Module “Ecologie des sols et des sédiments”

Modification physique du milieu par la faune du sol = Bioturbation

Eric BLANCHART et Tantely RAZAFIMBELO

Institut de recherche pour le développement

Modification physique du milieu par la faune du sol

1. Structure du sol (rappels)

2. Modification de la porosité

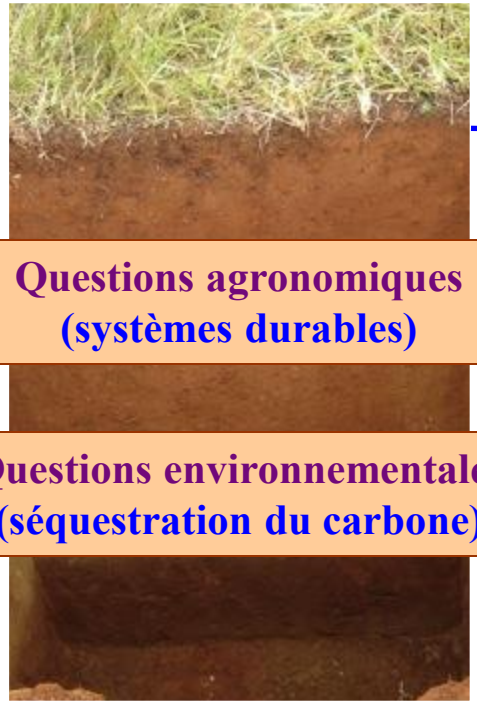
3. Modification de l'agrégation

4. Modélisation

1. Structure du sol

Fonctions (= services écosystémiques) du sol

Ecosystèmes terrestres



Questions agronomiques (systèmes durables)

Questions environnementales (séquestration du carbone)

Support
Production primaire
Production d'oxygène
Formation et rétention des sols
Recyclage des nutriments

Culture
Diversité et identité culturelles
Ecotourisme

Approvisionnement
Aliments et fibres
Ressources génétiques
Produits biochimiques et pharmaceutiques
Ressources environnementales

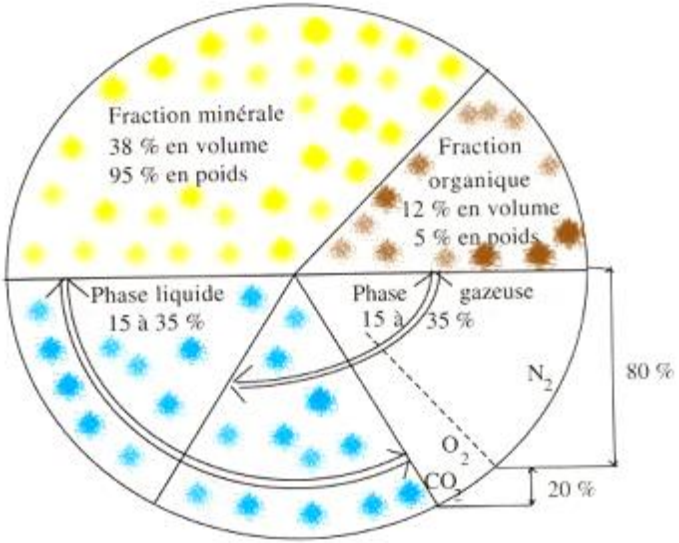
Régulation
Qualité de l'air
Régulation du climat
Contrôle de l'érosion
Purification de l'eau
Traitement des déchets
Régulation de maladies
Détoxification
Contrôle biologique

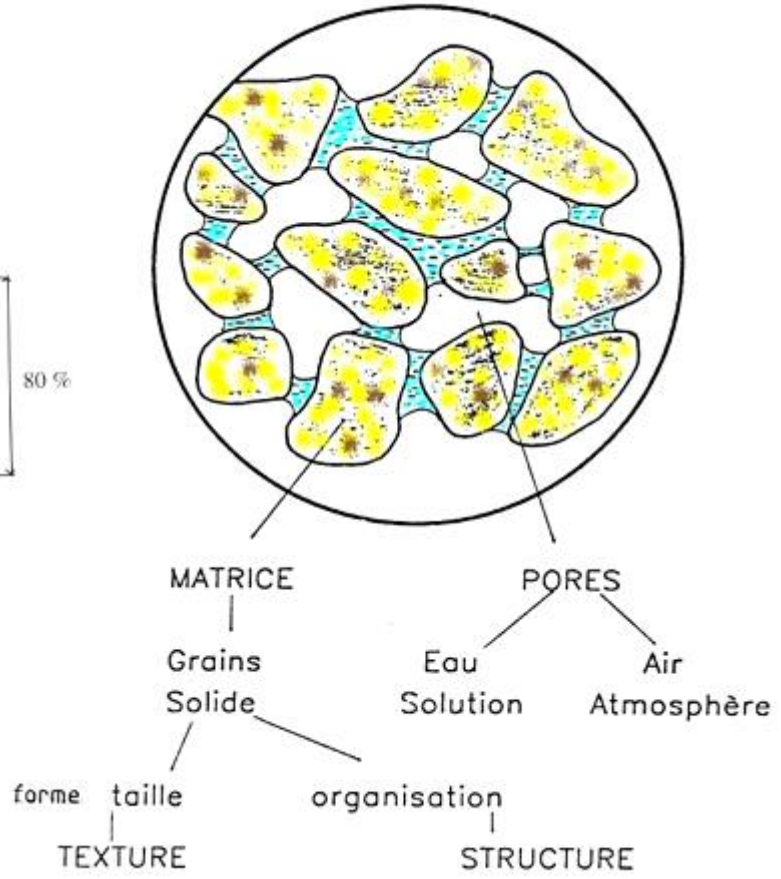
Services écosystémiques

1. Structure du sol

La structure du sol est le mode d'arrangement des particules du sol dans l'espace et celui des vides qu'elles délimitent

C'est le mode d'assemblage qui détermine les propriétés physiques

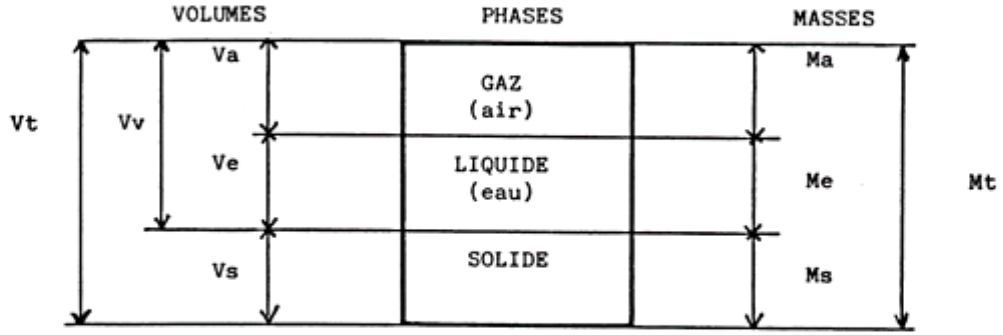




Composition et structure du sol

1. Structure du sol

Principaux paramètres de caractérisation physique du sol



SCHEMA DE SYMBOLISATION DU SYSTEME TRIPHASE SOL.

PARAMETRE	SYMBOLES			Définition (3)	Relation avec autres paramètres
	Français(1)	S.I. (2)	autre		
Masse volumique de l'eau		γw		Me/Ve	
Masse volumique du solide		γs		Ms/Vs	
Masse volumique apparente		γh		Mt/Vt	
Masse volumique sèche		γd		Ms/Vt	
Densité réelle	D, dr	ρs		$\gamma s / \gamma w$	
Densité apparente humide	da h	ρh		$\gamma h / \gamma w$ = Mt/(Vt.γw)	(Ms+Me)/(Vt.γw)
Densité apparente (sèche)	d, da, das	ρd		$\gamma d / \gamma w$ = Ms/(Vt.γw)	
Porosité	P	n	f	Vv/Vt	$1 - (\rho d/\rho s)$
Indice des vides	Iv	e		Vv/Vs	n/(1-n)
Teneur en eau massique (humidité pondérale)	H, Hp	W		Me/Ms	
Teneur en eau volumique (humidité volumique)	Hv	θ		Ve/Vt	W . ρd
Degré de saturation (en eau)		Sr	θs	Ve/Vv	θ/n
Teneur en air		ε	fa	Va/Vt	$n - \theta$

1. Structure du sol

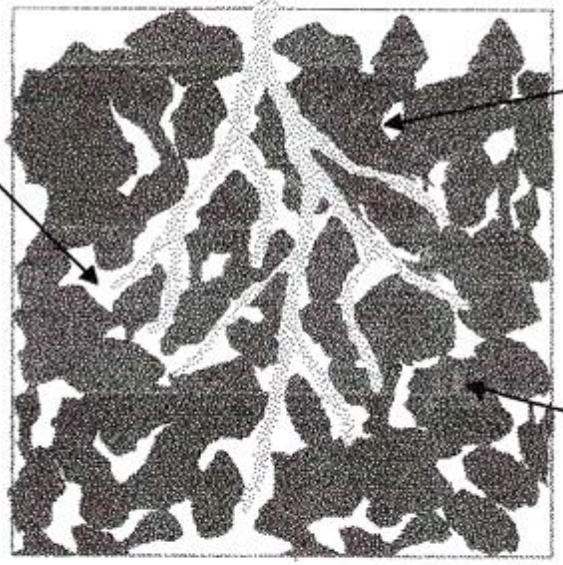
Importance agronomique : l'agencement des particules définit des pores de taille et interconnexion variée, dont la disponibilité de l'eau et de l'air pour les plantes et les microorganismes et les possibilités de pénétration par les racines

Importance environnementale : une bonne structure permet l'infiltration de l'eau donc limite le ruissellement et l'érosion (pertes en terre, coulées boueuses), qualité des eaux superficielles

1. Structure du sol

Importance de la structure du sol:

une pénétration
aisée des racines
ancrage,
colonisation



des macro-pores assurant:
- drainage
- aération

respiration des racines

des micro-pores remplis d'eau
eau, éléments nutritifs

- Habitat des racines et des microorganismes auxilliaires
- Elément de la **qualité physique** des sols

C.Cheru, INRA, 99

1. Structure du sol

Les types de structure

- Particulaire, massive, agrégée
- Agrégat =

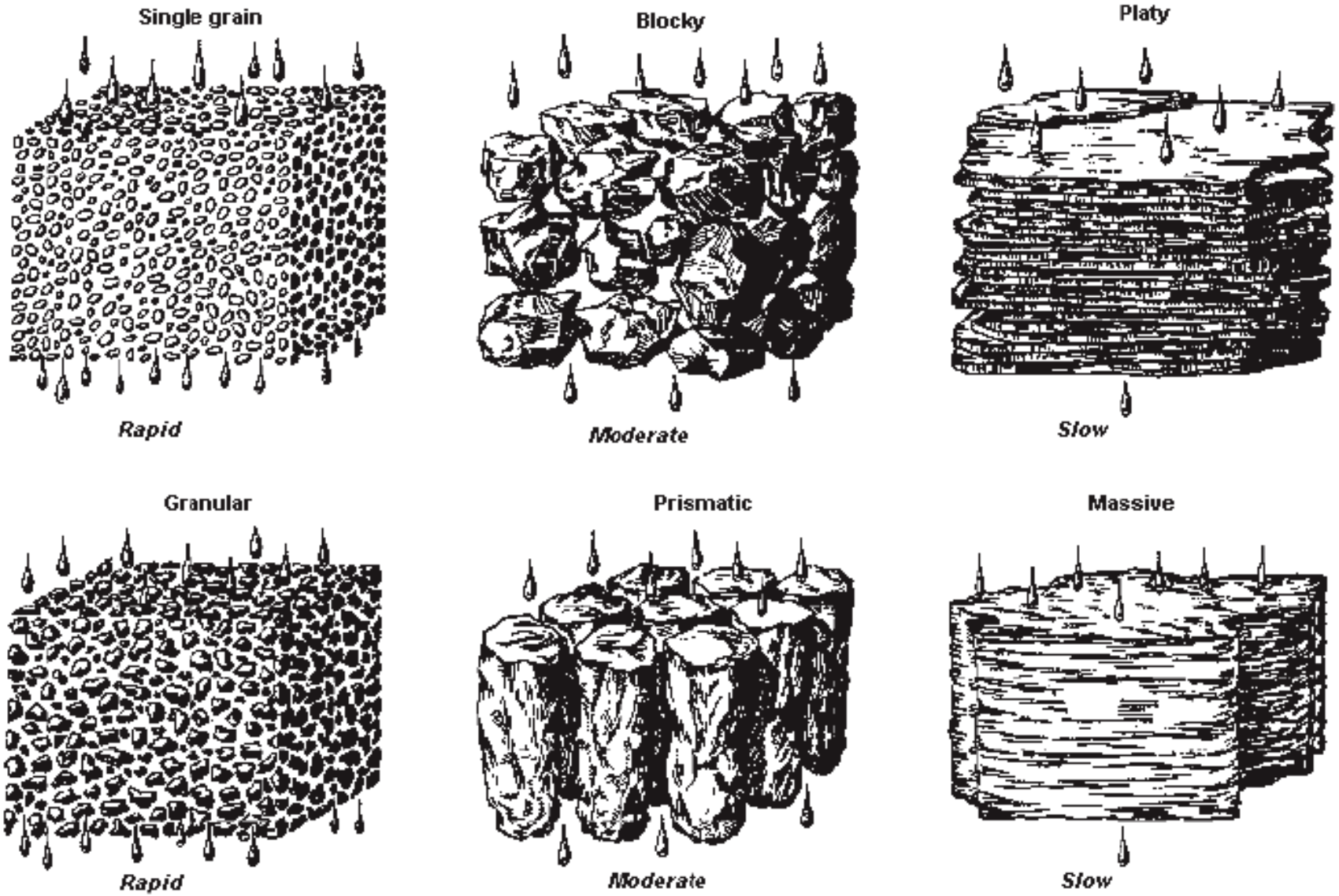
  - ensemble de particules du sol entre lesquelles les forces de cohésion sont plus élevées qu'avec les particules adjacentes

  - microagrégats (< 0,2 mm) et macroagrégats (> 0,2 mm)

- La structure agrégée a une organisation hiérarchique ou fractale (parfois ?)

