ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

Colloque

Commémoration du bicentenaire de la naissance de PASTEUR

« Pasteur bienfaiteur de l'agriculture et l'alimentation»

„Bactéries et fonctionnalité des sols "

Jean Charles MUNCH

Chair of Soil Ecology, Techn.Univ. München (em.)

Membre titulaire de l'Académie d'Agriculture de France

Jacques BERTHELIN

Membre titulaire de l'Académie d'Agriculture de France

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

État des connaissance:
Les sols sont des habitats; leur biodiversité garantie les sols

Sols: peuplés intensément & diversement
☞ écosystèmes vivants

Sol superficiel d'un champ agricole/horticole:
jusqu'à 10 milliards de bactéries/archéobactéries et
env. 100 000 esp. (1 mio?) par gramme de sol
plus
champignons (hyphes)
micro-, méso, macrofaune
une poignée de sol:
plus d'organismes que d'humains sur terre…

p.ex. sol: 1 – 10 Mrd microorganismes/ g !!! env. 100000 – 1000000 espèces/g

p.ex. humain: 100 Mrd microorganismes/ individu!!! Qqs. 1000 espèces
microbiome intestin: 3,3 mio gènes; 150x nbr.gènes biome humain
(seuls 200 esp.bactériennes: identiques chez 90% des hommes)

Génome: métagenome 1 g sols ~ 4000 x génome microbiome humain

Pasteur et les organismes du sol

Pasteur, chimiste d'origine, postule contre la perception actuelle du caractére chimique de la putréfaction (Berzélius, von Liebig, Wahler…), qu'elle est un *processus biologique*, bactérien. Il montra entre 1857 et 1865 que les fermentations alcoolique, lactique, butyrique, étaient dues à des *organismes spécifiques* dont certains vivent en absence d'oxygène. Il est de ceux qui découvrent des « microbes », aérobies et anaérobies.

Pasteur admet de plus, que les „putréfactions" *dans les sols*, les dégradations de résidus organiques, sont des processus bactériens.
Ainsi, il proposait une origine microbienne des nitrates alors que les chimistes n'arrivaient pas à résoudre ce processus.
Mais, il fut attiré par d'autres recherches.

Hypothèses de Pasteur et les organismes du sol

Plusieurs chercheurs ont alors montré le rôle des microorganismes dans la production de nitrates à partir de sources d'azote organique et/ou ammoniacale.
Sergeï Winogradsky, devenu en 1922 à l'Institut Pasteur, directeur du Lab de bactériologie du sol (créé pour lui par Dr Roux, directeur de l'Institut), isola les bactéries nitrifiantes responsables et distingua les deux étapes, nitritation et nitratation.

Winogradsky, S. 1890. Recherches sur les organismes de la nitrification. Ann. Inst. Pasteur 4:213-231, 257-275, 760-771.

Dans son ouvrage de 1949 (Microbiologie du sol. Problèmes et méthodes. Masson, Paris), qui reprend l'ensemble de ses travaux, Winogradsky publia un chapitre qu'il intitula « les principes de l'écologie microbienne ». Winogradsky essaya de marier la microbiologie, l'agronomie et les sciences des sols en les faisant converger et évoluer et les engager dans les concepts de cycles

Institut Pasteur – des microbes fonctionnels dans les sols

Dès cette fin du XIXème siècle, les véritables « inventeurs » de la microbiologie des sols et de la microbiologie générale et des milieux naturels : Sergeï Winogradsky (1856-1953) et Martinus Beijerinck (1851-1931), actifs à l'Institut Pasteur.

Leur découvertes:
la nitrification, la fixation anaérobie et aérobie libre de l'azote, la dégradation de la cellulose et des matières organiques, les bactéries du cycle du soufre et du cycle du fer, l'autotrophie bactérienne, la mise au point et l'utilisation de milieux spécifiques, la création de la microbiologie écologique (ou microbiologie dynamique).

Pour Martinus Beijerinck, il isola la première bactérie symbiotique (ancêtre du rhizobium) qu'il appella *Bacillus radicicola*, les bactéries oxydantes et réductrices du soufre, les bactéries lactiques, et développa les bases de la virologie (mosaïque du tabac).

Les sols, les racines

Autres développements de cette période.

Pfeffer (1877) et Frank (1885) découvrent les associations champignon-racines qu'ils appelleront **mycorhizes** (endo- et ectomycorhizes).

Hiltner (1904) définit la **rhizosphère**, site d'échanges et d'activités intenses au niveau des systèmes racinaires.
(En 2004, centenaire, départ du colloque F-D rhizosphère).

Sergeï Winogradsky

Martinus Beijerinck

Développements consécutifs

L'attribution du prix Nobel de physiologie et médecine à Waksman en 1952 pour sa découverte de nouveaux antibiotiques (actinomycine, streptomycine), recherches qu'il mena à bien à partir de ses études des populations microbiennes du sol et de leurs antagonismes.

Le premier ouvrage de microbiologie du sol, « Handbuch der Landwirtschafliche Bakteriologie » fut publié par Lohnis chez Borntraeger à Berlin en 1910.

La première revue avec un sous titre de microbiologie des sols « Centralblatt für Bakteriologie und Parasitenkunde Infektionskrankheiten und Hygiene, Abteilung 2, Allgemeine Landwirtschaftiche und Technische Bakteriologie, Gärungsphysiologie und Pflanzenpathologie » parut aussi en Allemagne à la même époque.

Sol - Sols

Que sont les sols?

