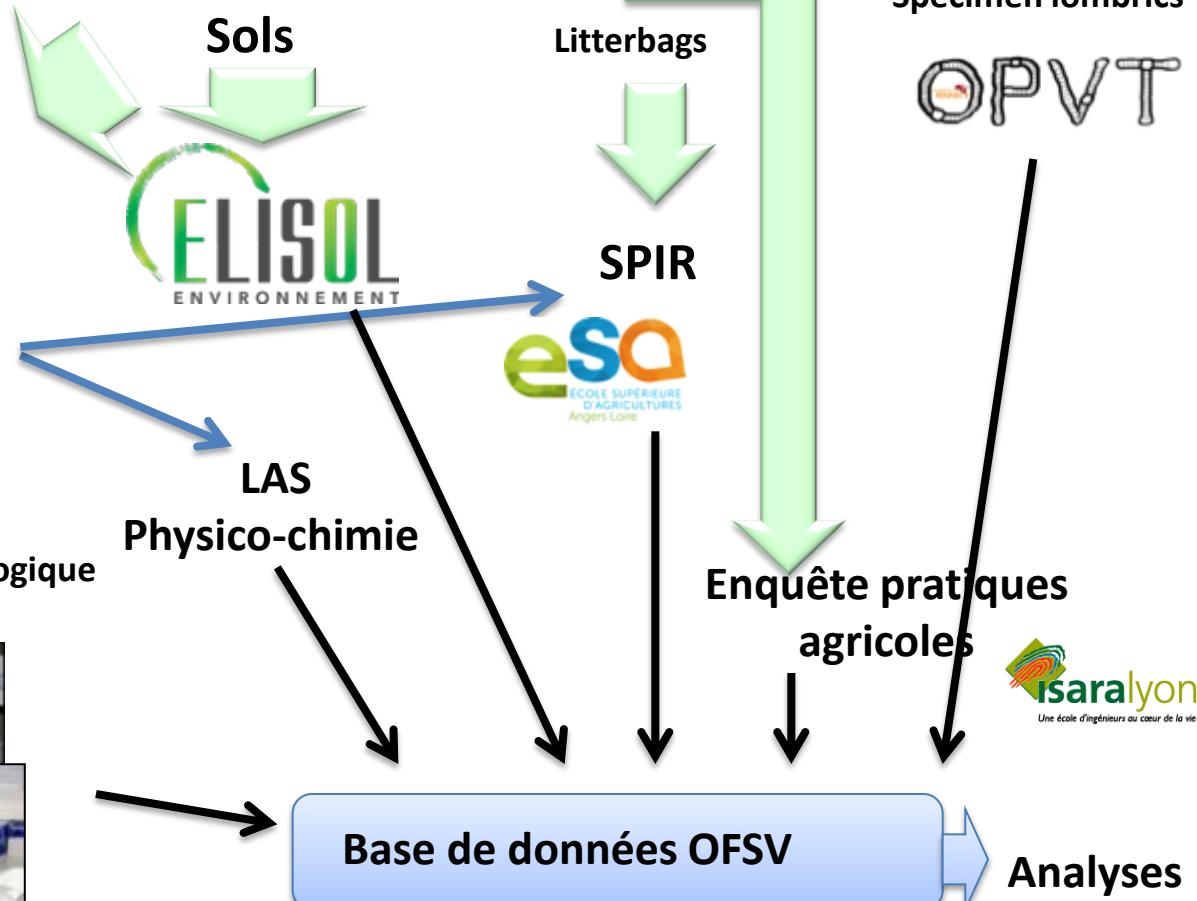
Indicateurs labo.
Échantillonnage



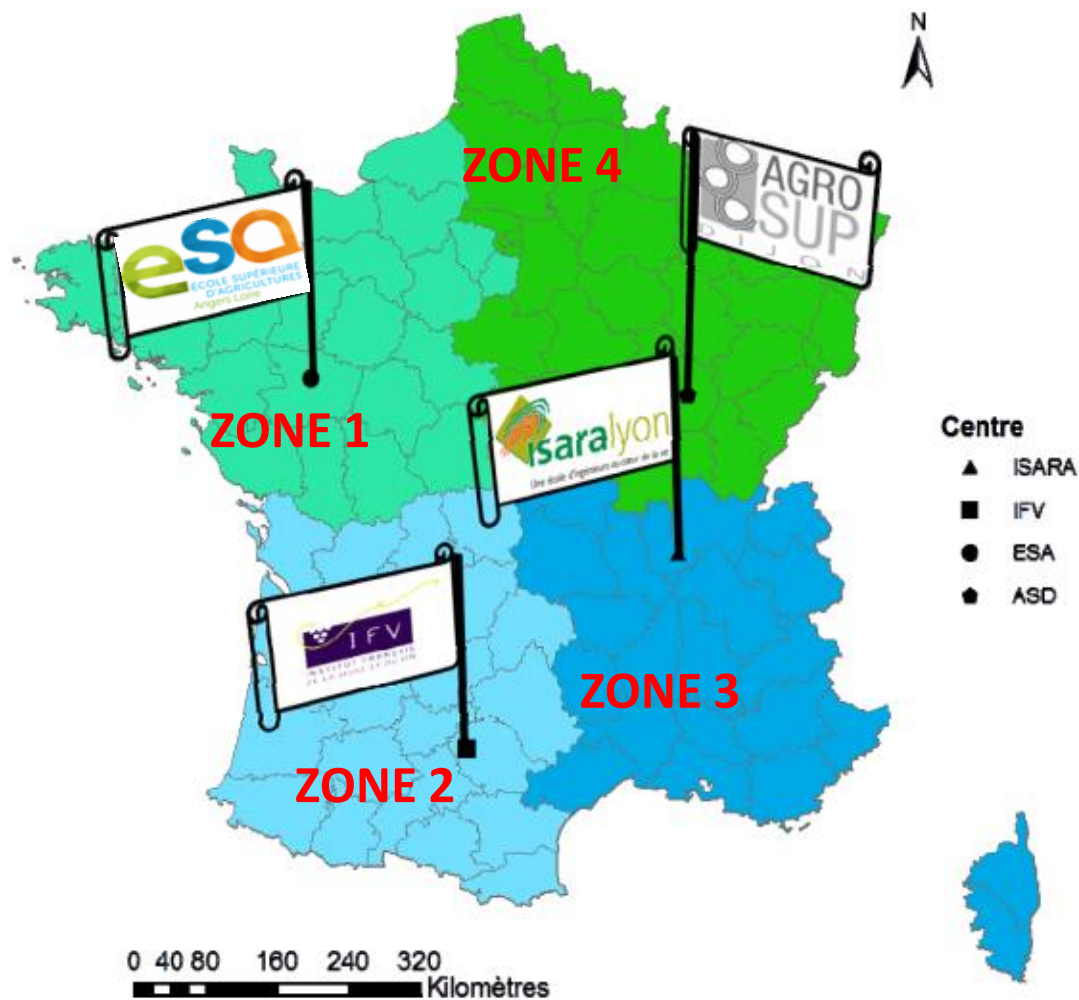
INFOSOL
Préparation sol
+ conservatoire



GenoSol
Caractérisation microbiologique
Conservatoire



Coordination du réseau AgrInnov[©]

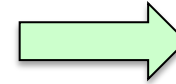


Répartition des centres de formation en France

Taux de retour - Echantillons

Sur 248 stagiaires

240 sols échantillonnés



97%



100 % pour les GC (123/123) et 94% pour les Vitis (117/125).