1. Structure du sol

Différents types de structure et conséquences pour l'infiltration



1. Structure du sol

Différents types de structure

1. Structure du sol

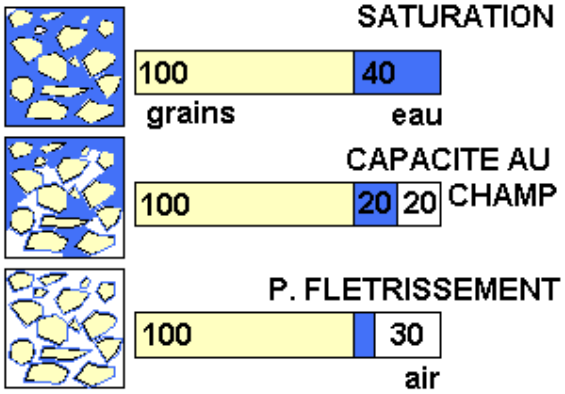
Caractérisation de la structure

Les pleins : agrégation

Les vides : porosité (densité apparente, spectre poral)

L'eau dans le sol (infiltration, perméabilité, conductivité hydraulique, réserve en eau utile, caractéristiques hydrostructurales)

La stabilité de la structure (de l'agrégation)



1. Structure du sol

Echelle des constituants et organisations du sol

Echelle (m)	Particules	Organismes vivants et MO	Organisations	Porosité
10^{-10}	Atomes			
10^{-9} nm	Molécules	Molécules organique	Etat cristallin, minéraux amorphes	
10^{-8}	Macromolécules	Polysaccharides		Micropores Eau adsorbée, intra cristalline
10^{-7}	Colloïdes	Substances humiques		
10^{-6} µm	Particules d'argile	Virus Bactéries	Particules d'argile tactoïdes, domaines	Mésopores (eau utile) (capillarité)
	0.002 m			
10^{-5}	Limons	Hyphes, levures	Assemblages argile microagrégats	
	0.05 mm			Macropores
10^{-4}	Sables	Poils absorbants racines		Pores de drainage et d'aération
10^{-3} mm	2 mm	mésofaune	macroagrégats	
	Graviers			
10^{-2} cm		Vers de terre		
10^{-1} dm		Taupes	Mottes (horizons)	
1 m		Blaireaux…	(Horizons, profils)	

1. Structure du sol

Les vides du sol = pores

Les pores sont les vides su sol. Important car l'eau et l'air se déplacent à l'intérieur et y sont stockés.
Sans air, la plupart des organismes du sol (dont les racines) ne pourraient pas vivre

Les types de pores

Pores interstitiels : espaces entre les grains minéraux et les agrégats
Pores tubulaires : pores faits par l'activité des racines et des animaux (continus)
Pores vésiculaires : pores en forme de bulles

Les tailles de pores

Macropores : permet le mouvement libre de l'eau et de l'air
Micropores : mouvement de l'air grandement perturbé, mouvement de l'eau réduit au flux capillaire

1. Structure du sol

Forme des macropores / propriétés fonctionnelles

vides d'entassement d'agrégats

→ stockage d'eau, aération

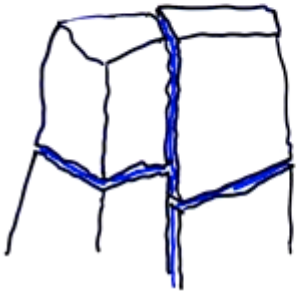
→ conductivité f° des rayons de constriction

vides tubulaires

→ conductivité f°. du ϕ
. de la tortuosité
. de leur longueur

→ non affectés par le retrait/gonflement

vides planaires



→ dynamiques en f° des conditions d'humectation

→ grande continuité

→ conductivité f° de l'orientation

1. Structure du sol

Mesure de l'agrégation (désagrégation)

dispersion complète

dispersion ménagée

sables

limons

argiles
< 2 µm

fractionnement d'unités structurales

fractionnement granulométrique et densimétrique de particules

Matrice du sol

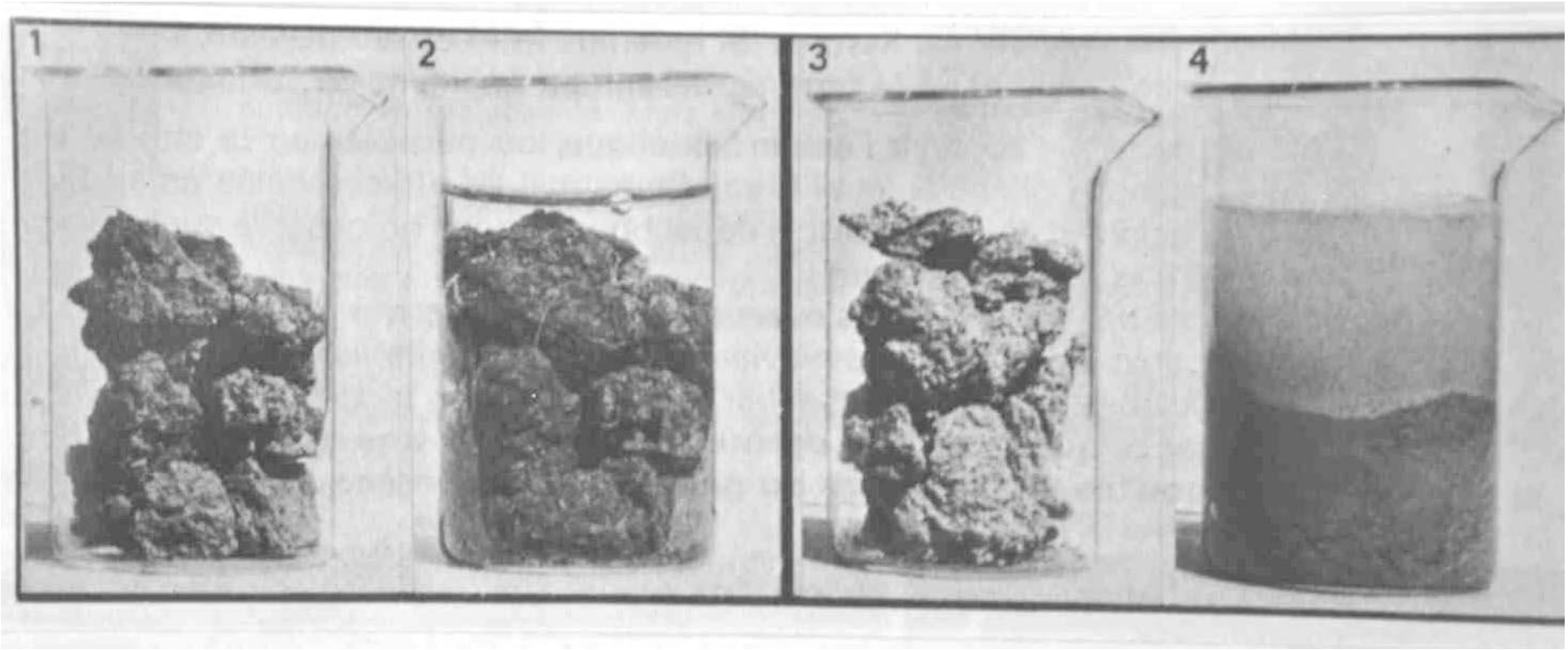
Associations organo-minérales secondaires

- Particules élémentaires du sol
- Associations organo-minérales "primaires"

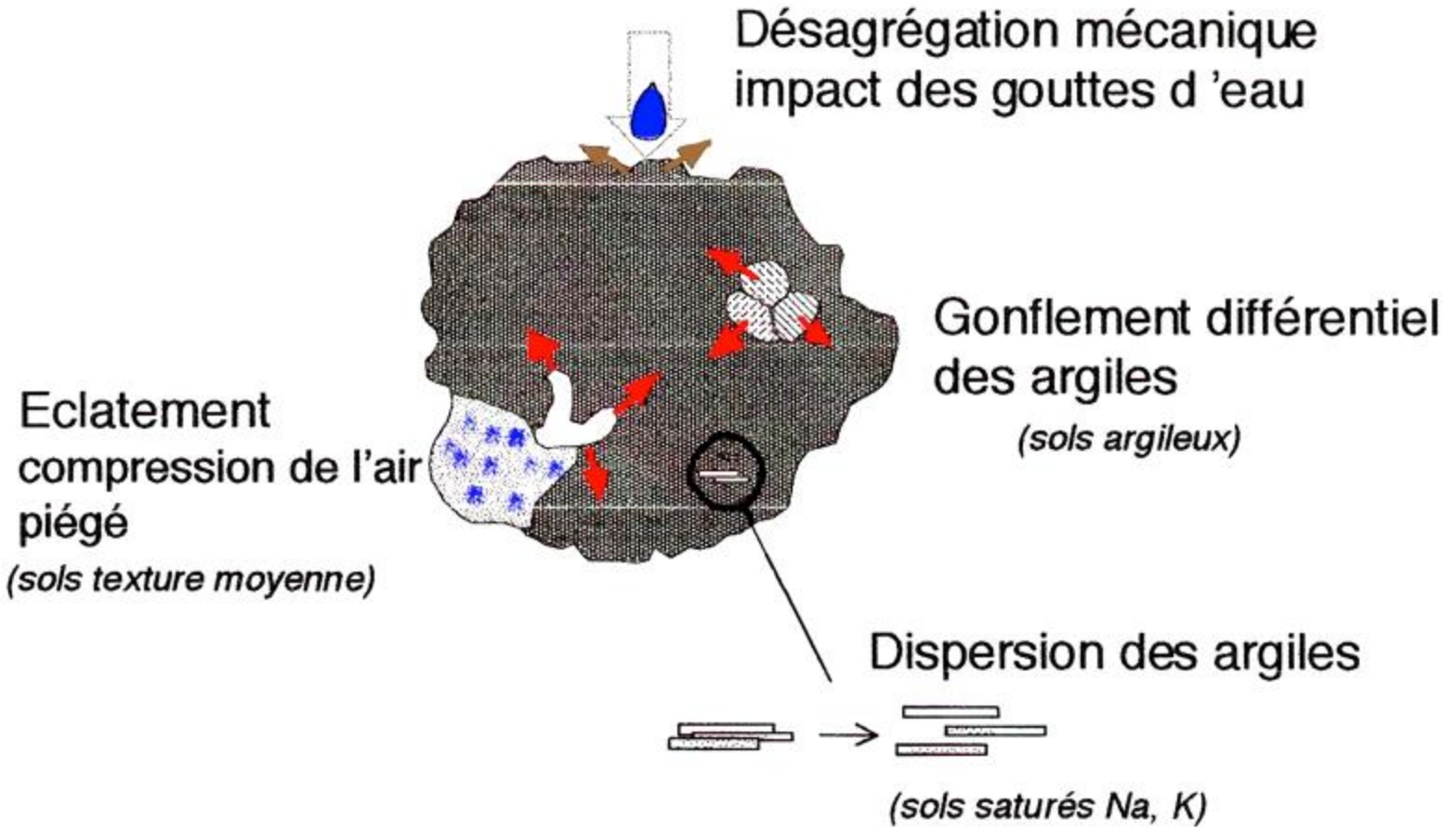
d'après Christensen, 95

1. Structure du sol

Test de stabilité structurale à l'eau

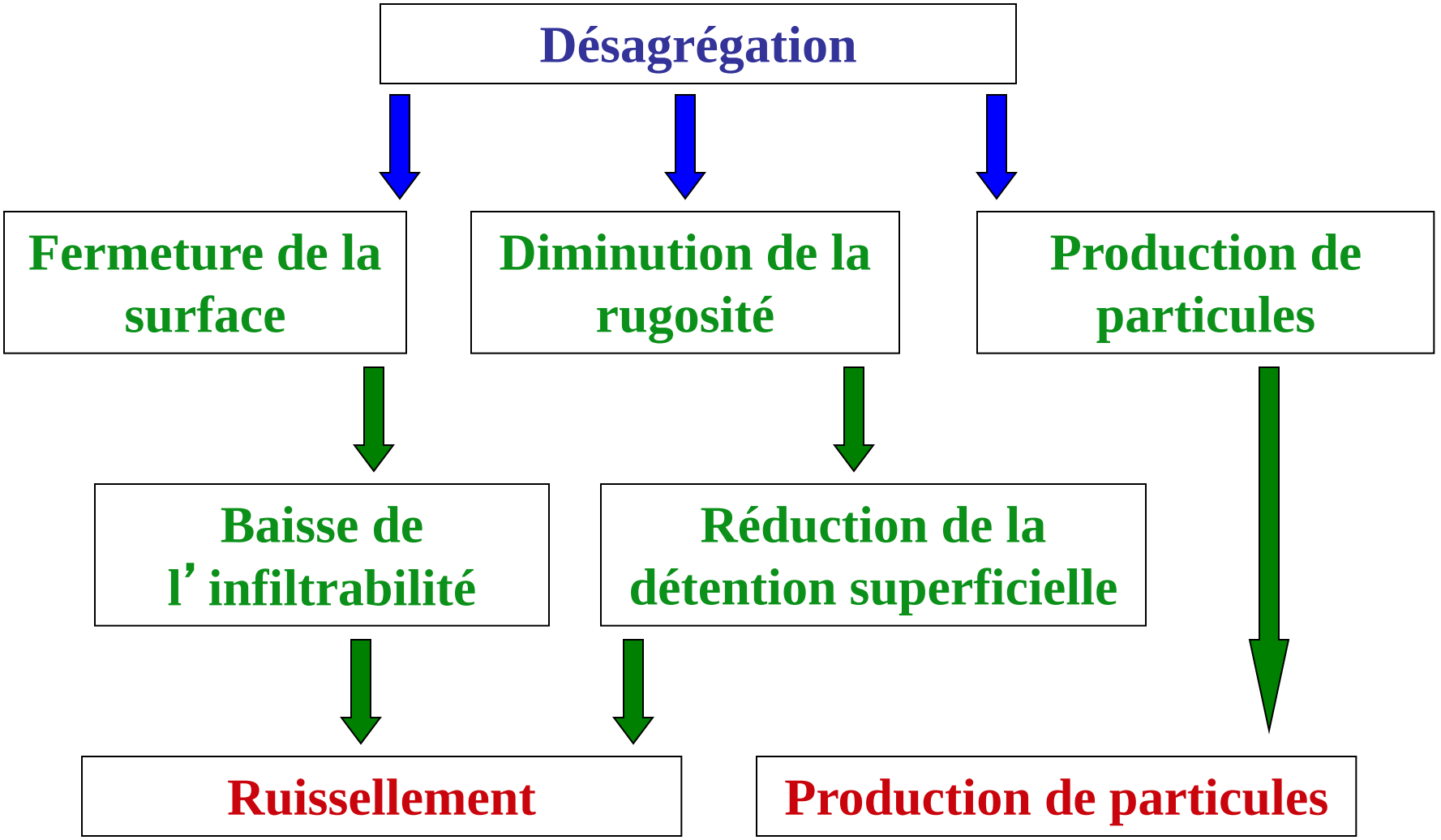


Mécanismes de désagrégation de la structure par l'eau



1. Structure du sol

Désagrégation par la pluie (érosion)