Produits d‘une évolution de
milliers d‘années

Chacun est un produit spécifique des conditions de site : substrat (rocheux, topographie, climat/cond. météo, végétation spécifique;
-> „Sols“

Construits très organisés **(système hiérarchisé d’agrégats poreux à surfaces réactives)** stables, de subst. minérales, substances organiques, **vies très complexes** (communautés…), eau c.à.d. solution saline, air (atm. du sol)

- Volume des pores: plus de 50 vol.%

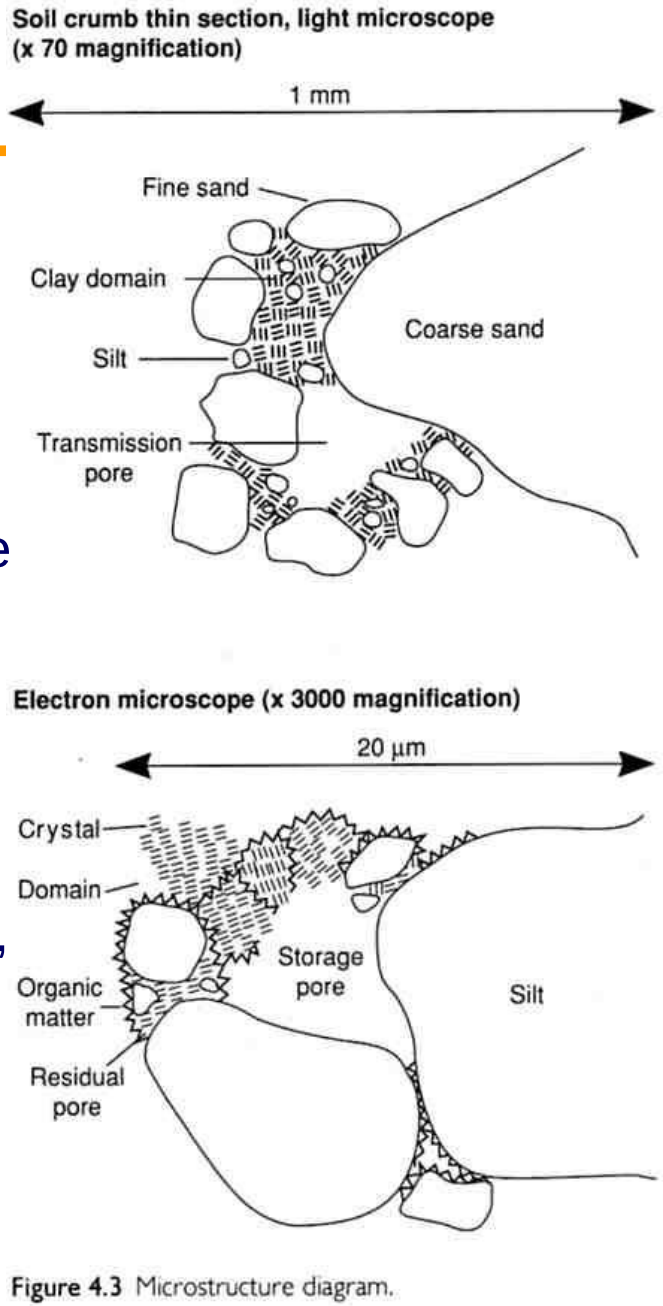
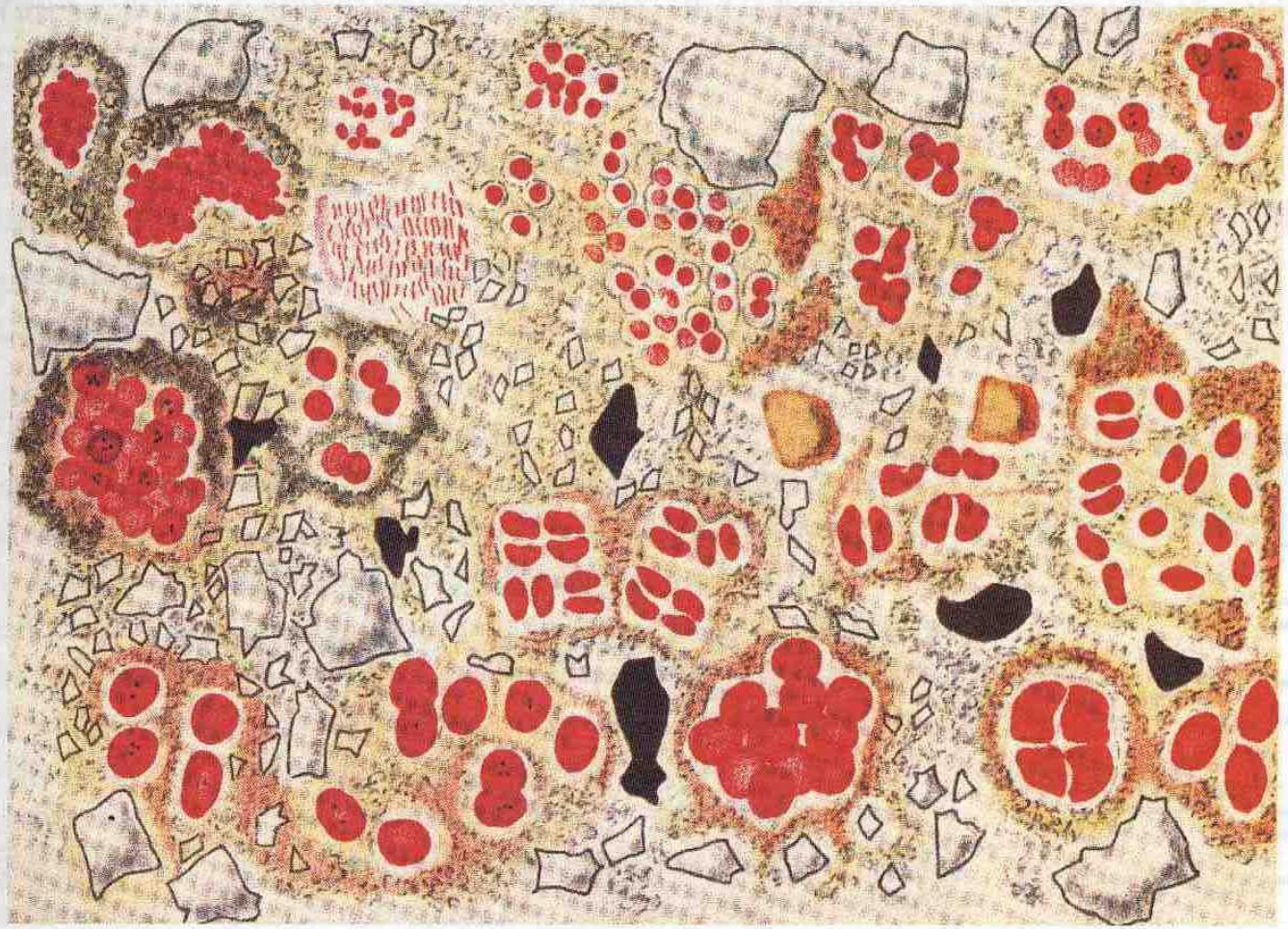


Figure 4.3 Microstructure diagram.