Physico-chimie des sols : **97 % de retour**



94 % vitis

100 % GC



Indicateurs microbiens : **97 % de retour**



94 % vitis

100 % GC



Indicateurs Nématodes : **97 %**



94 % vitis

100 % GC



Tau de Retour - Echantillons

Indicateurs test bêche : **92 %**

88% vitis
96% GC



Indicateurs Lombrics : **88 %**

90 % vitis
86 % GC



Indicateurs litterbags : **78 %**

70% vitis
85% GC



Nombre d'enquêtes agricoles : **80 %**

80 % vitis
80 % GC



Résultats

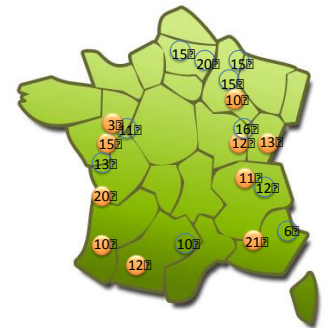
- PAR GROUPE



- INDIVIDUELS



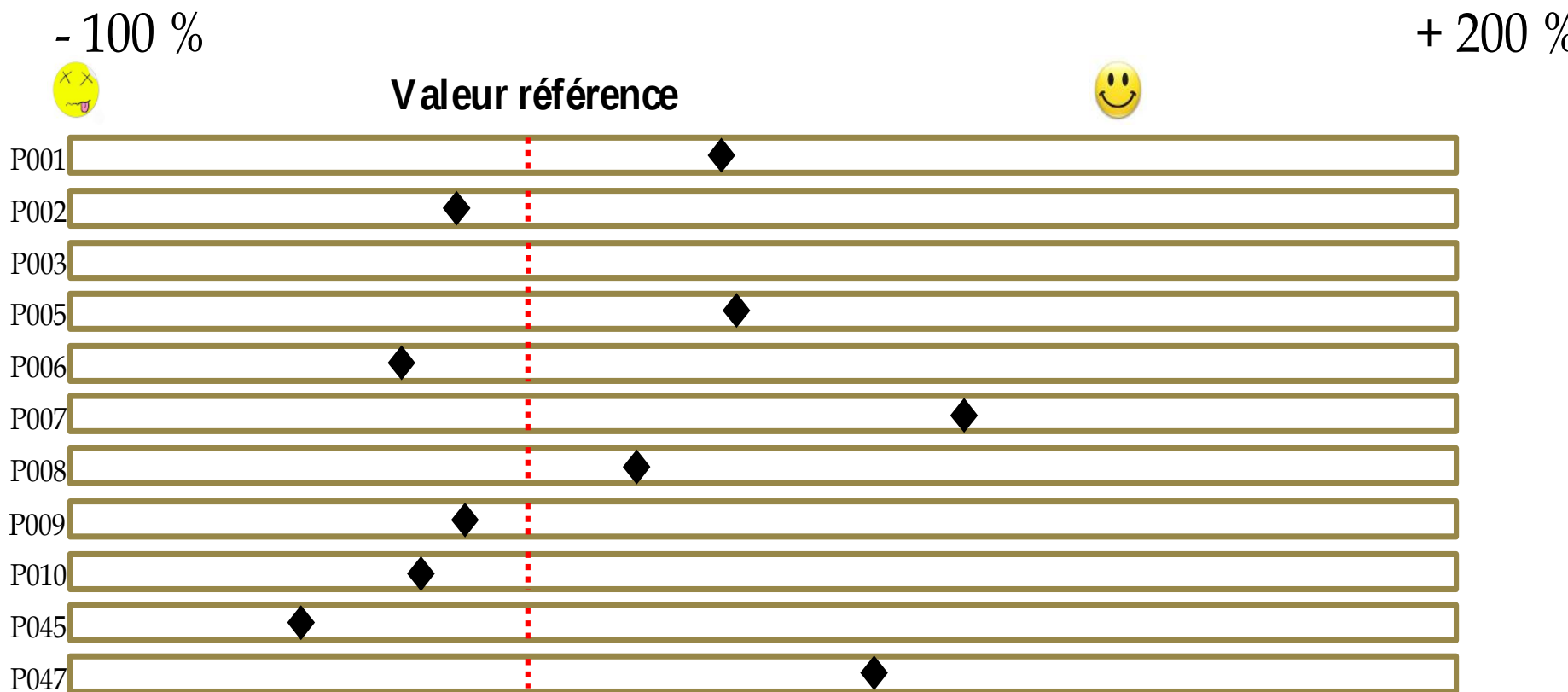
- ANALYSE NATIONALE DU RÉSEAU



Rendu de résultats