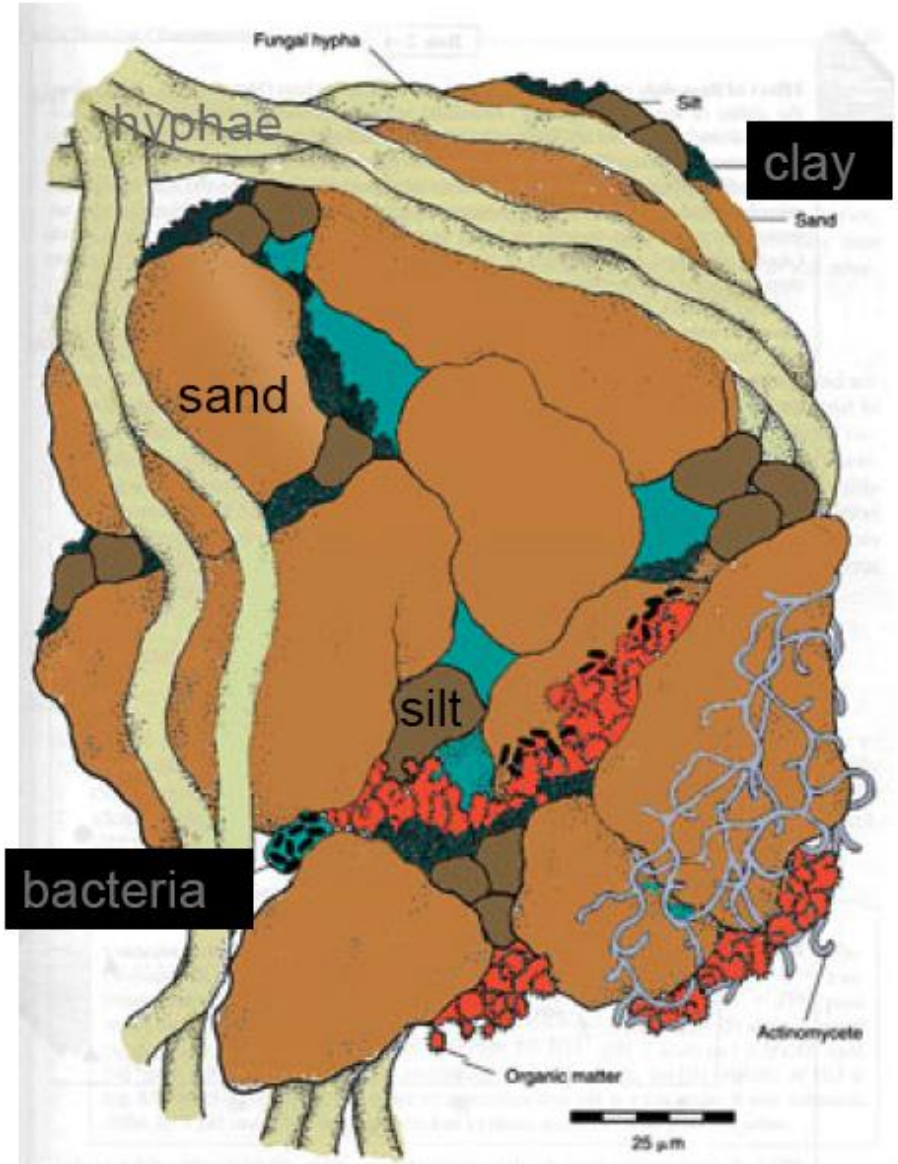
1. Structure du sol

La stabilité de l'agrégation est une mesure commune de la qualité d'un sol

- **Influencée par :**
  - Matière organique et organismes
  - Texture
  - Rotation
  - Travail du sol
- **Importante pour :**
  - Aération
  - Relations hydriques
  - Productivité

1. Structure du sol

Facteurs influençant l'agrégation et sa stabilité



Agrégats maintenus grâce à :

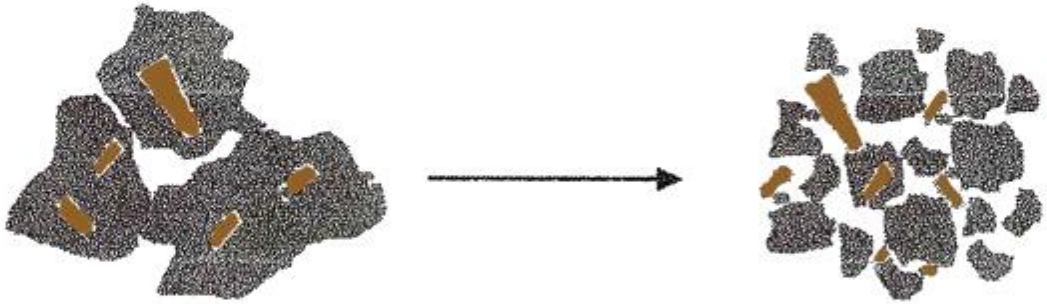
- hyphes fongiques
- « colles » bactériennes
- matière organique
- cations

1. Structure du sol

La protection physique des MOS

MO physiquement protégée
contre la biodégradation par
la matrice solide du sol

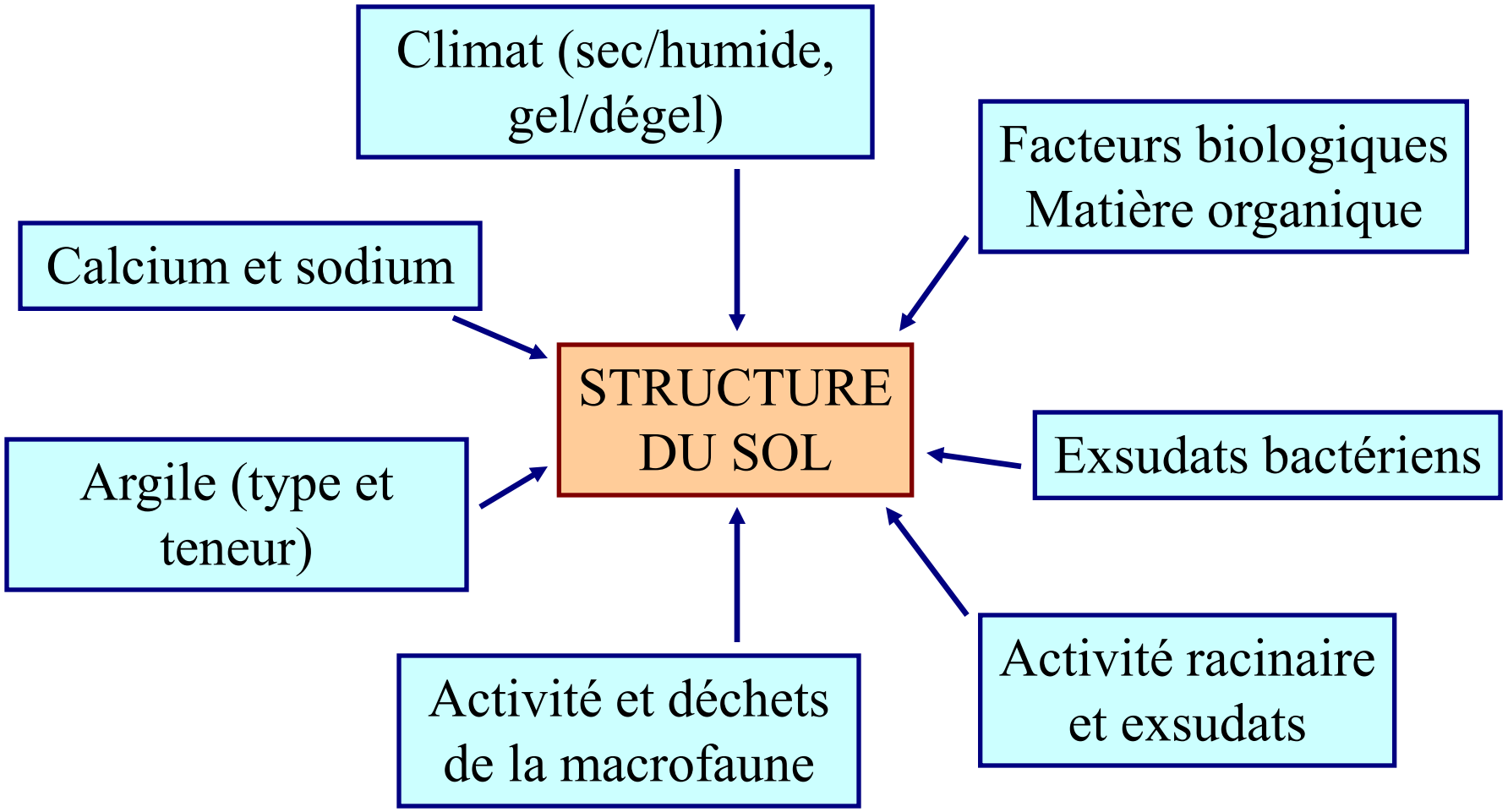
accessibilité des microorganismes
disponibilité O_2



déprotection
travail du sol, désagrégation par la pluie …

1. Structure du sol

Facteurs influençant la structure du sol



1. Structure du sol

Processus biologiques de structuration des sols

Processus directs :

Formation de pores :

- Racines, vers de terre, larves d'insectes, taupes…

Formation d'agrégats :

- Déjections de la faune : turricules de vers de terre, pelotes fécales de la microfaune

Processus indirects :

Formation de fissures et de zones compactées :

- compactage mécanique autour des racines, hyphes
- prélèvement local d'eau par les racines

1. Structure du sol

Processus biologiques de stabilisation de la structure des sols

Importance des matières organiques et de l'activité biologique dans la genèse et la stabilité de la structure

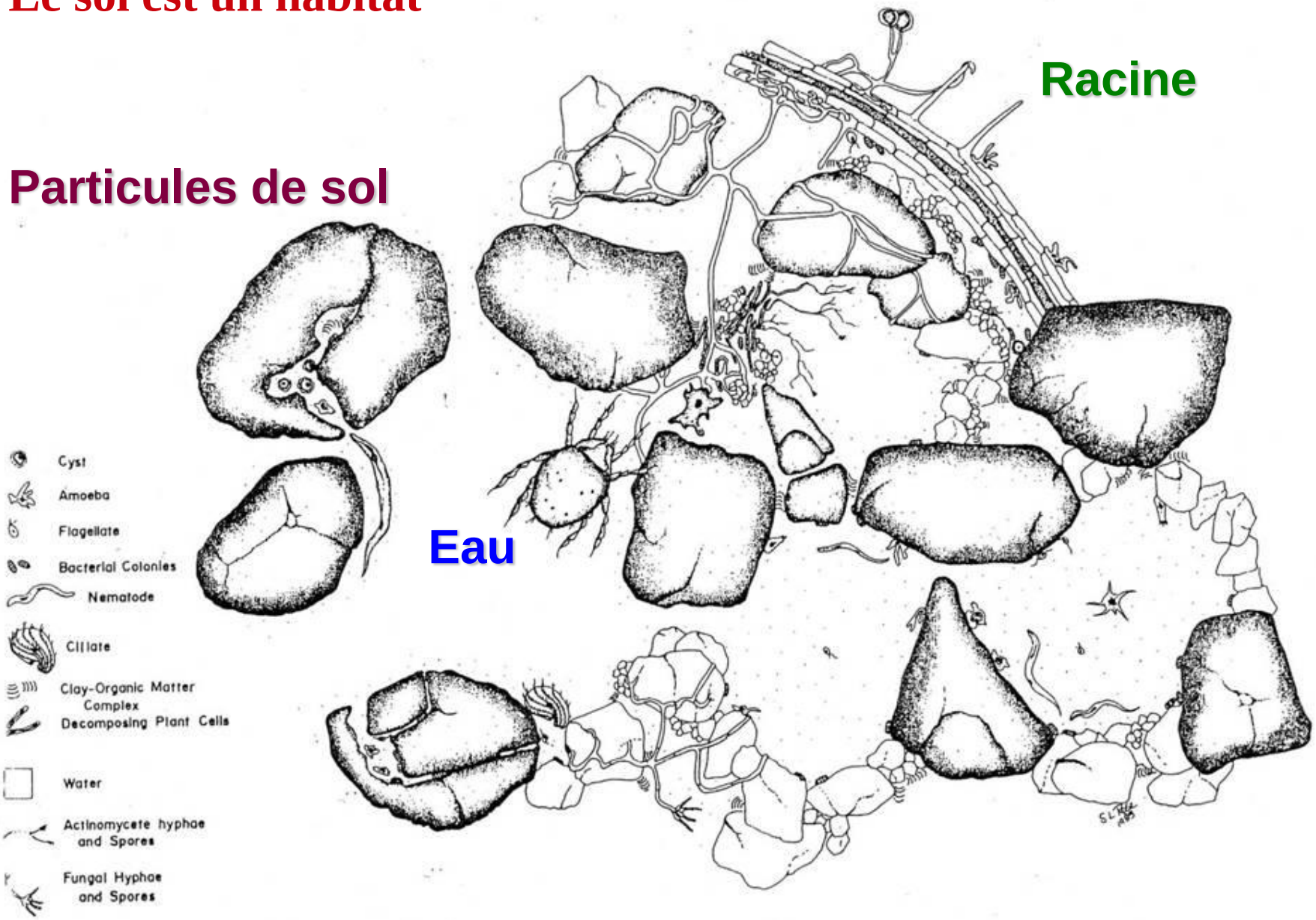
Effet d'apports organiques, de certains modes d'occupation des sols (prairies)

Corrélations :

Stabilité de la structure <----> C
Polysaccharides totaux, eau chaude
Longueur de racines
Longueur d'hyphes
Biomasse microbienne

1. Structure du sol

Le sol est un habitat



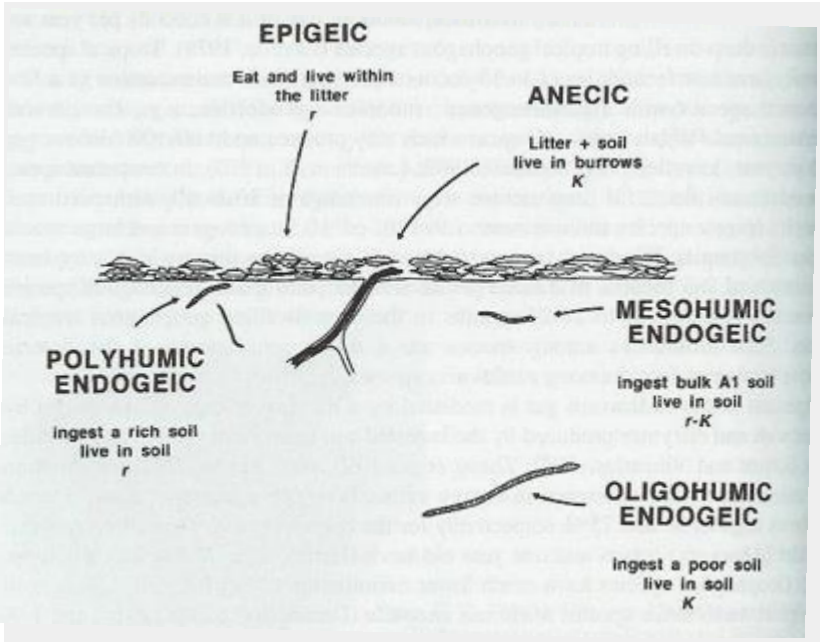
1. Structure du sol

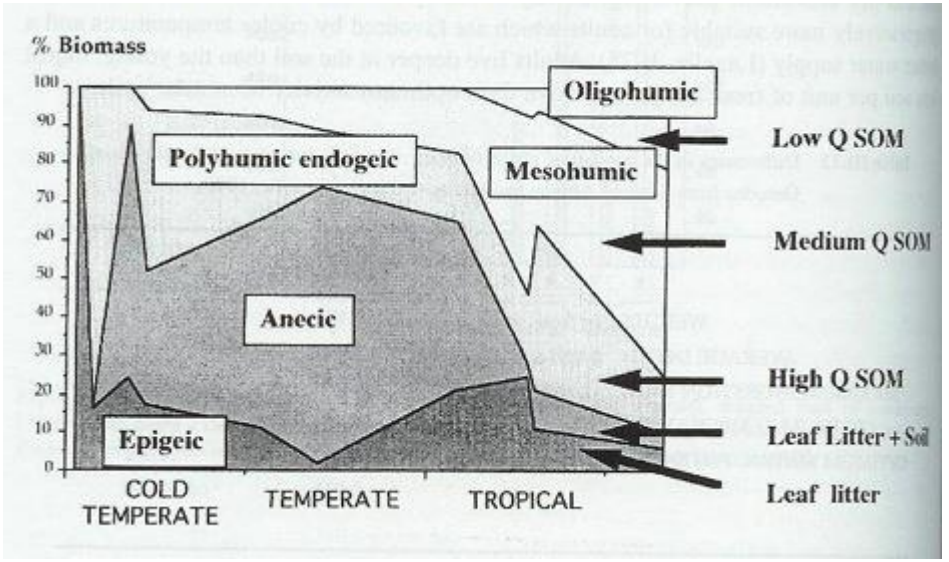
L'effet des vers de terre

1. Structure du sol

Classification des vers de terre : les catégories écologiques

Epigés
Anéciques
Endogés

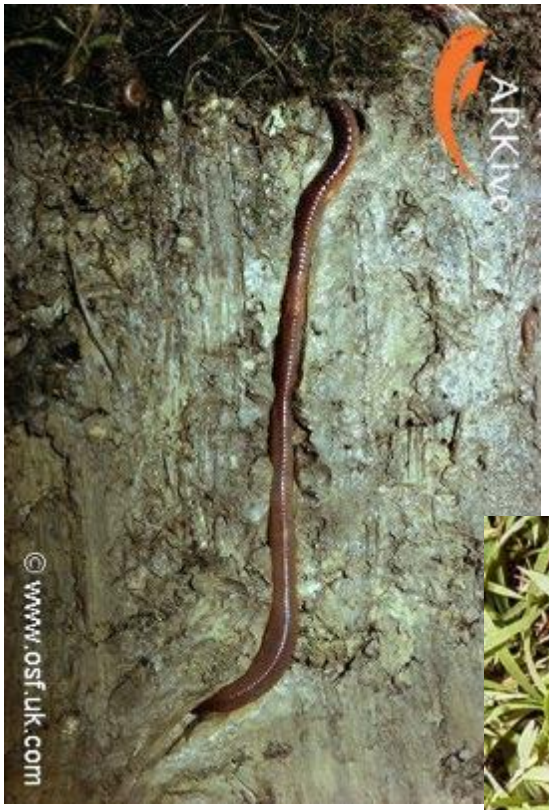




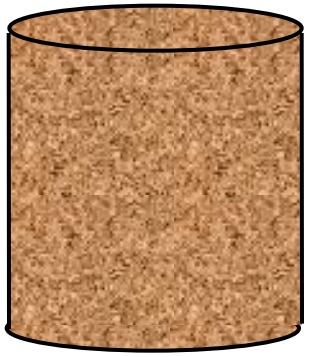
D' après Lavelle (1983)