VII-1 Représentation schématisée de la microflore en place dans un sol agricole en jachère à Brie-Comte-Robert ; d'après Winogradsky (1949) qui la décrit de la manière suivante : « La *terre de Brie* est relativement riche en colloïde *(sic)*, tant incolore que coloré en jaune brunâtre, et qui recouvre tout le fond des préparations par ses flocons. Quantité modérée de corpuscules noirs ; quelques corpuscules jaunes brillants. » Avec l'autorisation des Editions Masson et Cie, Paris (§ 2.5.2).

Les conditions de vie des organismes du sol

Espaces libres = espaces poreux des sols :

renferment air + eau (plutôt solution + solutés)

avec changements constants des relations air-eau

avec variations des substrats (selon végétation etc.)

Dans les pores:

microorganismes dans l'eau et film sur surfaces

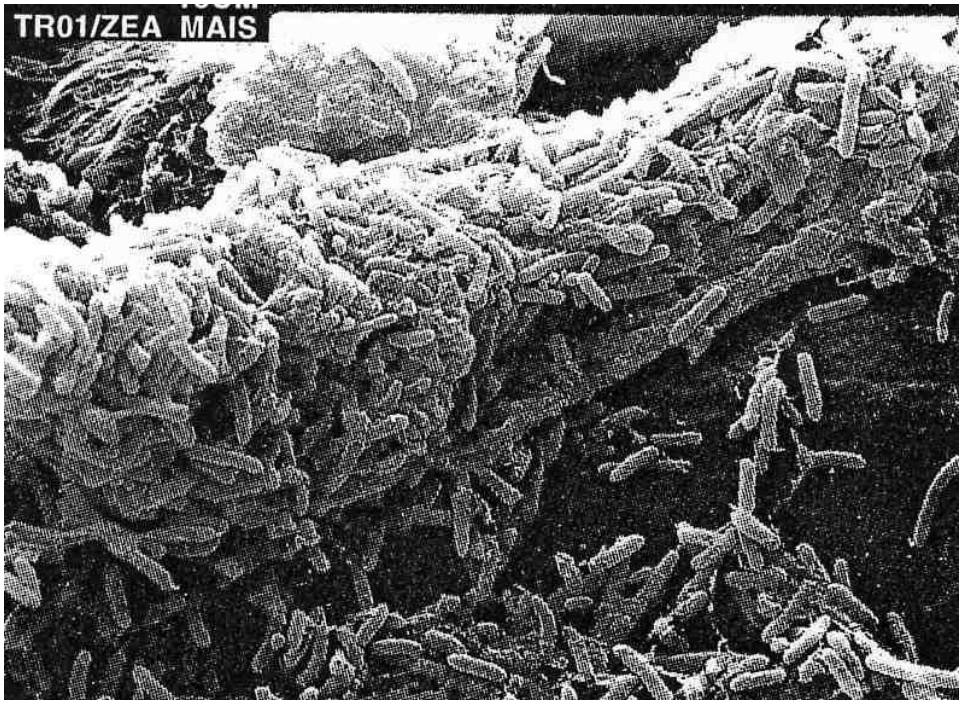
sur parois des pores

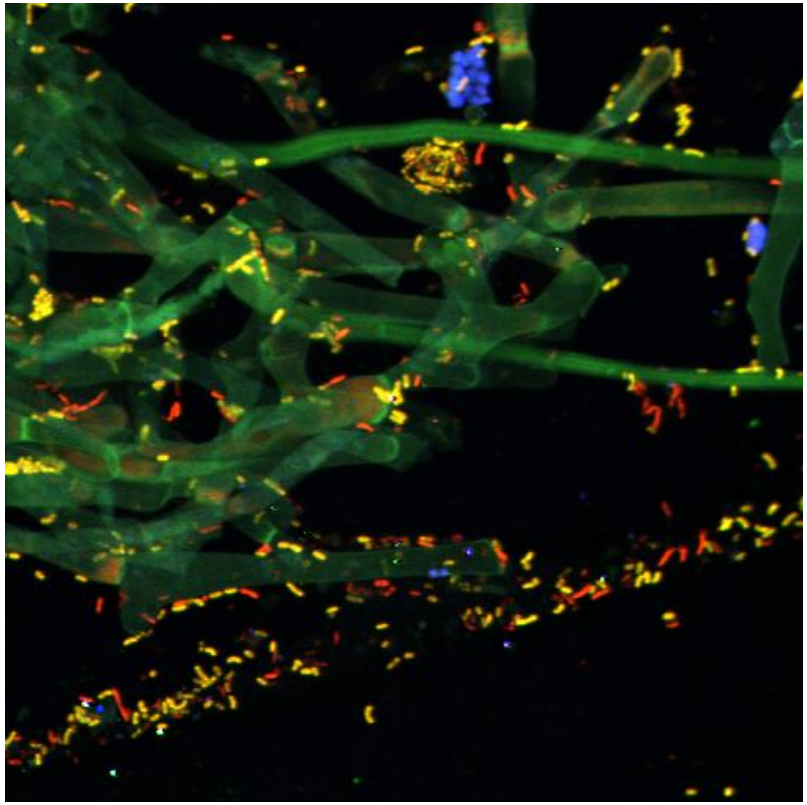
sur particules organiques (= substrats…)

sur racines (= substrats…)

microorganismes dans les pores pleins d'eau

Rhizosphère, un hot spot de colonisation et activités microbiennes





Diversité de bactéries associées au hyphes de champignons telluriques

confocal laser scanning microscopy, Fluoreszenz after in situ Hybridisation with phylogenetischen markers, each with a fluoreszent dye.
(from: C. Kellermann, Hemholtz Zentrum München)

Les conditions de vie des organismes du sol

Espaces libres = espaces poreux des sols :
renferment air + eau (plutôt solution + solutés)
avec changements constants des relations air-eau
avec changements des substrats (selon végétation etc.)

Dans les pores:
microorganismes dans l'eau(film) sur surfaces
sur parois des pores
sur particules organiques (substrats…)
sur racines (substrats…)
microorganismes dans les pores pleins d'eau

Intestin de la faune: habitat plus constant

- **hétérogénéités extrêmes des conditions de vie**
- **régulation stricte de la "vie", sélection des activités temporelles, dormances ; lyse de populations -> énergie libre pour actives**

Activités biologiques, microbiologiques: lequelles?