Collectif: chaque agriculteur peut se positionner par rapport à son groupe



Individuel: physico-chimie, bêche, litterbags, µbio, nématodes, lombriciens

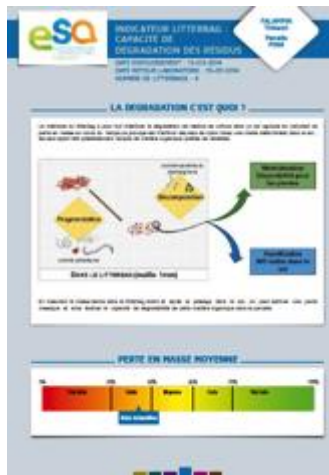
Résultats individuels

Elaboration de fiches individuelles de résultats

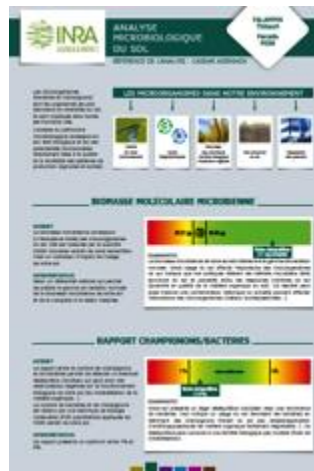
Test bêche



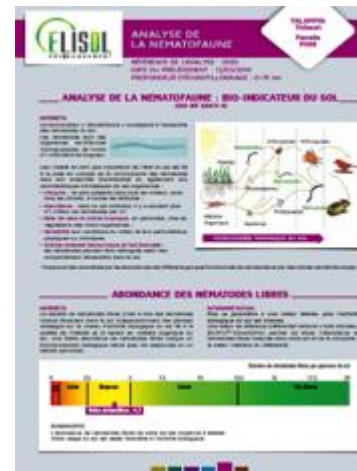
Litterbag



Microorganismes



Nématodes



Vers de terre

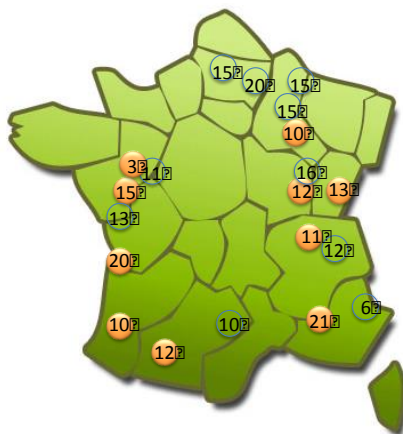


Indicateurs de synthèse

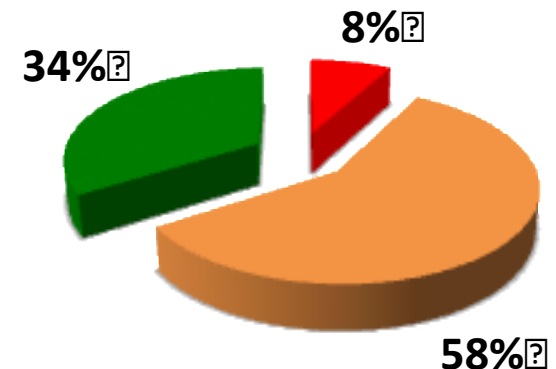
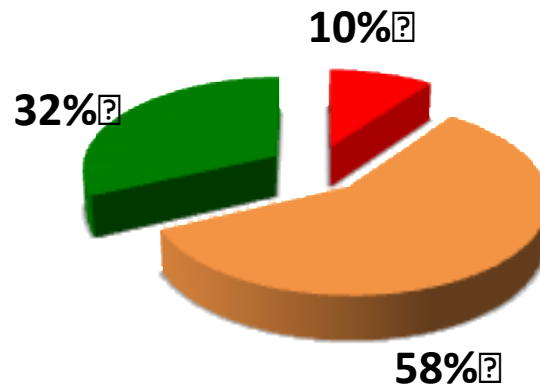
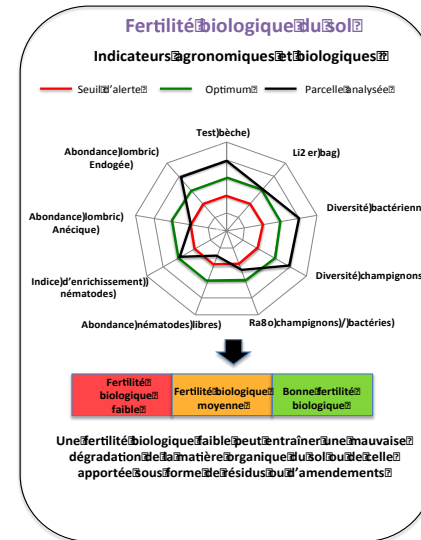
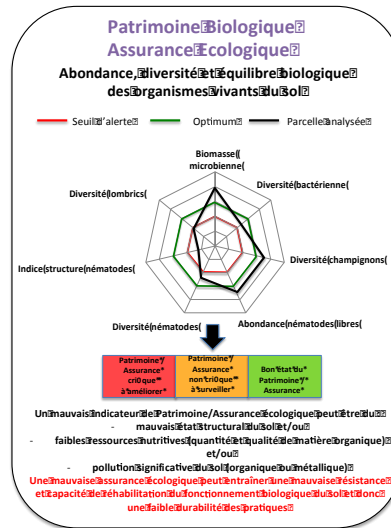