2. Modification de la porosité

2. Modification de la porosité

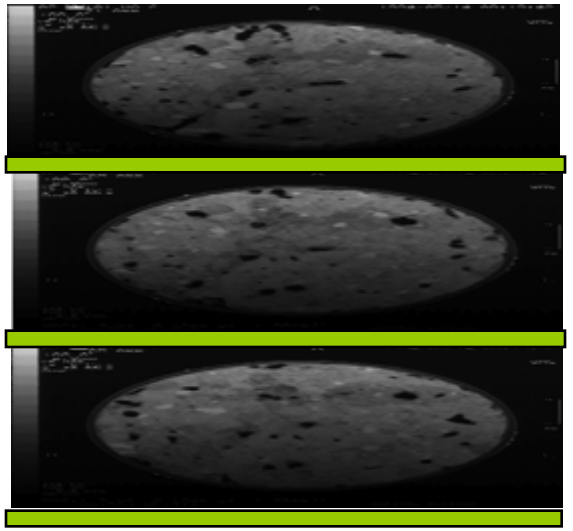


2. Modification de la porosité

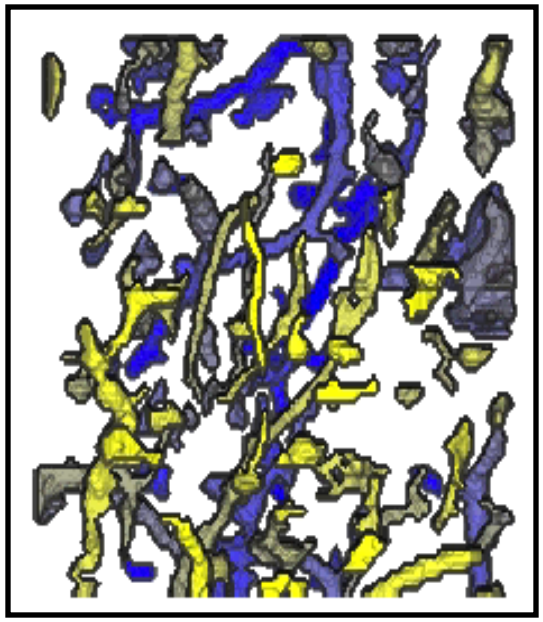


Carotte de sol
"naturelle" ou artificielle

TOMOGRAPHIE
AUX
RAYONS X



...



* algorithme de segmentation

(local et évolutif)

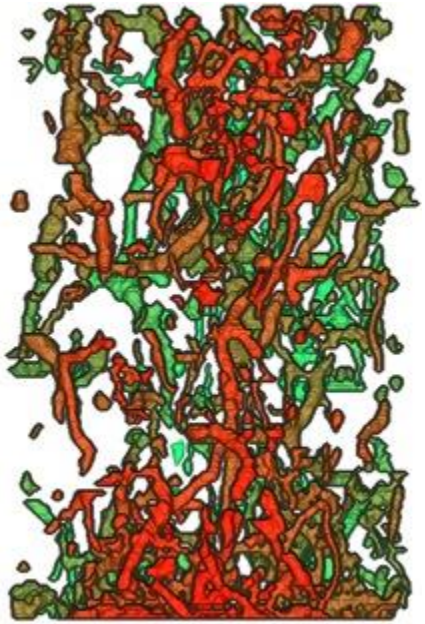
2. Modification de la porosité

Typologie des réseaux lombriciens

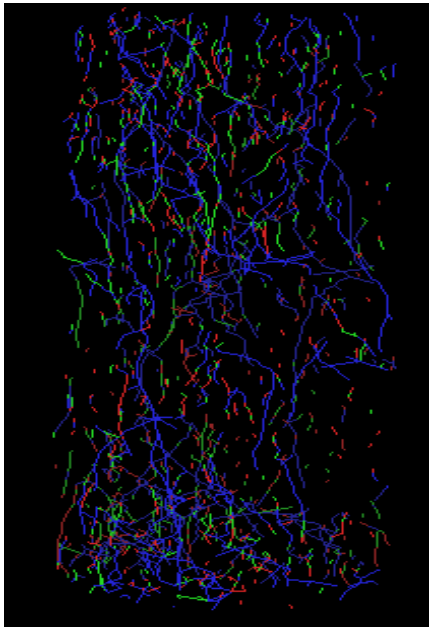
reconstitution 3D : terrain

Réseaux naturels (complexes)

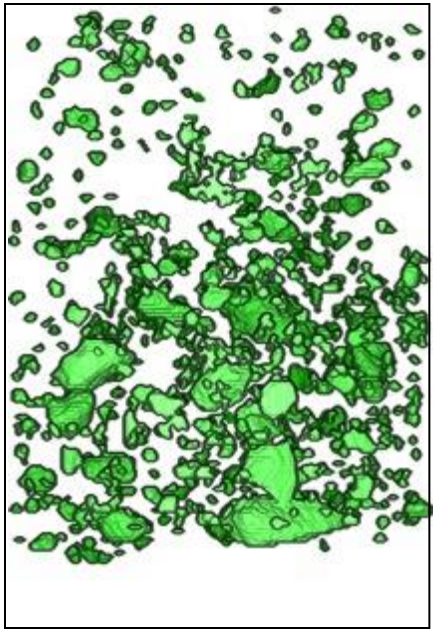
Colonne de terrain
(25 cm x 50 cm)



Reconstitution 3D
en volume



Reconstitution 3D
en squelette



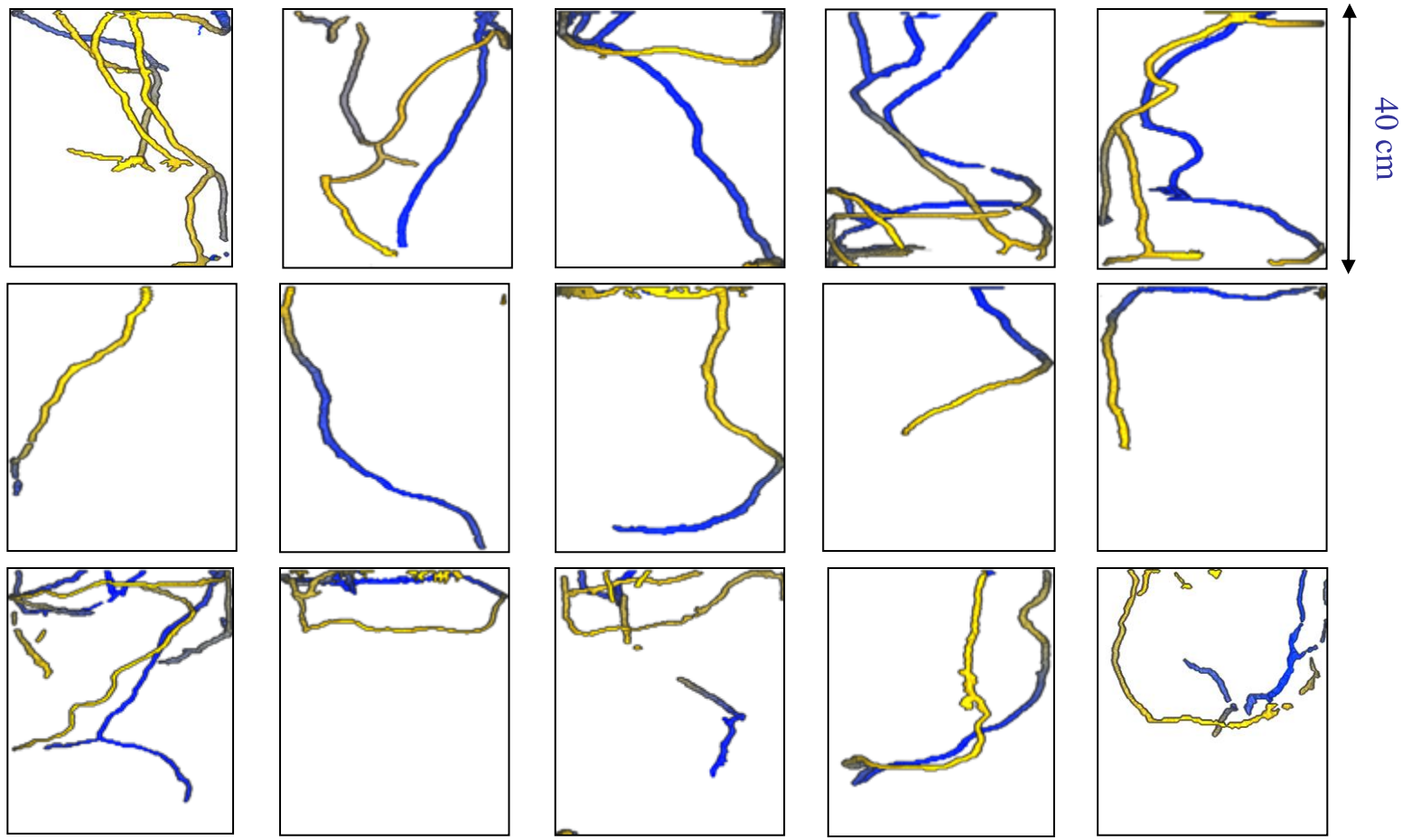
Reconstitution 3D
cailloux

2. Modification de la porosité

Typologie des réseaux lombriciens

reconstitution 3D : laboratoire

Galeries individuelles (durée = 1 mois)

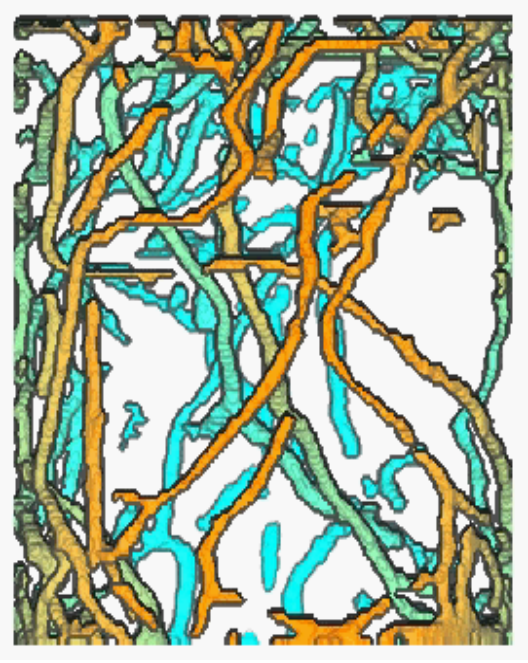


Y. Capowiez

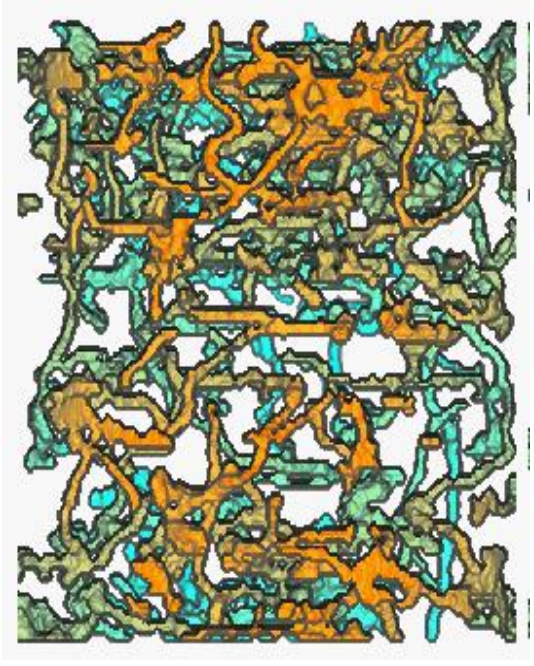
2. Modification de la porosité

Colonnes « artificielles »

A. nocturna
(2 individus ; 1 mois)



A. chlorotica
(4 individus ; 1 mois)

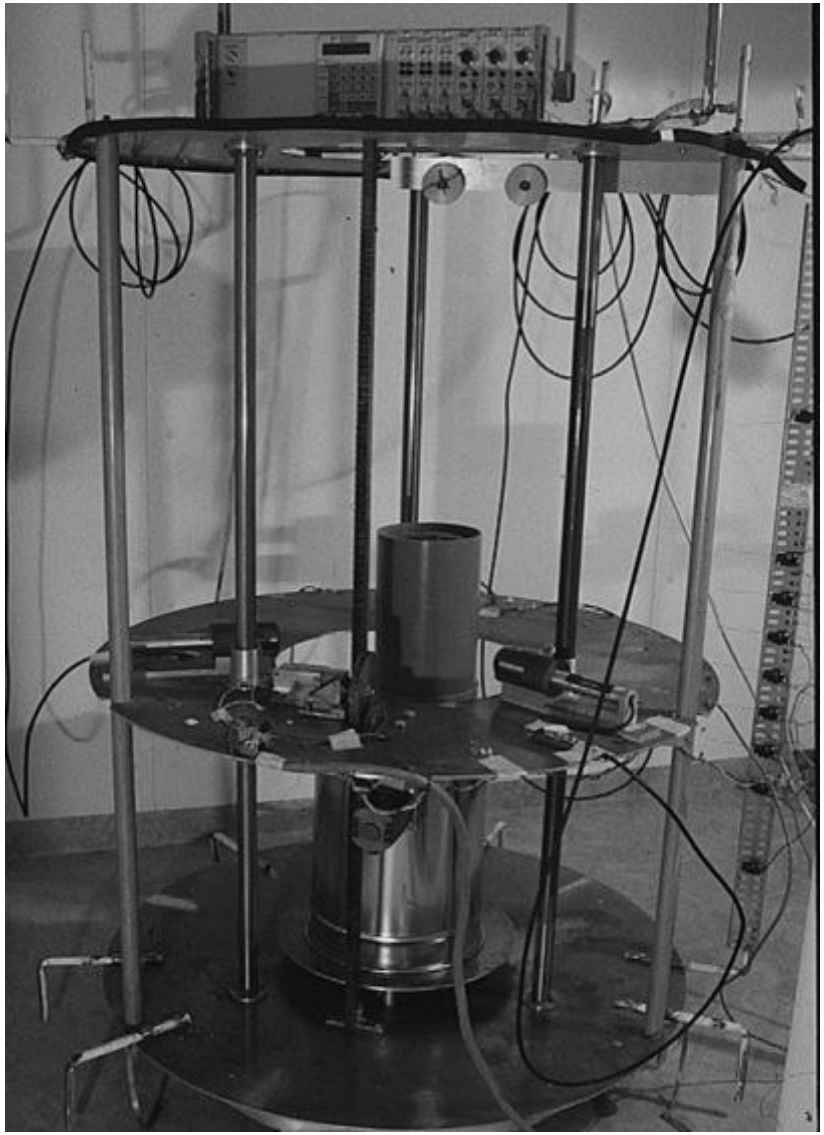


Both species
(2 chloro+ 1 nocturna)