Formation et stabilité/conservation des sols :

transformation des résidus végétaux en matières humiques;
formation du « système » sol par structuration

Nombreuses transformations de matières, p.ex.

transformations et mobilisations d'éléments
(organiques + minéraux)
◊ disponibilité d'éléments nutritifs –croissance des plantes

interactions avec racines: symbioses, contrôle de champignons et bactéries phytopathogènes (bio-contrôle,..)

cycles globaux (retour du N_2 à l'atm.)
dégradation de substances étrangères aux sols
(dépôts déchets/résidus, pesticides, antibiotiques-prod.animale)

...

Pas de sols, pas de fonctions des sols sans biologie,
sans microorganismes

Découvrir les conditions écologiques des microorganismes du sol

oekos = maison, habitation; conditions = environnements

- les comprendre pour des sols très hétérogènes?

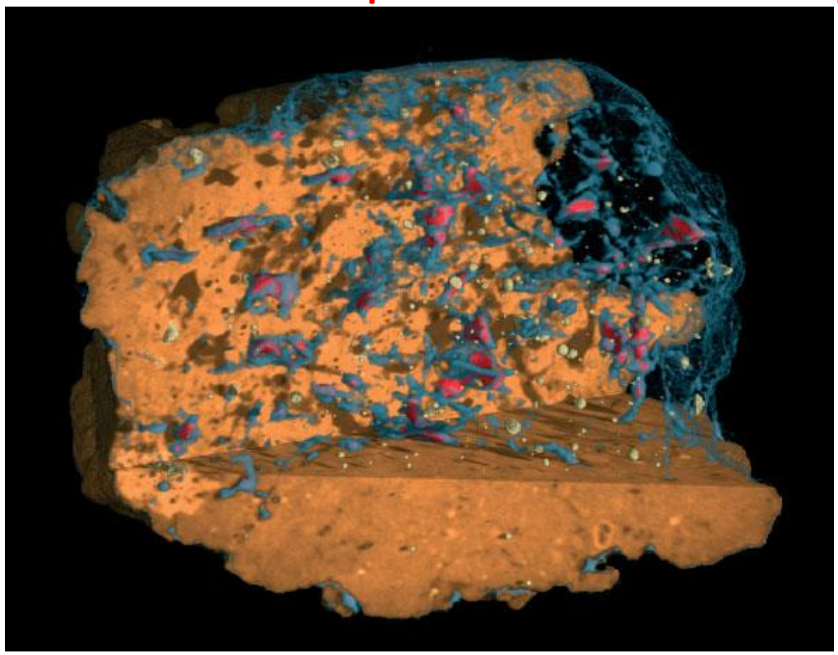
quelques exemples
des possibilités actuelles d'analyses à toute échelles :

micro site

terrain

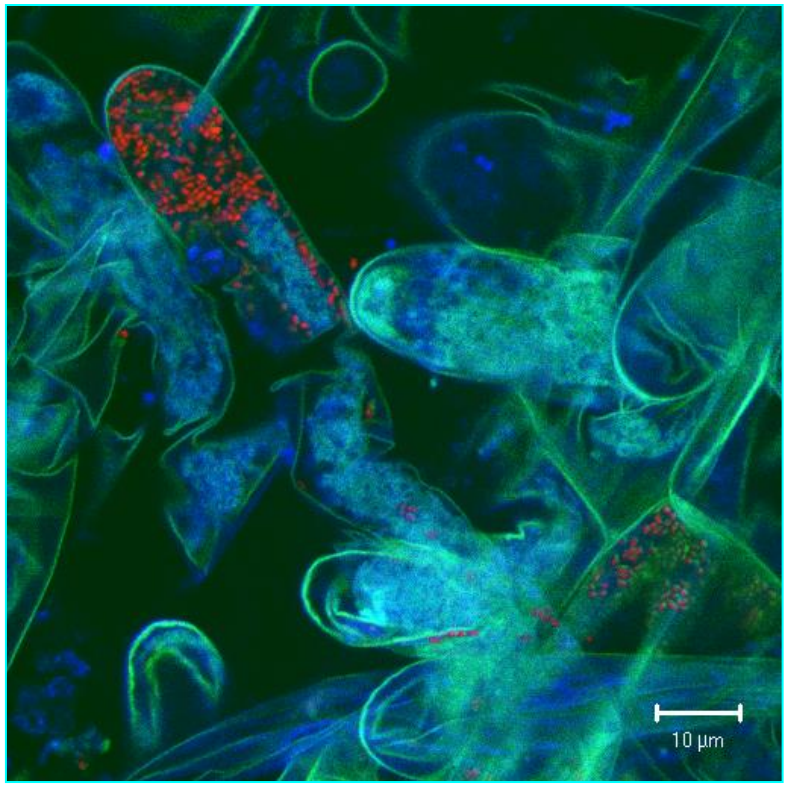
Microcompartiments, les milieux de vie des microorganismes

Techniques actuelles: les pores dans un agrégat des sol



mini computer tomographie
diamètre: 2 cm

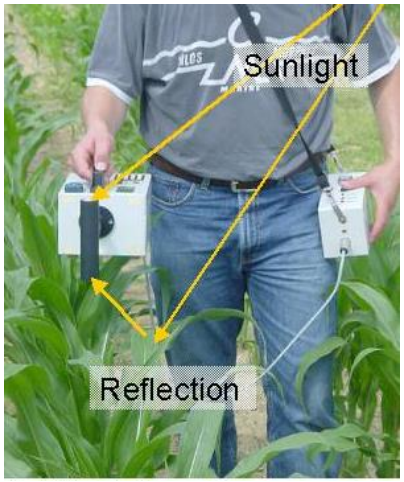
Helmholtz Zentrum UFZ, Halle, H.J. Vogel