Diagnostic individuel et dialogue avec expert

Analyse des résultats du réseau à l'échelle nationale



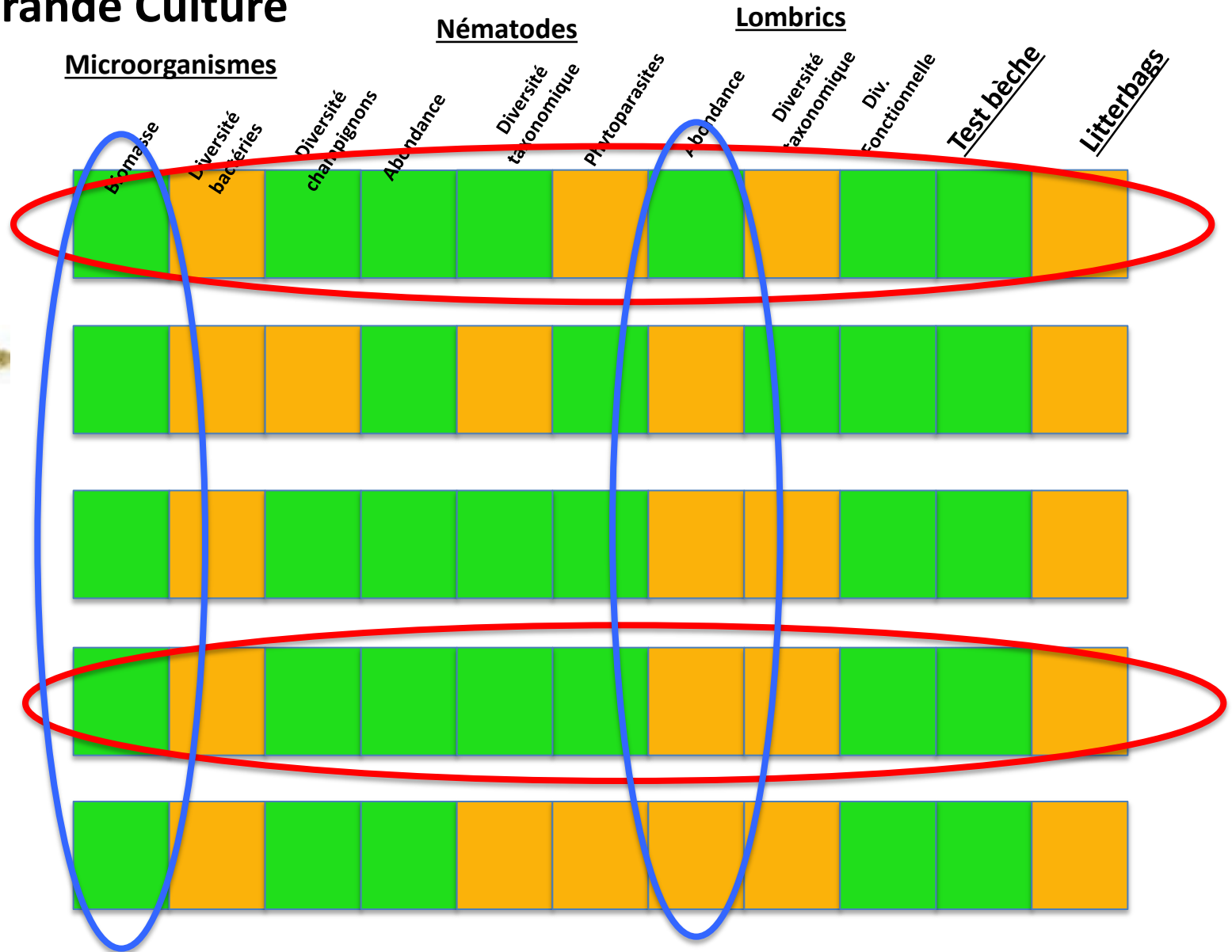
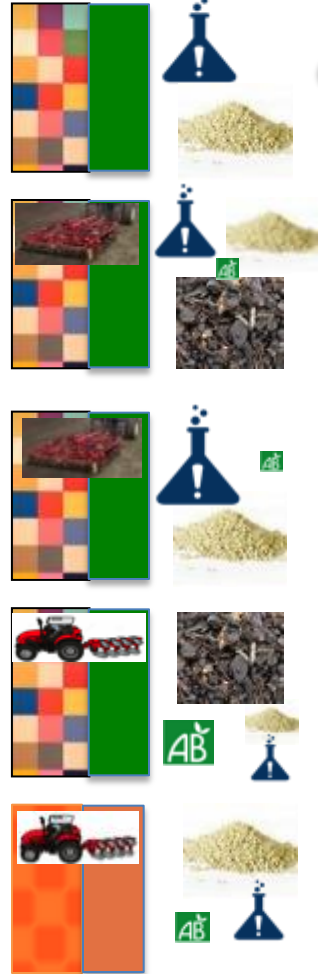
Bilan national des indicateurs de synthèse