Diamètre = 16 cm
Hauteur = 30 cm

Y. Capowiez

2. Modification de la porosité



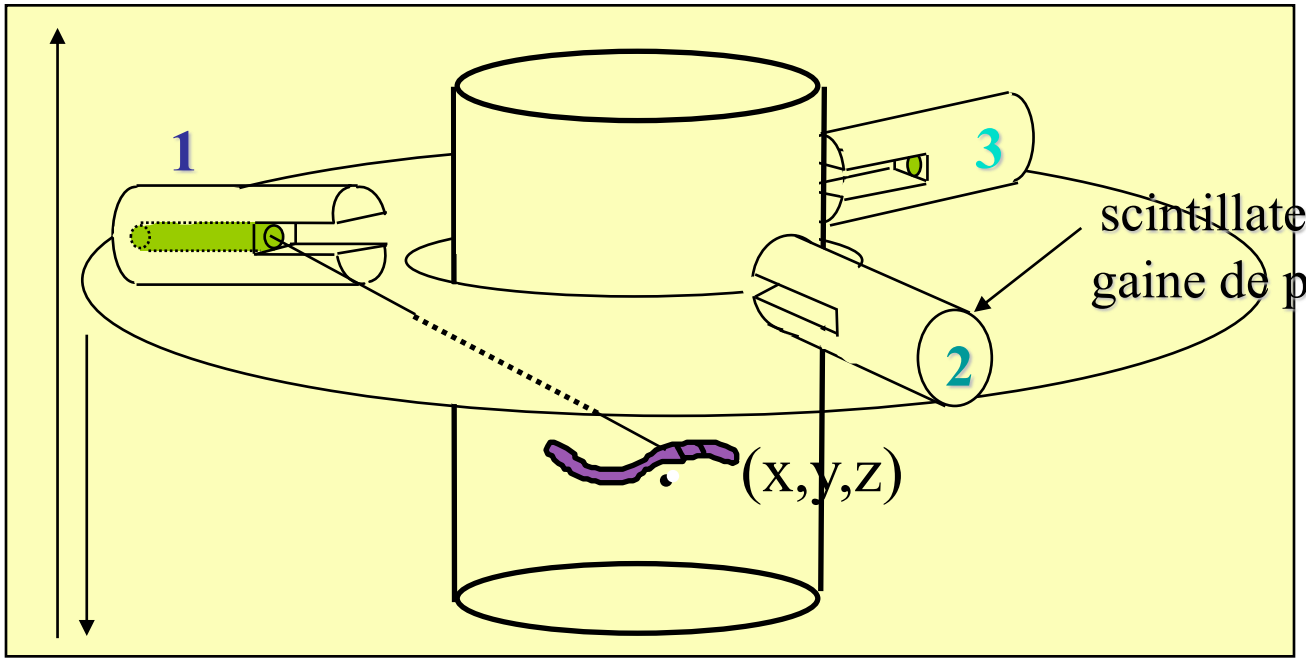
"COLONNE GAMMA"

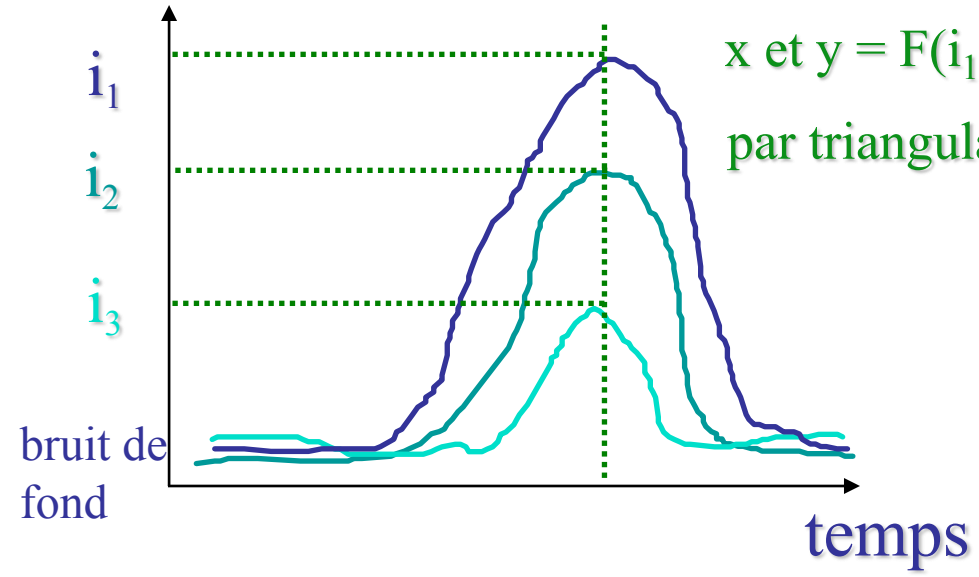
* plateau oscillant portant 3 scintillateurs

* animal marqué au ^{60}Co dans une colonne de terre

2. Modification de la porosité

Principe





x et y = F(i_1, i_2, i_3)

par triangulation

creusement et utilisation du réseau

⇩

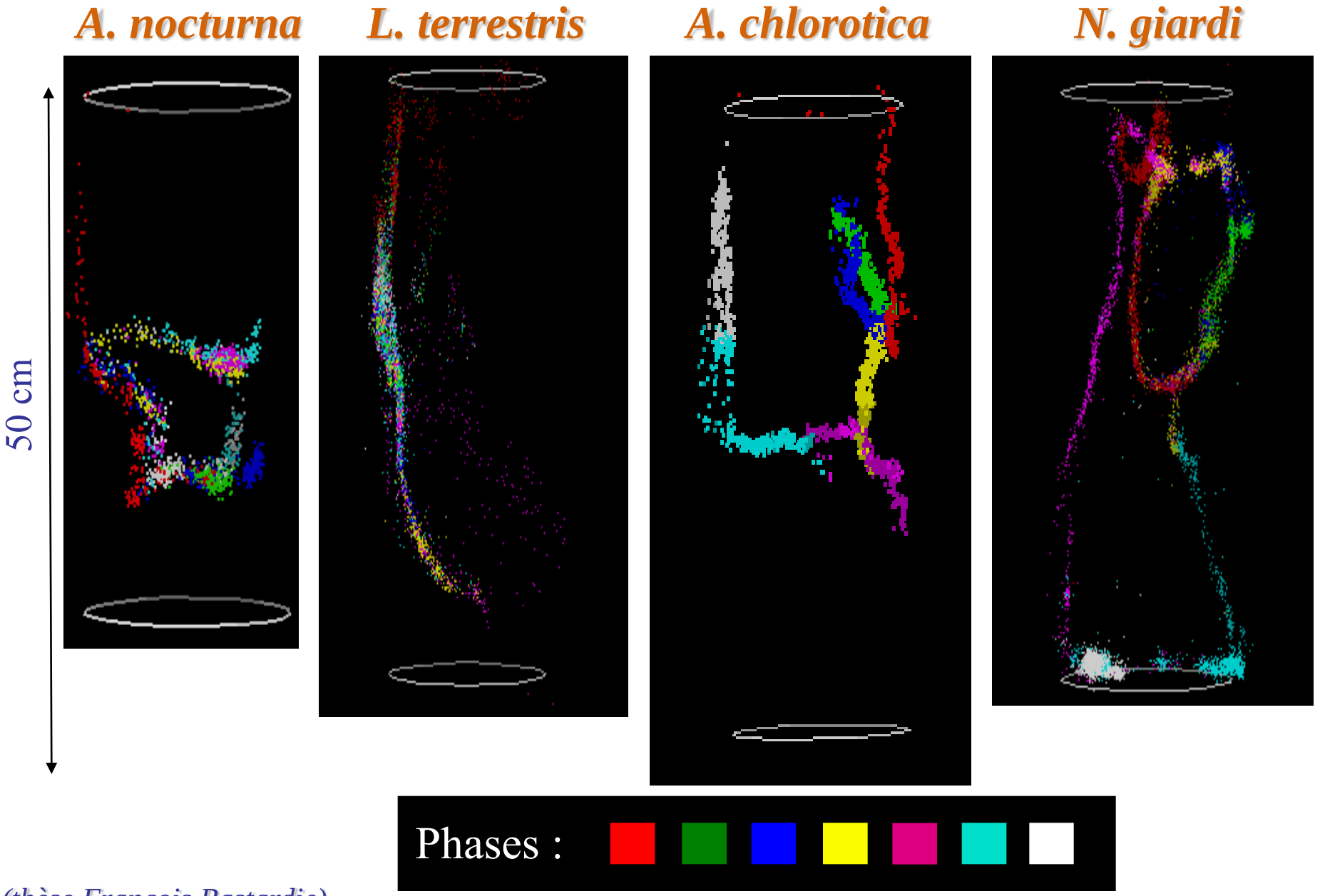
• fréquence de passage
• temps de résidence

⇩

étude dynamique des impacts

Y. Capowiez

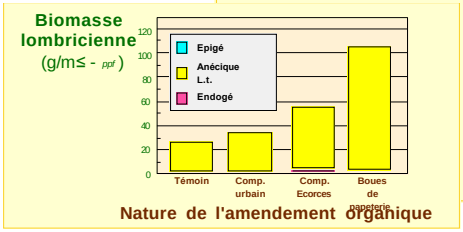
2. Modification de la porosité

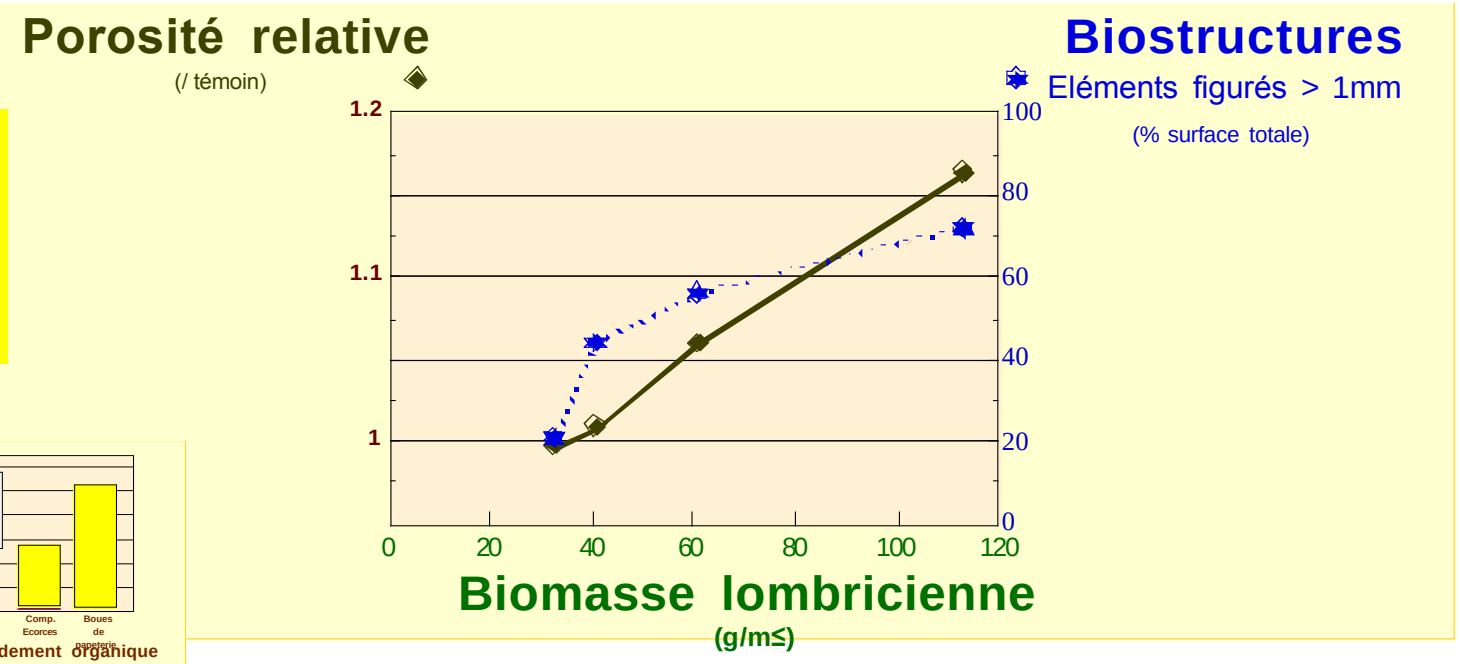


(thèse François Bastardie)

2. Modification de la porosité

Galeries





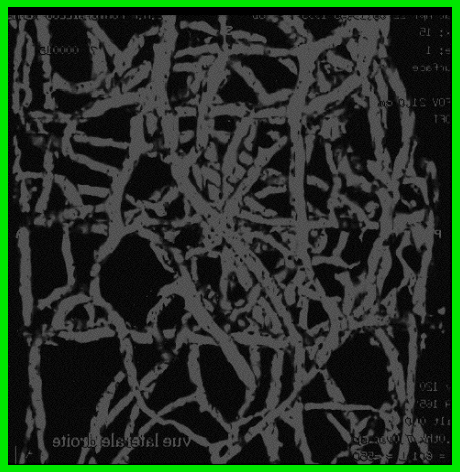
Cette augmentation de biomasse lombricienne anécique se traduit par une augmentation des activités de bioturbation, associées à la création de porosité globale et de mésoporosité d'assemblage (déjections)

Cluzeau (2005)

2. Modification de la porosité

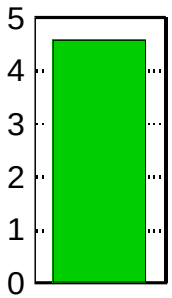
Galeries

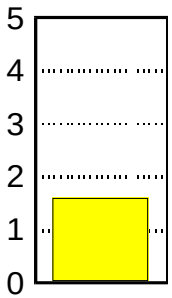
N. giardi



(longueur totale x4)
(Nb galeries x3)
(Nb Ramification x 0.33)

Volume / volume total de la colonne en %)