Dialogue bactéries racines

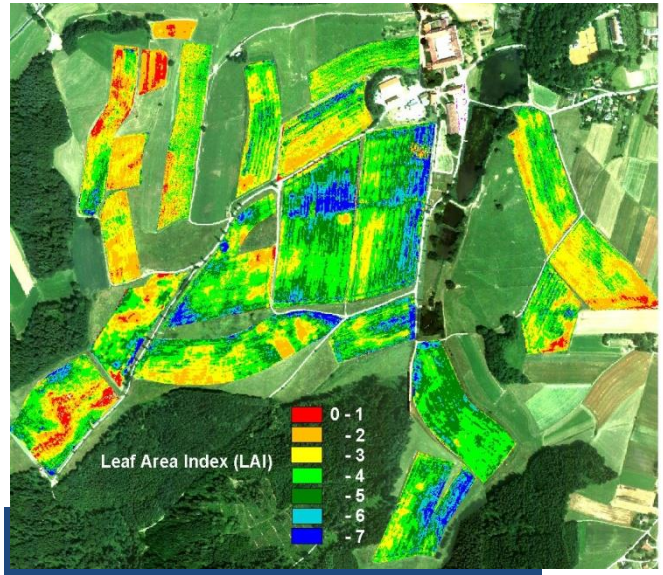
Rouges: bactéries sur racines de mais, synthétisant de l'homo sérine lactone (+ marqueur fluorescent rouge):

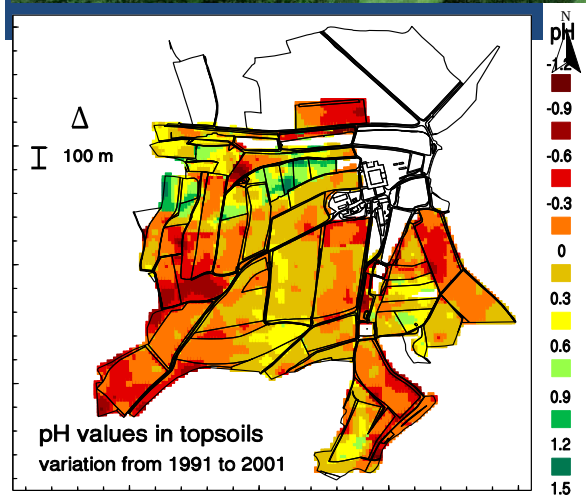
Analyses des plantes, du sol, *online*



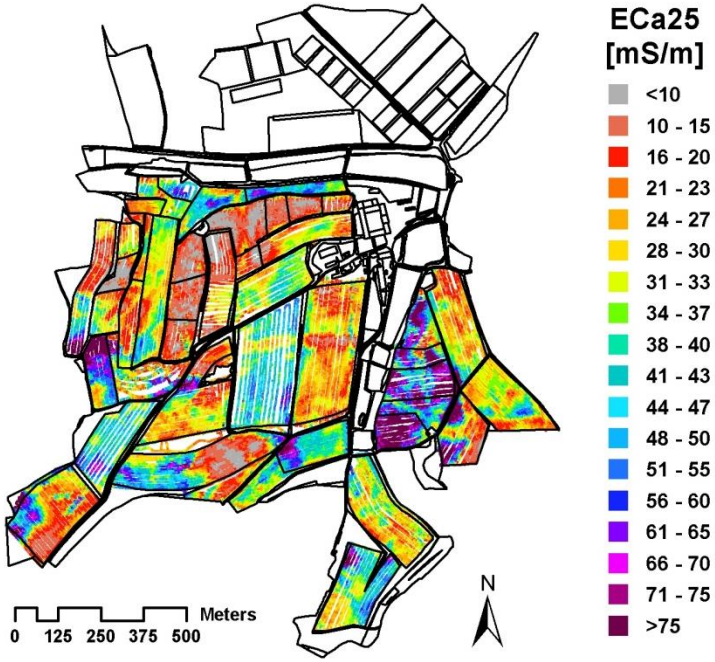
big data ……,
au service de la mibio?

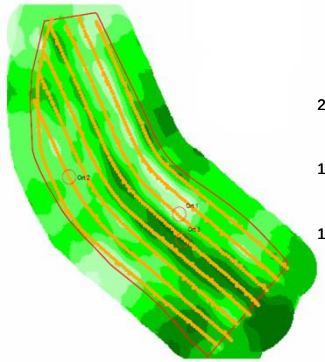
Remote sensing operation :
Estimated LAI airborn, 300 m altitude
Ferme exp Scheyern (D)