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

Evaluation des systèmes de production

Grande Culture



Evaluation des systèmes de production

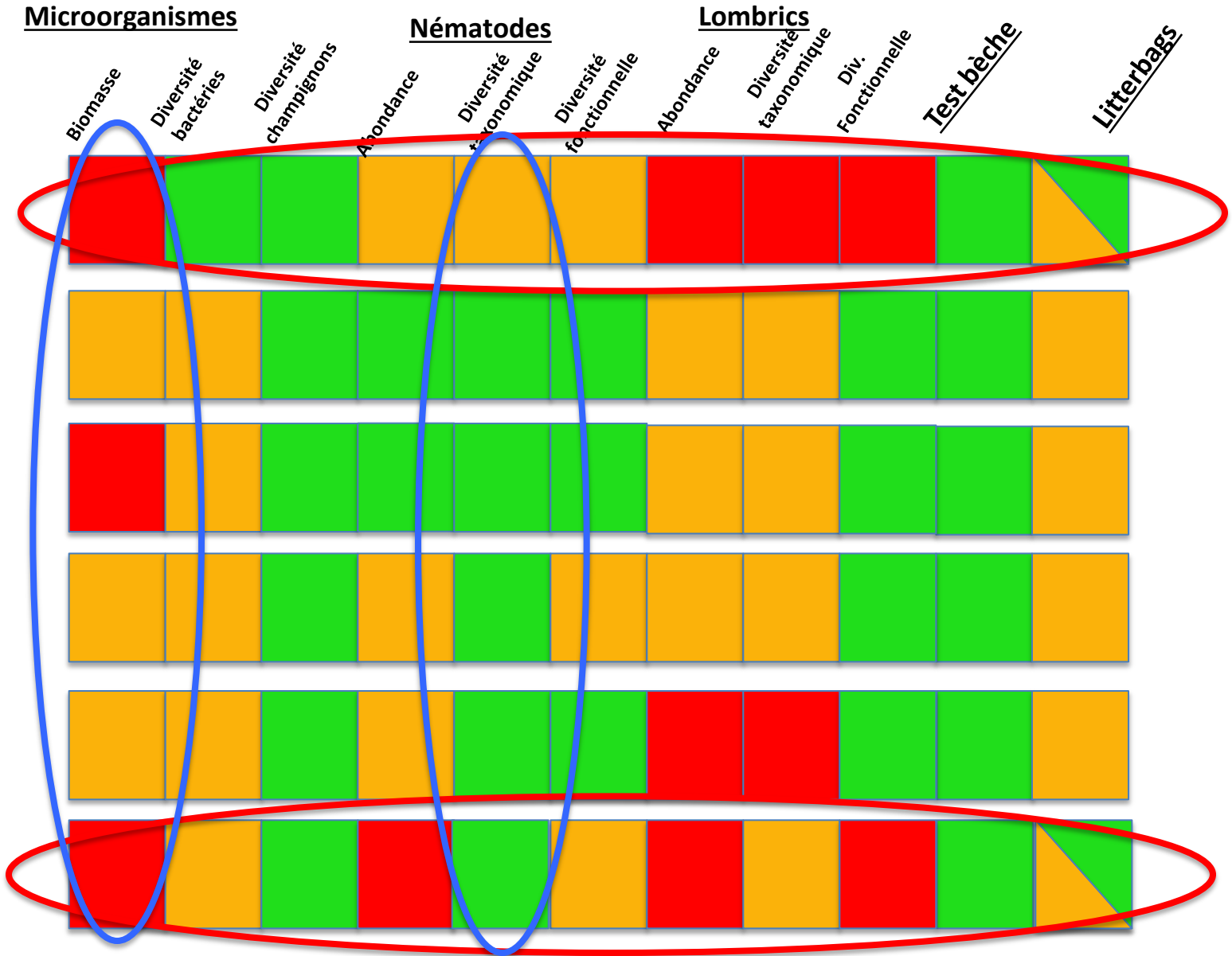
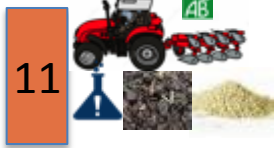
Vignes