L. terrestris

Verticales et horizontales

Orientation des galeries

Verticales

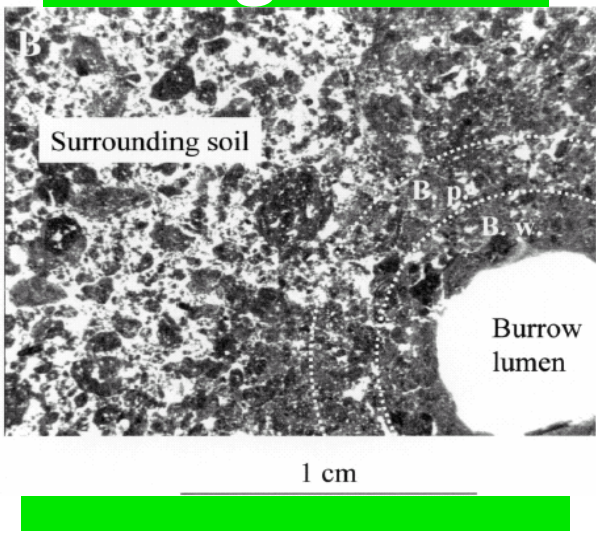
Cluzeau (2005)

Mesures par tomographie (scanner à rayons X)

2. Modification de la porosité

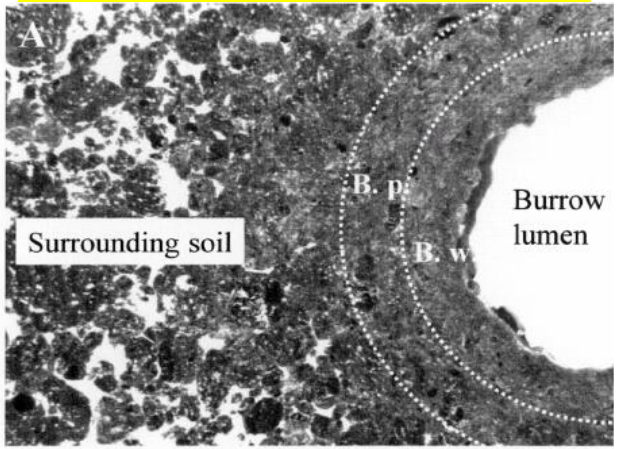
Galeries

N. giardi



Faible cutane
et malgré une compression à la création,
pas de diminution de la porosité des parois

L. terrestris



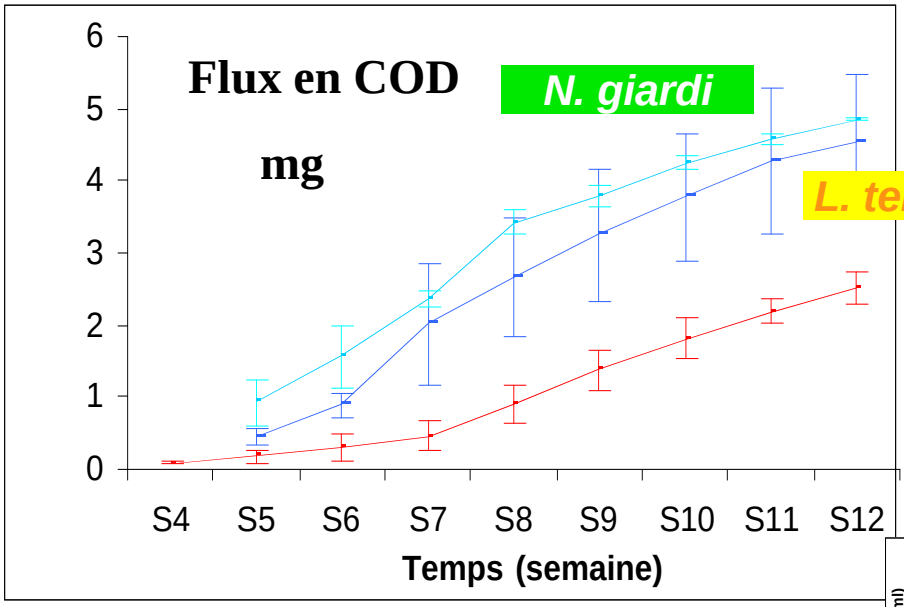
Formation d'épaisses cutanes,
entraînant une diminution
de la porosité des parois

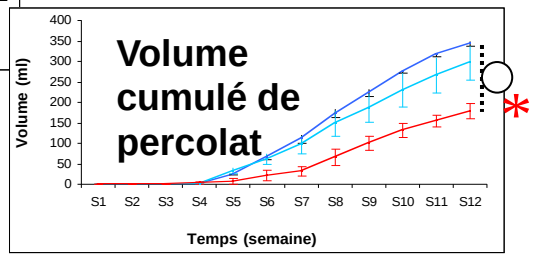
Cluzeau (2005)

2. Modification de la porosité

Galeries

Conséquences sur la circulation de Carbone Organique Dissous (galeries d'anéciques)



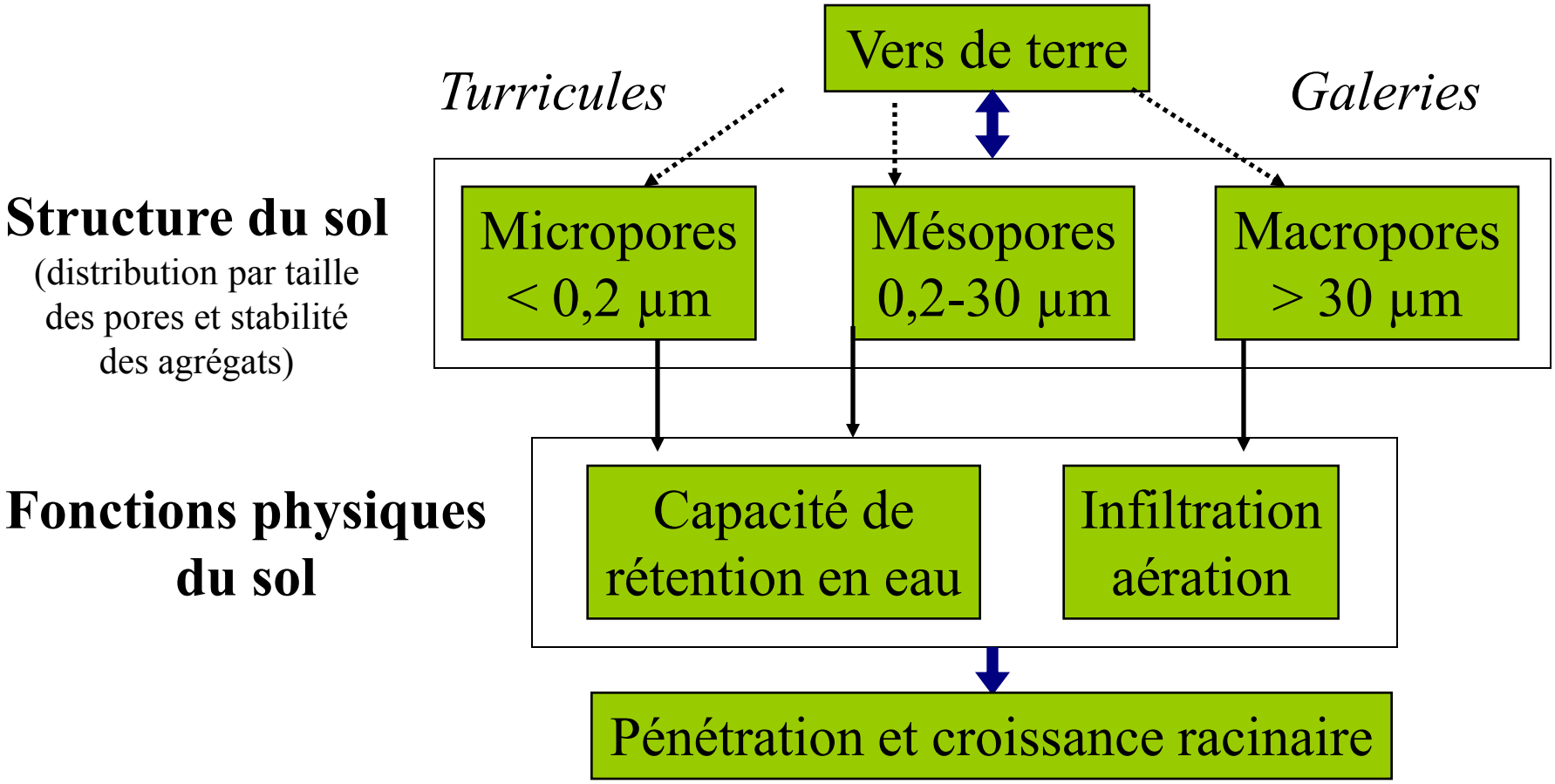


Flux de COD : 2 fois plus importants en présence des 2 espèces

Cluzeau (2005)

2. Modification de la porosité

Effets des vers de terre sur les propriétés du sol

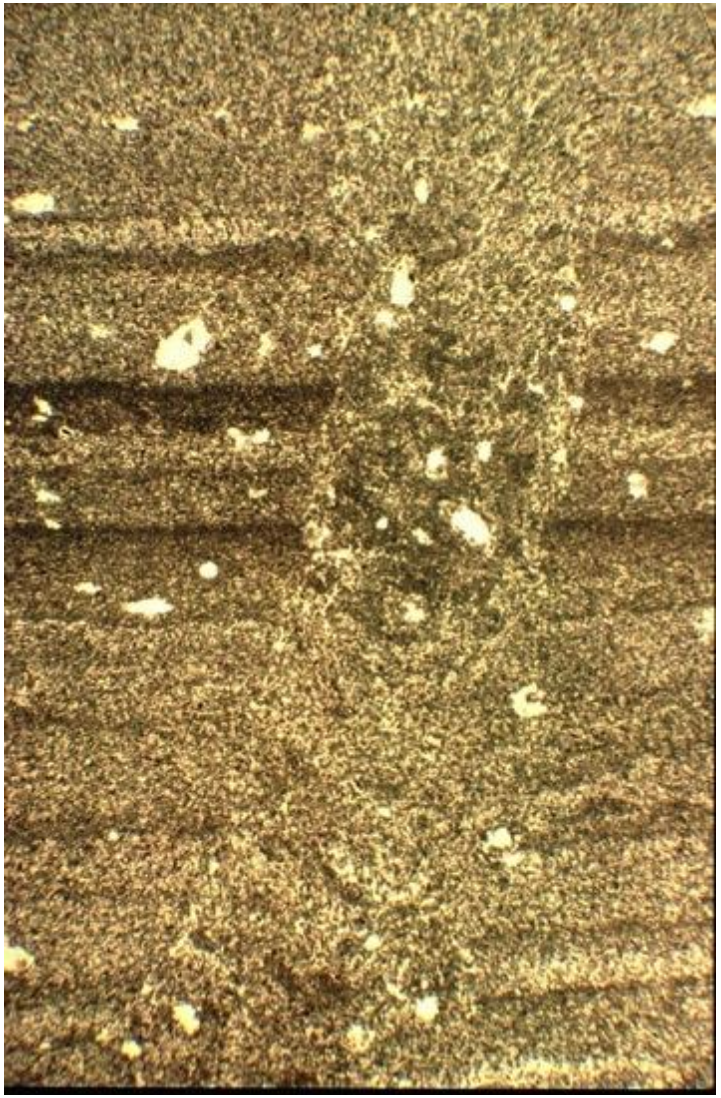


3. Modification de l’agrégation

3. Modification de l’agrégation

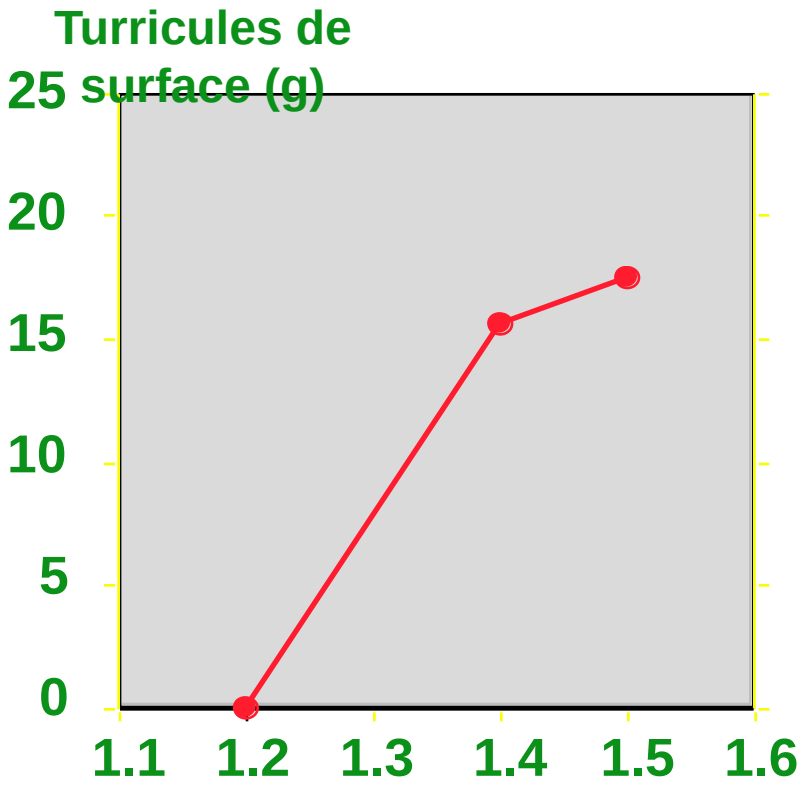
Facteurs influençant la structure du sol