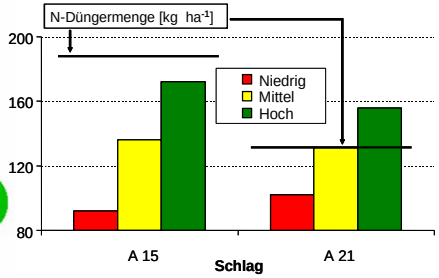




Non invasive soil analysis:
EM 38
Ferme Scheyern

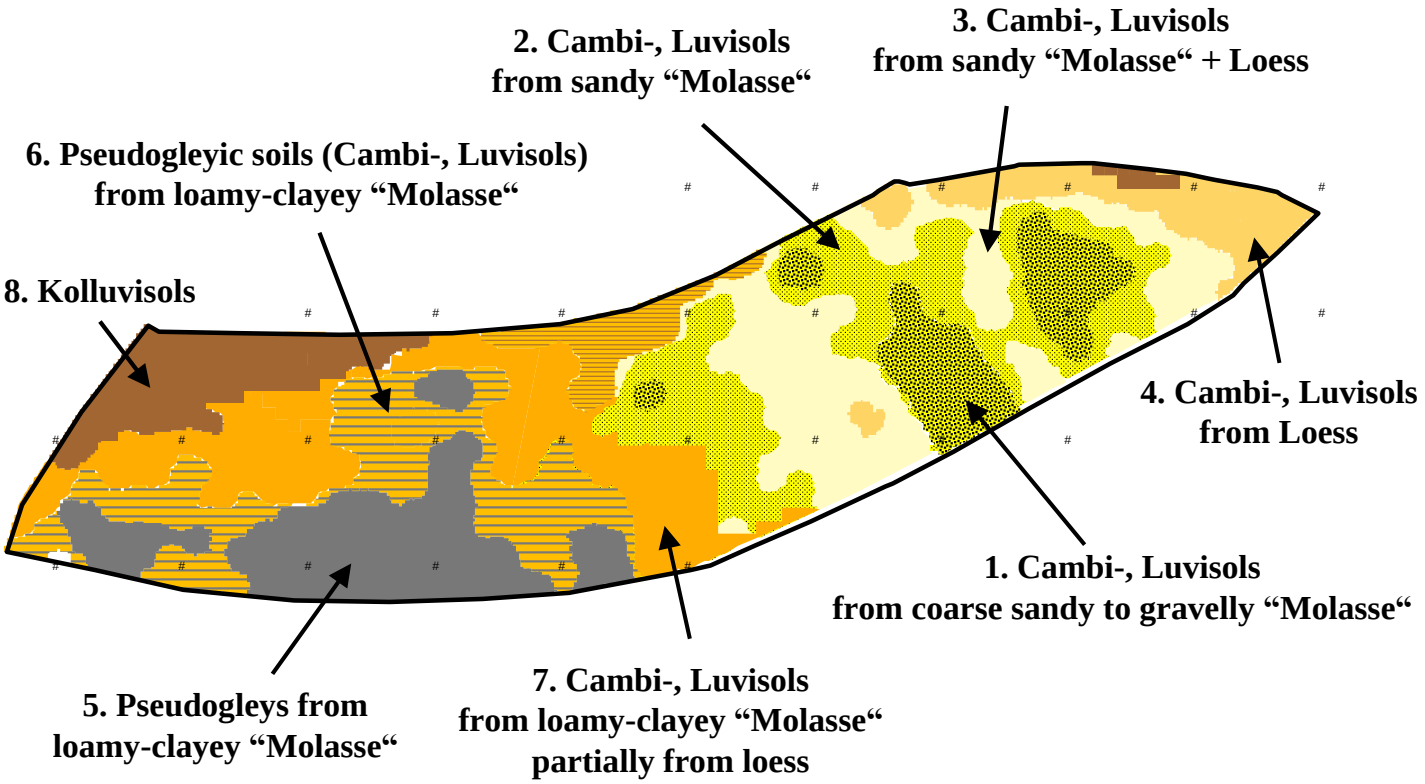






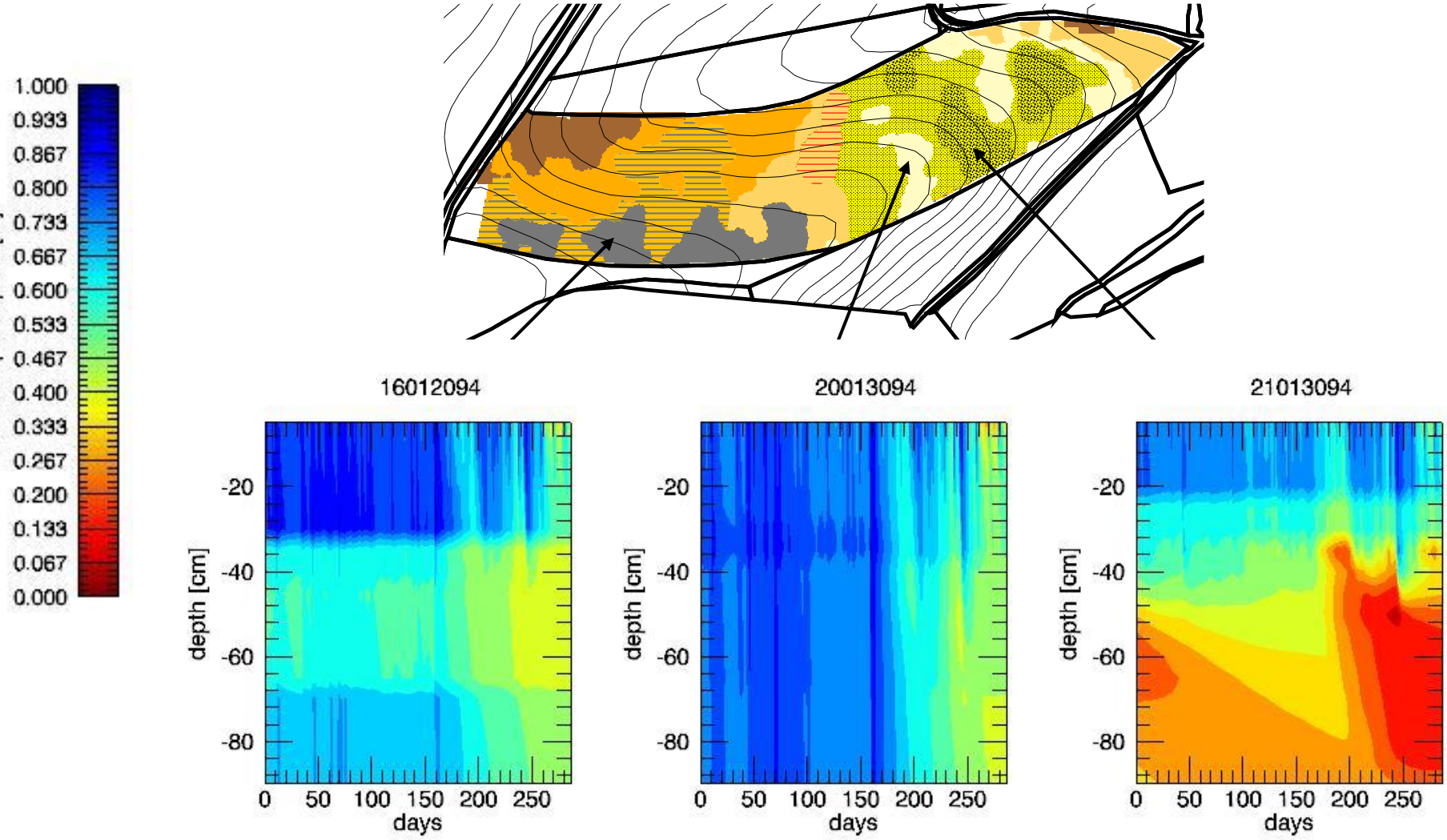
Carte des sols, ...