Microorganismes

Nématodes

Lombrics



Evaluation des systèmes de production



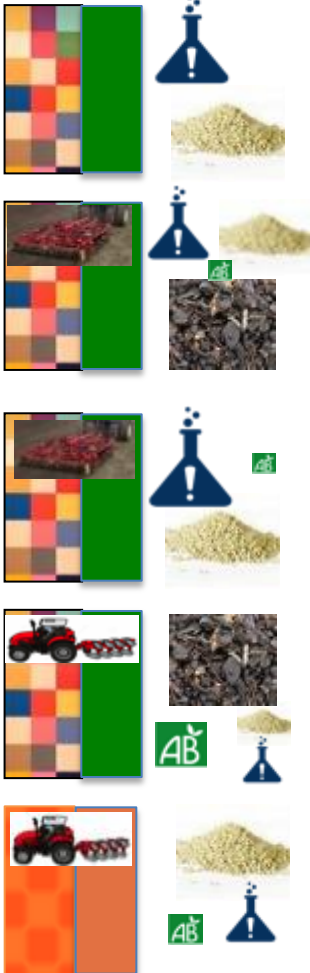
Microorganismes

Biomasse

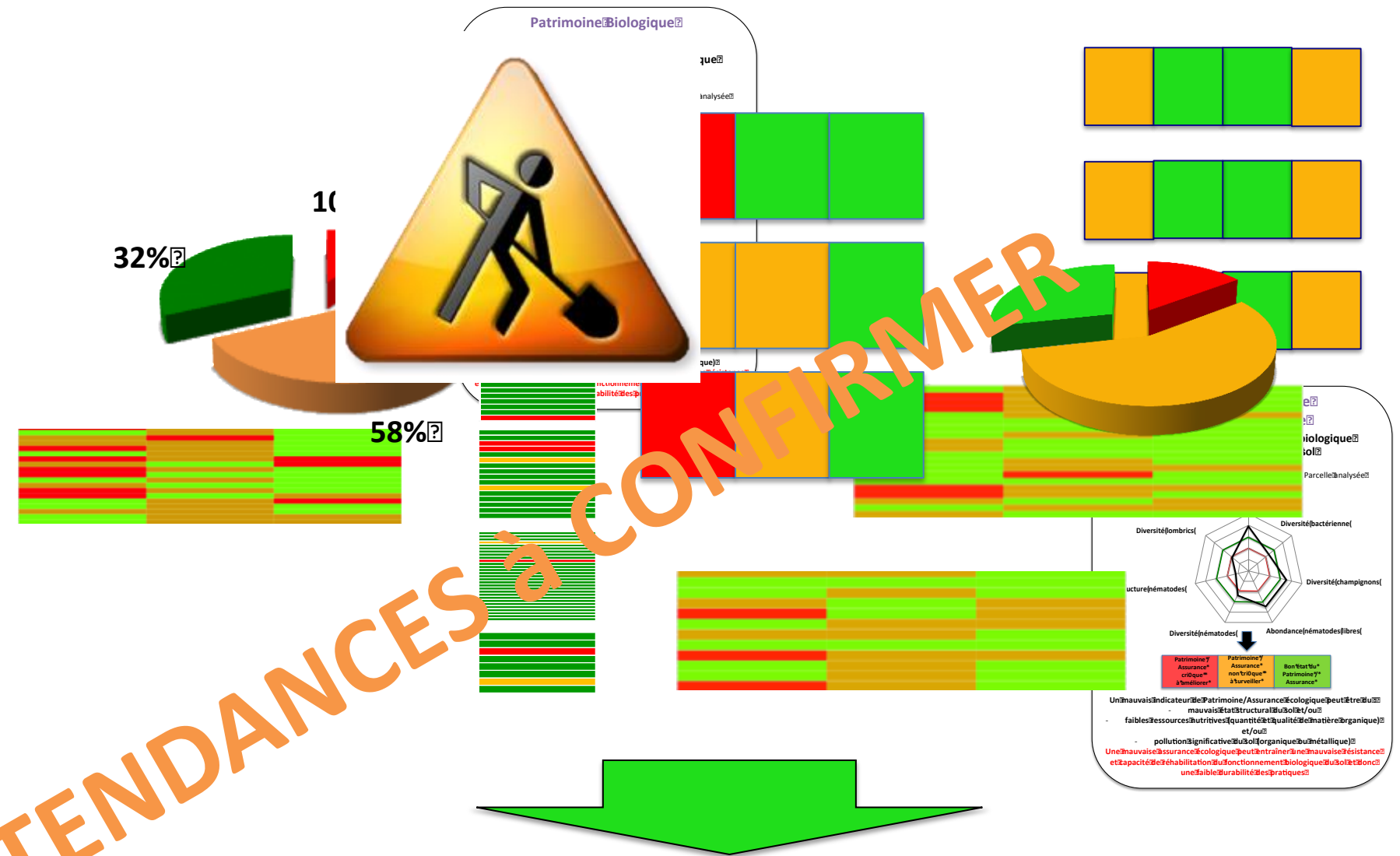
Diversité
bactéries

Diversité
champignons

Test bêche



Identifier les meilleurs
ITK dans chaque groupe
et région



Etoffer le réseau AgrInnov
+ de type de sol
+ d'ITK
+ de pratiques

REVA : Réseau de Veille à l'Innovation Agricole



Chef de file: **CA Maine et Loire**
Coordination Scientifique: **ESA**

Chef de file: **CA Poitou Charentes**
Coordination Scientifique: **Université de Rennes**

Chef de file: **IFV**
Coordination Scientifique: **IFV**

Chef de file: **CA Champagne-Ardennes**
Coordination Scientifique: **AgroSup Dijon**

Chef de file: **CA Côte d'Or**
Coordination Scientifique: **AgroSup Dijon**

Chef de file: **PNR du Verdon**
Coordination Scientifique: **ISARA et ITAB**

-  Projets déposés
-  Dossiers en cours de constitution
-  Initiatives locales



Fonds Européen Agricole
pour le Développement Rural



Merci de votre attention ...



Agroécologie
Dijon
Unité de Recherche