Pédotubule recoupant une structure sédimentaire

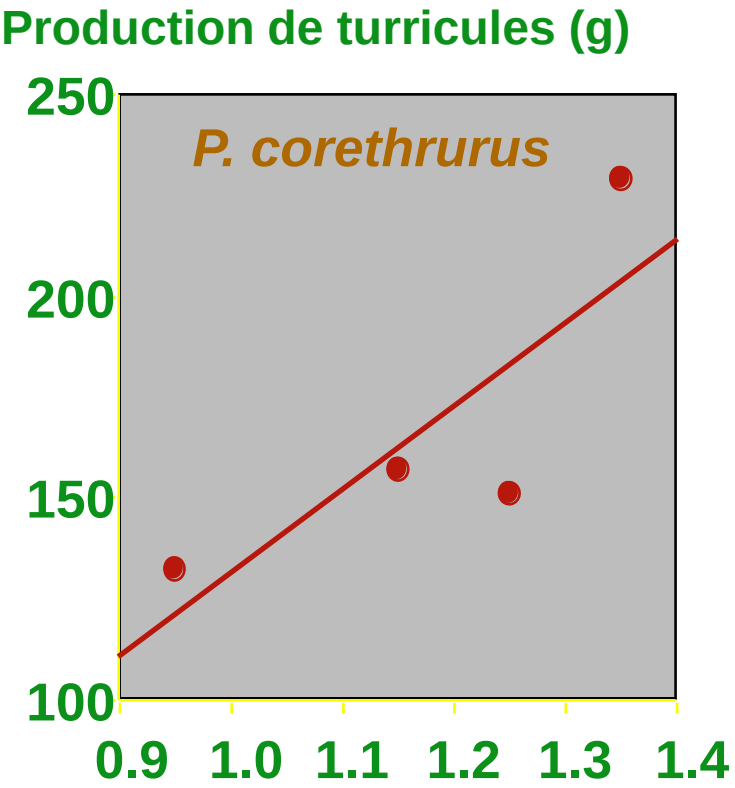


3. Modification de l'agrégation

Effet de la densité apparente sur la production de turricules



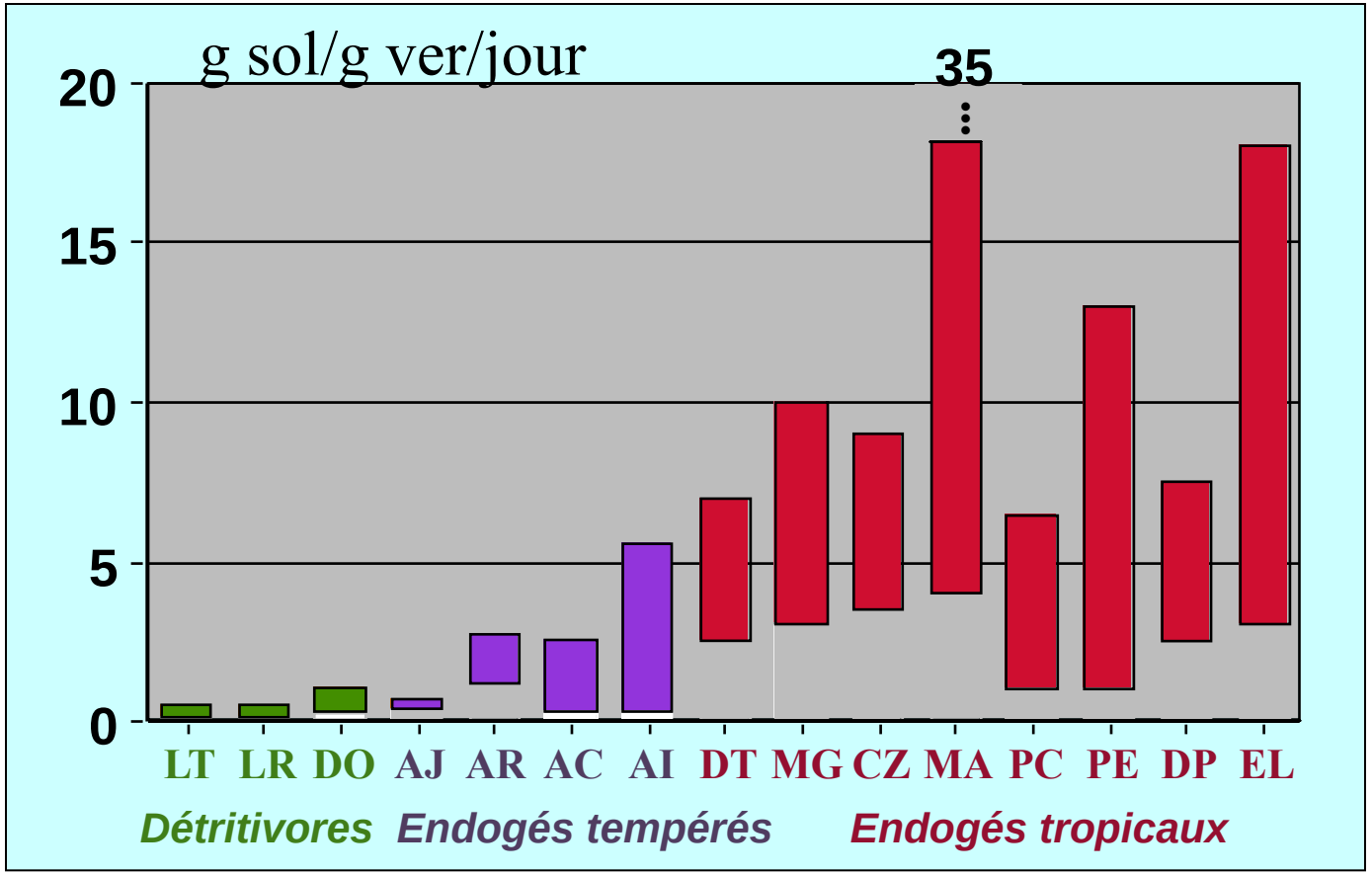
(Schrader et al., 1995)



(Zund et al., 1997)

3. Modification de l'agrégation

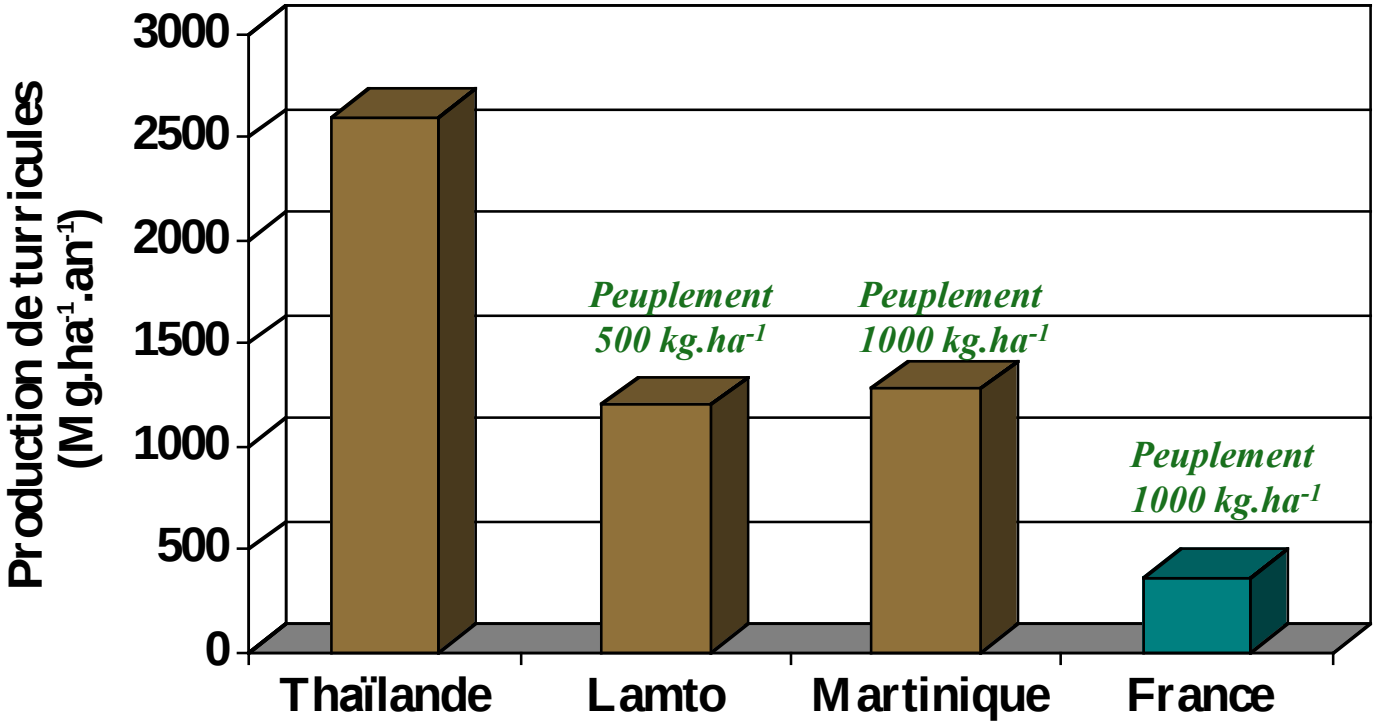
Production de turricules : individus



Les vers de terre consomment et rejettent de grandes quantités de sol

3. Modification de l'agrégation

Production de turricules : peuplements



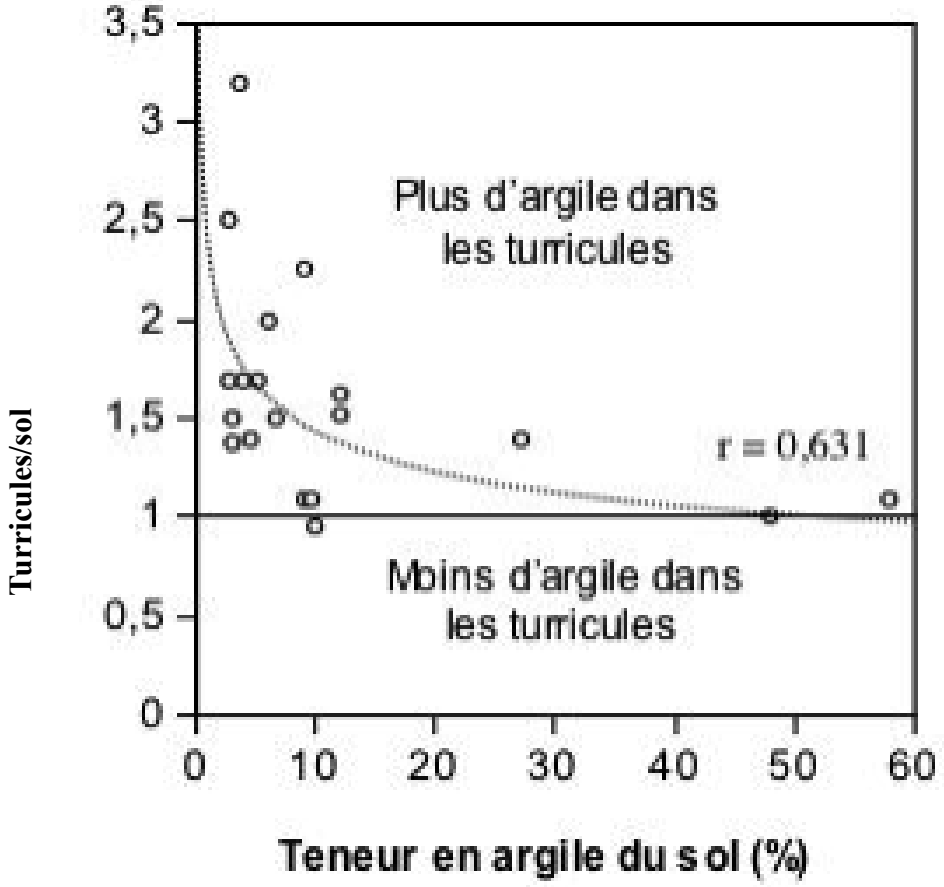
Watanabe & Ruaysoongnern, 1984 ; Lavelle, 1978 ; Blanchart et al., 1999 ; Bouché & Al Addan, 1997

8 à 10 cm de sol passent chaque année par le tube digestif des vers de terre

3. Modification de l'agrégation

Propriétés des turricules

texture plus fine

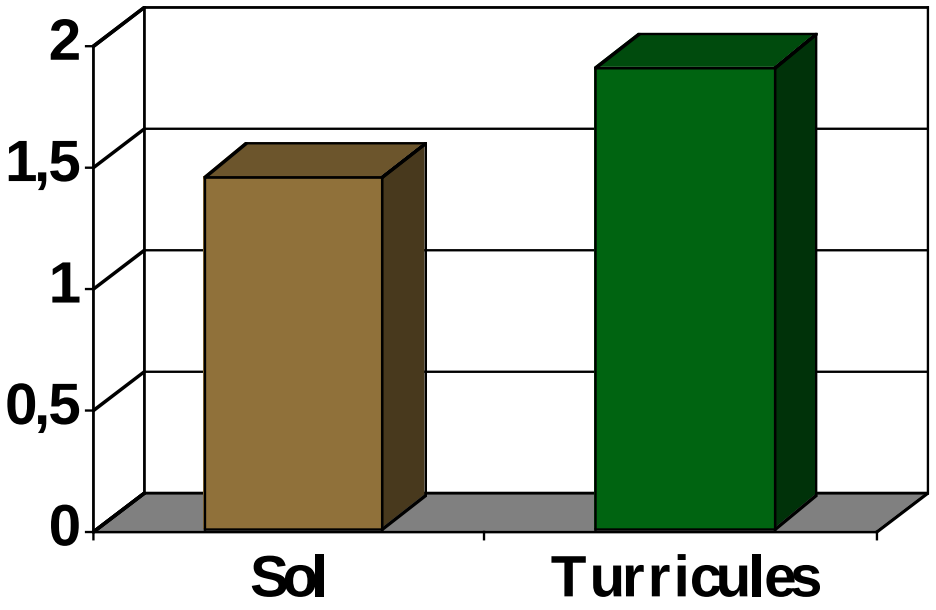


Barois et al., 1999

3. Modification de l'agrégation

Propriétés des turricules

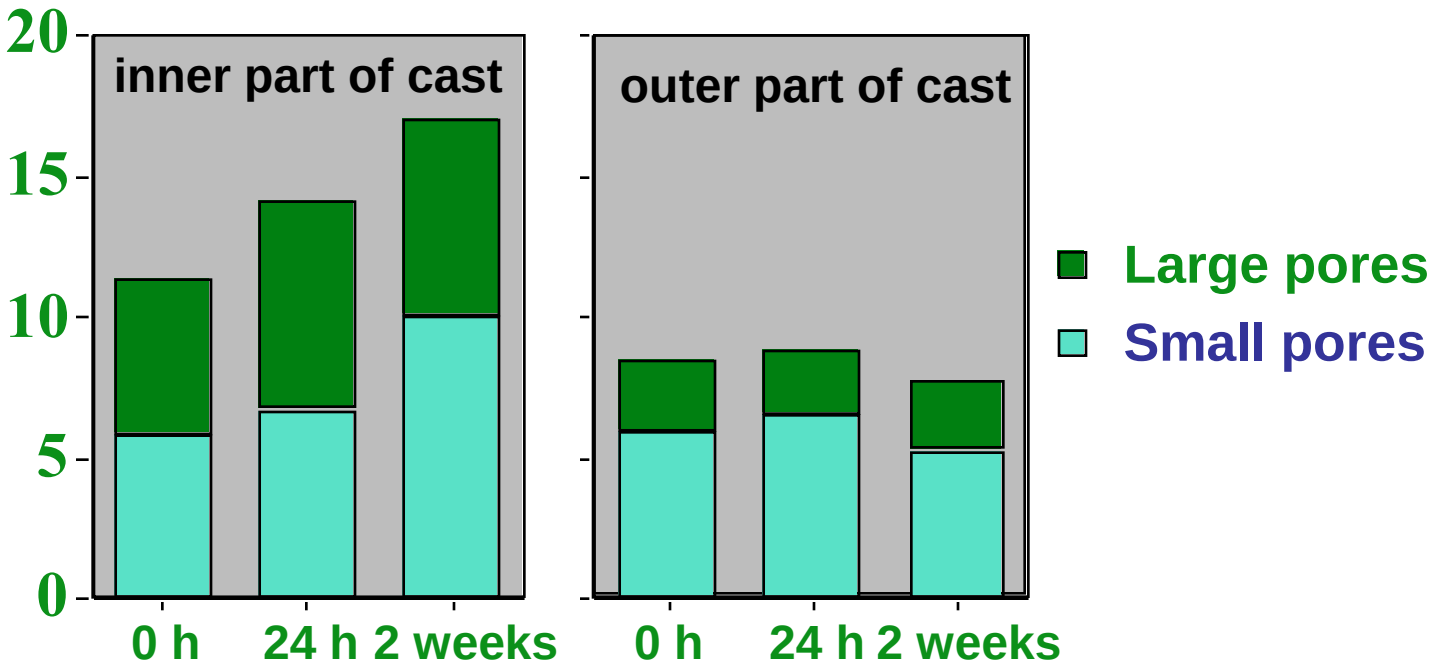
structure plus compacte



3. Modification de l'agrégation

Propriétés des turricules

Soil thin section surface (%)