Champ, Ferme Scheyern (D)



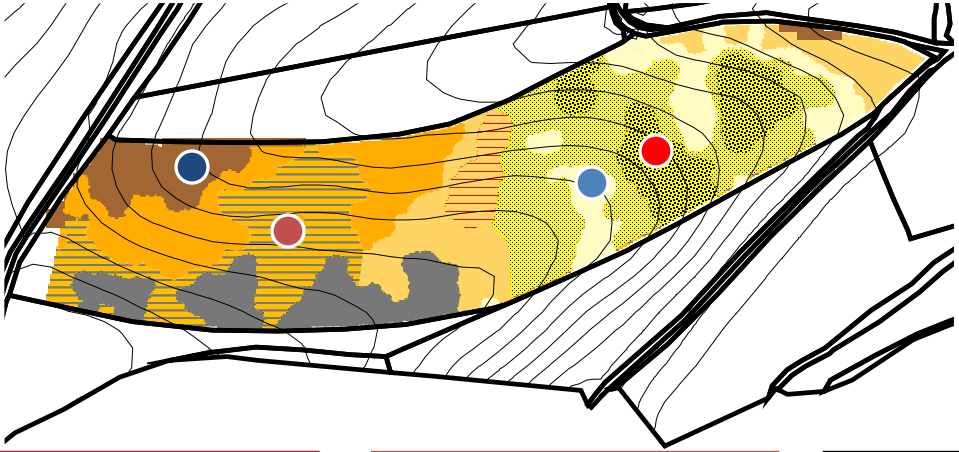
Pedodiversité et diversité functionnelle

Volume poreux rempli d‘eau - Water Filled Pore Space



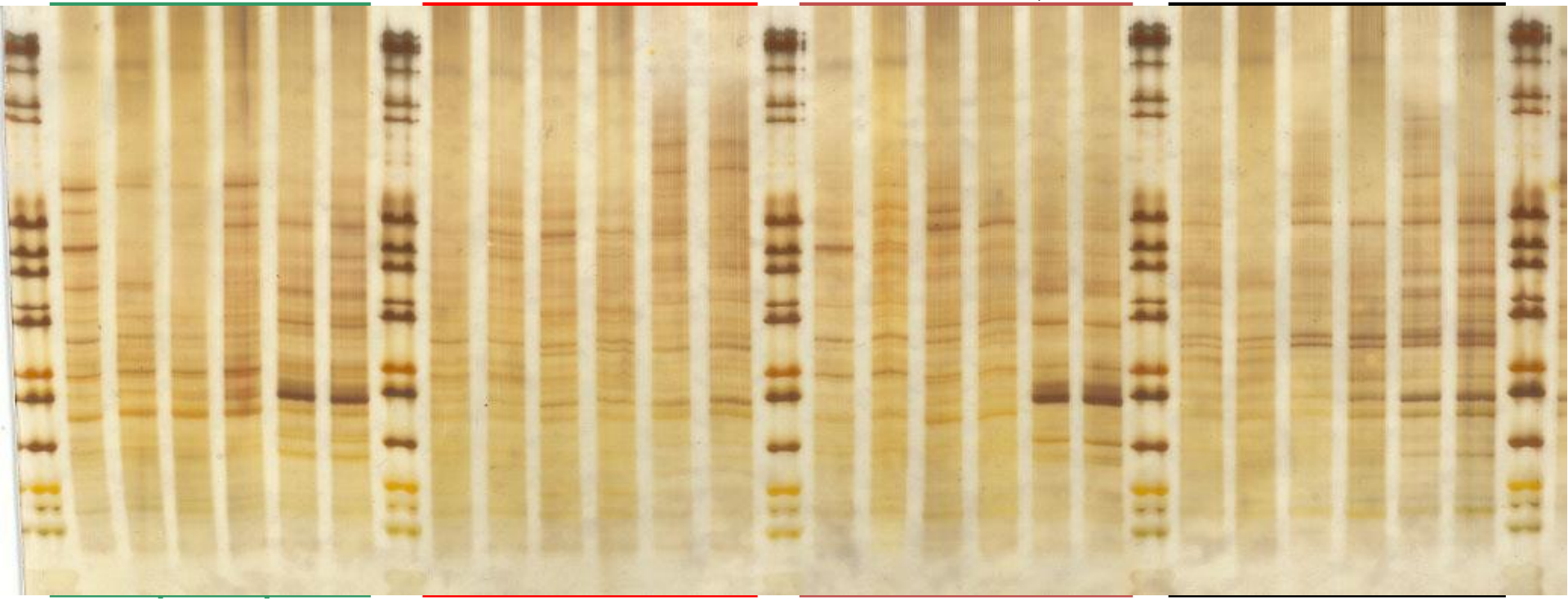
Pédodiversité et diversité fonctionelle

DNA Fingerprinting



Depth [cm]

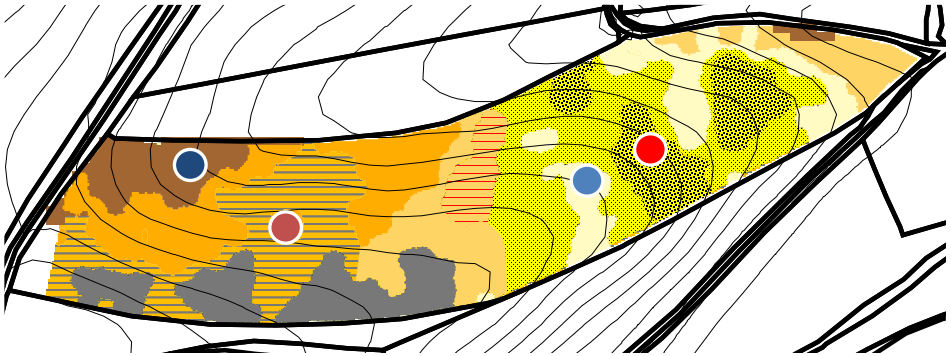
0 -10 - 28 - 40

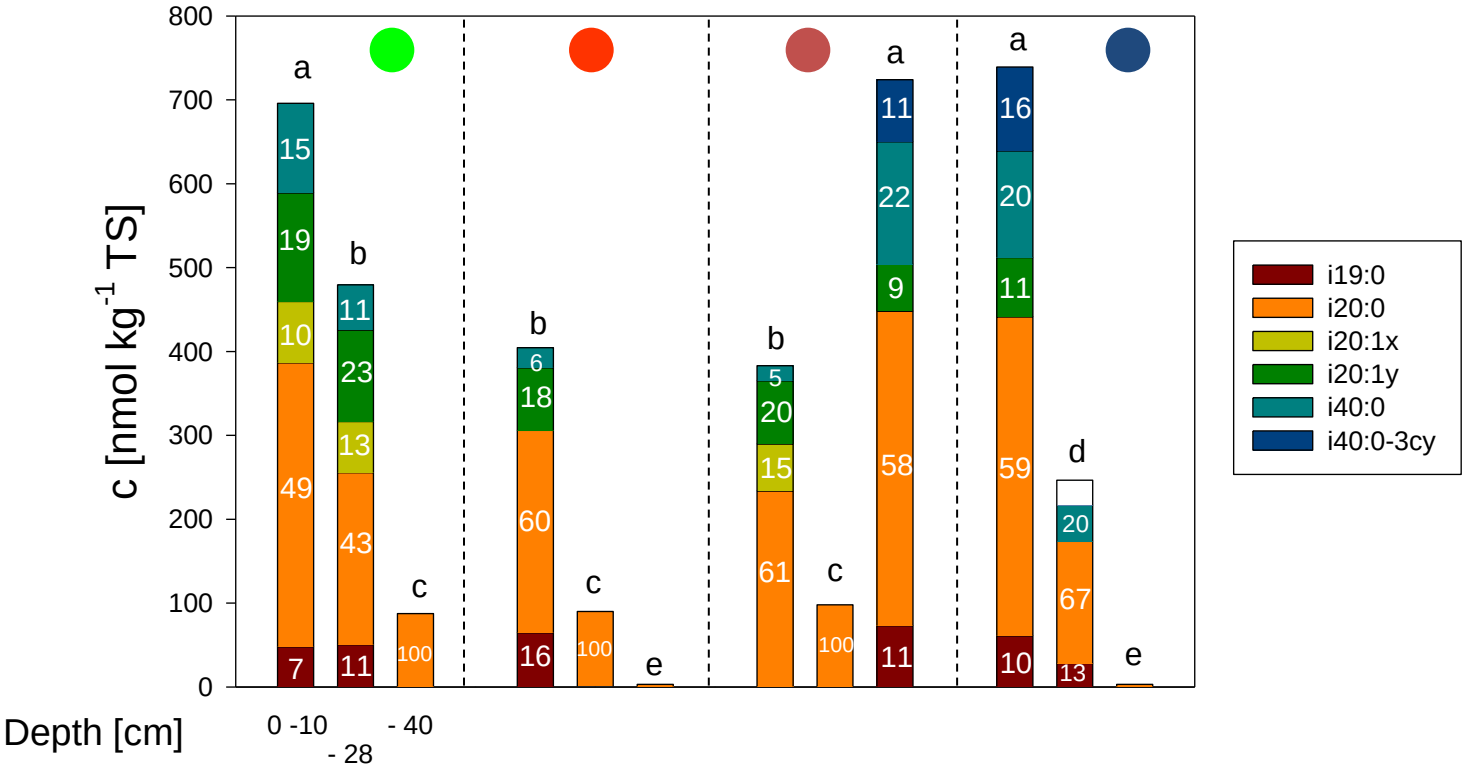


Pédodiversité et diversité fonctionelle

Archaeal Lipids (PLEL)

- **methanogènes**





Pourquoi cette richesse biotique? Un luxe?

Les sols se sont développés grâce aux composés biotiques qui ont permis
- l'entrée d'énergie (suite de photosynthèse) et
- la transformation de composés organiques en matière organique du sol (humus), indispensable à la structure et aux fonctions des sols.

Les *hétérogénéités spatiales et temporelles* nécessitent une grande diversité d'organismes avec tous les potentiels génétiques codant pour toutes fonctions requises, *sous toutes constellations de conditions*.

Les sols diregent ces populations et communautés d'organismes, en *optimisant l'utilisation des ressources* énergétiques disponibles.

Les sols sont des unités vivantes, holobiotiques.

Risques pour la vie dans les sols

Manque d'énergie et de substrats organiques:

pas de résidus org. à la récolte, p.ex. pour méthanisation

Manque d'espace vital, destruction des milieux de vie

- Compaction du sols et perte de volume poreux
  p.ex. machines trop lourdes,
  pression lors de temps inapproprié (sols trop humides)

-> les pores sont les milieux de vie des organismes;
pas de biologie sans suffisamment de volume poreux,
avec distribution inapproprié des tailles de pores,
sans aération du dol.

-> les pores assurent la rétention de l'eau, milieu de vie

Compaction des sols

Dangers pour sols par compaction

Destruction des milieux de vie

- Compaction du sols et perte de volume poreux
  p.ex. machines trop lourdes,
  pression par temps inapproprié (sols trop humides)

-> les pores sont les milieux de vie des organismes;
pas de biologie sans suffisamment de volume poreux,
avec distribution inapproprié des tailles de pores,
sans aération du dol.

-> les pores assurent la rétention de l'eau, milieu de vie

Bilan ; sols et nutrition

Sols mondiaux:

1/3 des sols: non utilisables,
arides, gelés, couverts de neige + glace

Sols avec végétation:

31% forets
36% utilisable pour la production végétale „alimentaire"
24% pâturages, prairies (pour nutrition animale -> nutrition humaine)
12% arables (= nutrition humaine, aliments)
(• 1/4: pour les marchés,
• 3/4 besoins propres fermiers)

Besoins d'une gestion avec

- conservation/amélioration des sols … … …
- rendements – suffisants
  - haute qualité
- minimum de risques environnementaux

L'Héritage de Pasteur et les sols

Les hypothèses de Pasteur ont engendré des recherches essentielles pour la compréhension des sols.

Les développements méthodologiques permettent le savoir des communautés microbiennes et de comprendre leur fonctionnement.

La vie dans les sols est essentielle pour les sols, et pour l'entretien de nos paysages de plus en plus anthropisés.

Les agriculteurs peuvent à peine acheter des terres! !
ils ne décident plus de la forme de gestion (aliments vs. énergie)

Les terres agricoles sont objets de spéculations financières !!

Conférence „Pasteur"
Académie d'Agriculture de France,
14. déc 2022

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE
AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

Perspective: **meilleure utilisation du potentiel biologique des sols,**
un atout pour la production agricole/végétale

◊ **Buts:**

- générer du savoir sur le potentiel génétique des sols, sa régulation dans l'écosystème sol
- l'utiliser dans la pratique agricole, horticole, forestière
- réduire les intrants chimiques
  (mobiliser plus de nutriments des sols,
  contrôle des pathogènes par leur antagonistes, etc.)
- assurer la formation (microbienne) de matière organique des sols

◊ **Synthèse:** sauvons les sols qui nous restent en les comprenant mieux, et pour mieux les gérer

Merci
Merci pour l'intérêt porté à nos sols

2015
International
Year of Soils