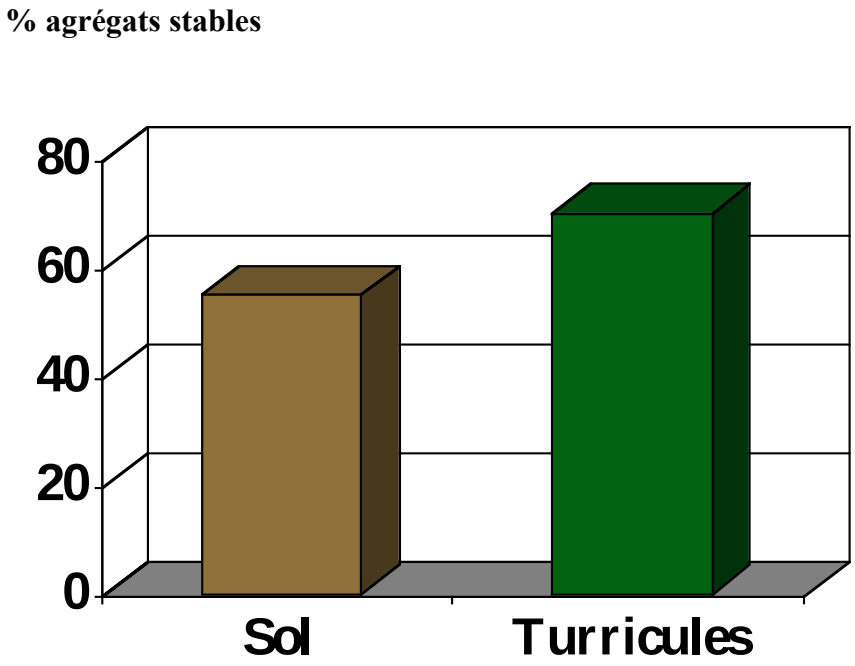
Age des turricules (séchés à l'air)

(Duboisset, 1995)

3. Modification de l'agrégation

Propriétés des turricules

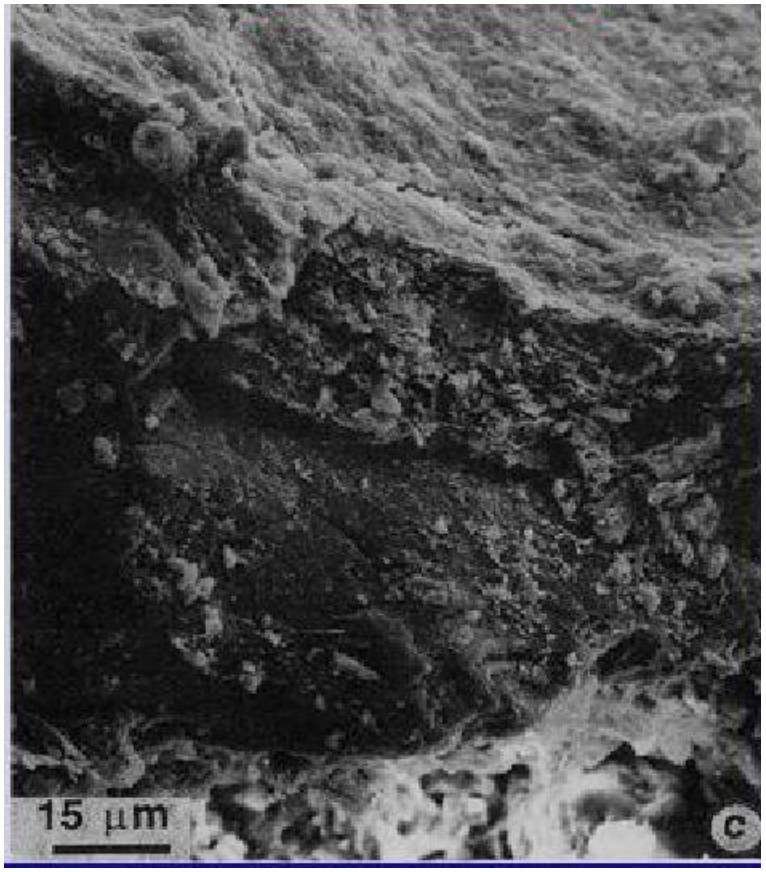
stabilité plus élevée



3. Modification de l'agrégation

Propriétés des turricules

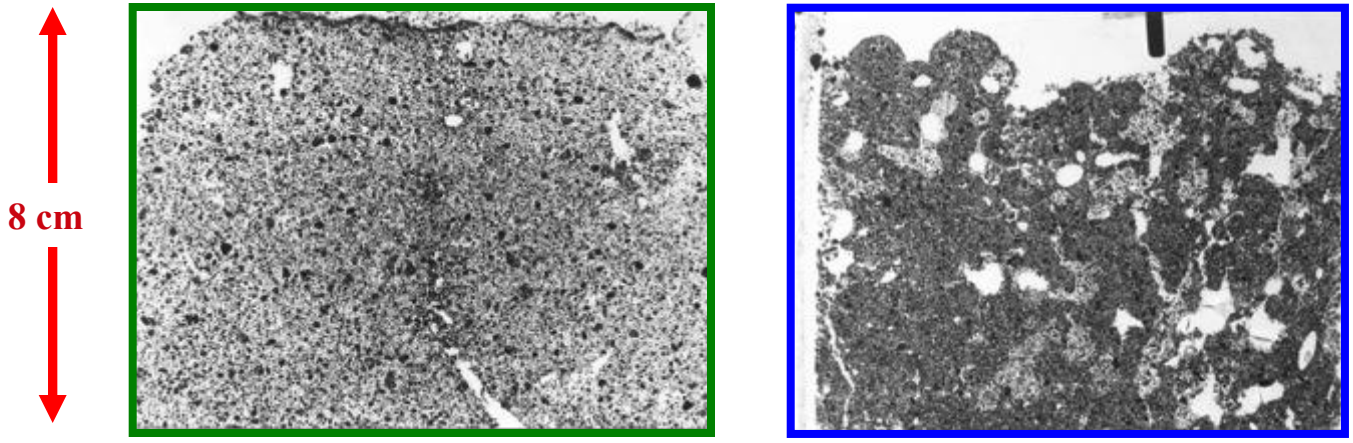
présence d'un cortex



3. Modification de l'agrégation

Formation de la structure du sol

Sols à argile 1:1



Sans vers de terre

Avec grands vers de terre

30 mois d'expérience

Blanchart, 1992

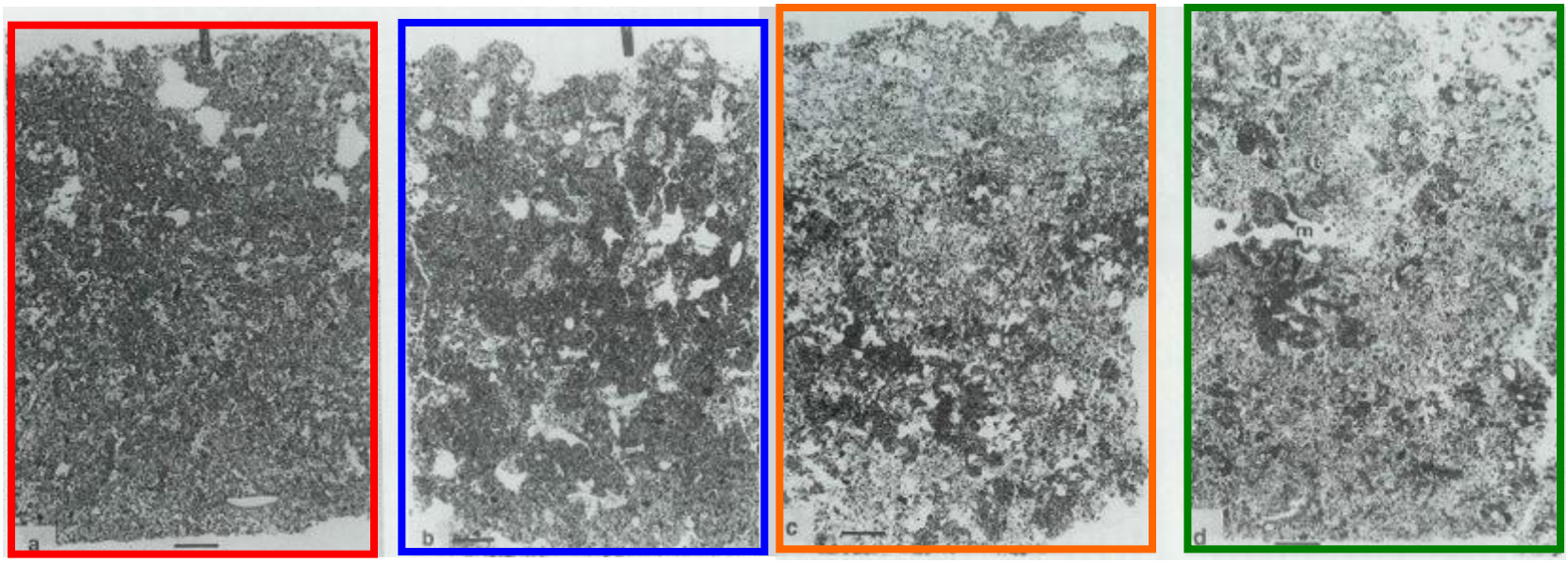
Les vers de terre sont responsables de la formation de la structure des sols observée

3. Modification de l'agrégation

Conservation de la structure du sol

Sols à argile 1:1

12 cm



Faune du sol | Millsonia anomala | Eudrilidae | Sans vers de terre

28 mois d'expérience

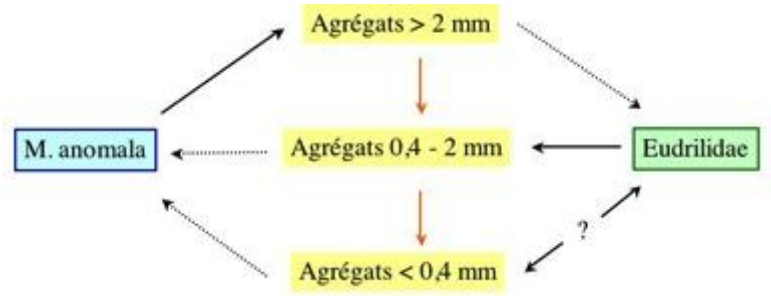
Blanchart et al, 1997

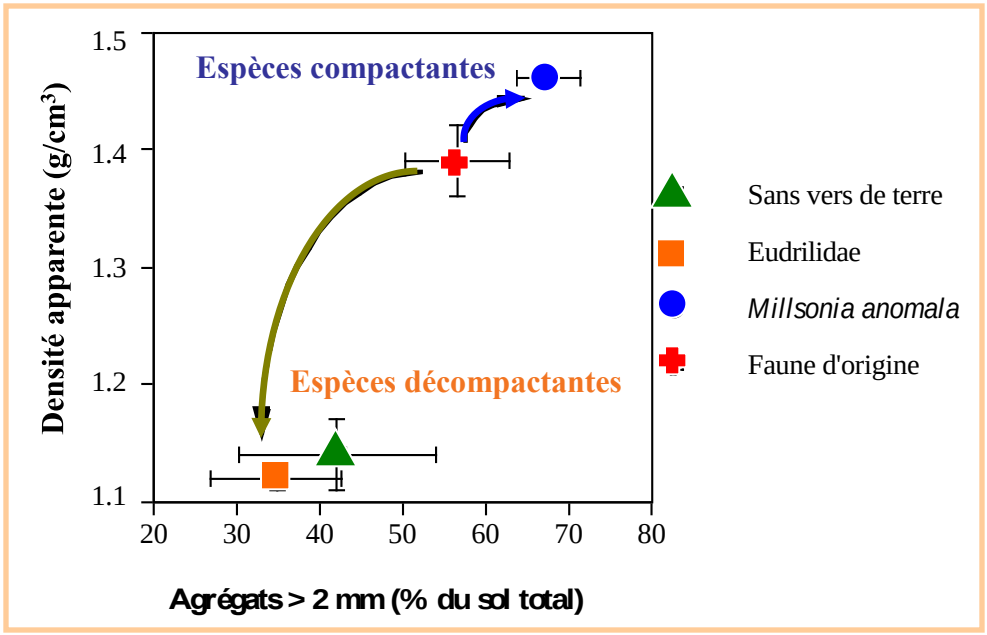
Les vers de terre sont responsables du maintien de la structure des sols observée (agrégation, porosité, stabilité)

3. Modification de l'agrégation

Conservation de la structure du sol

Sols à argile 1:1





→ **Groupes fonctionnels de vers de terre**

Blanchart et al., 1997

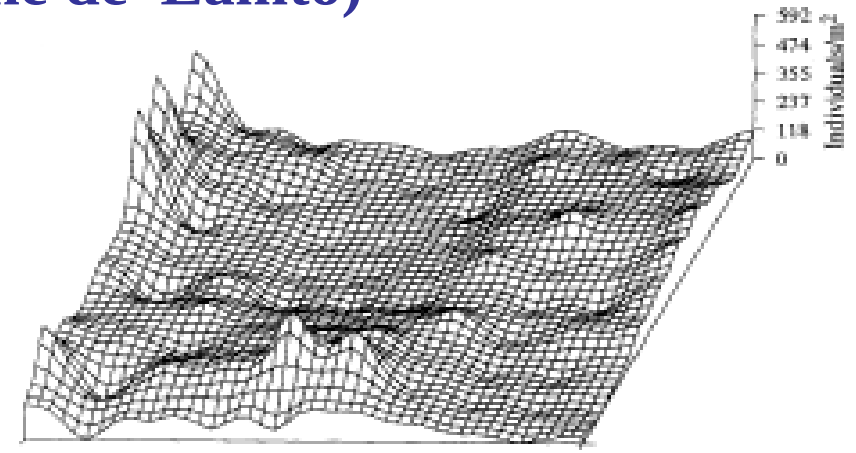
La conservation de la structure du sol est le résultat d'actions antagonistes entre les organismes compactants et les organismes décompactants

3. Modification de l'agrégation

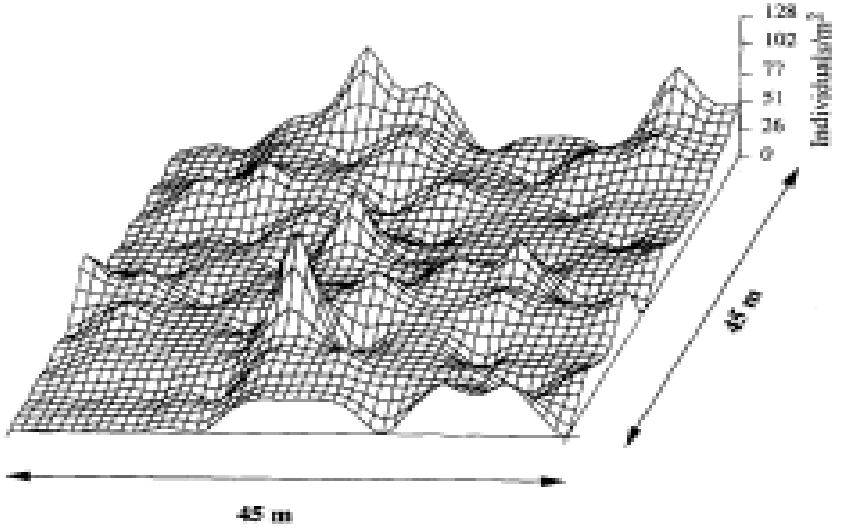
Distribution spatiale des compactants et des décompactants

Zones de fortes densités (savane de Lamto)

Densité du ver de terre décompactant *Chuniodrilus zielae*



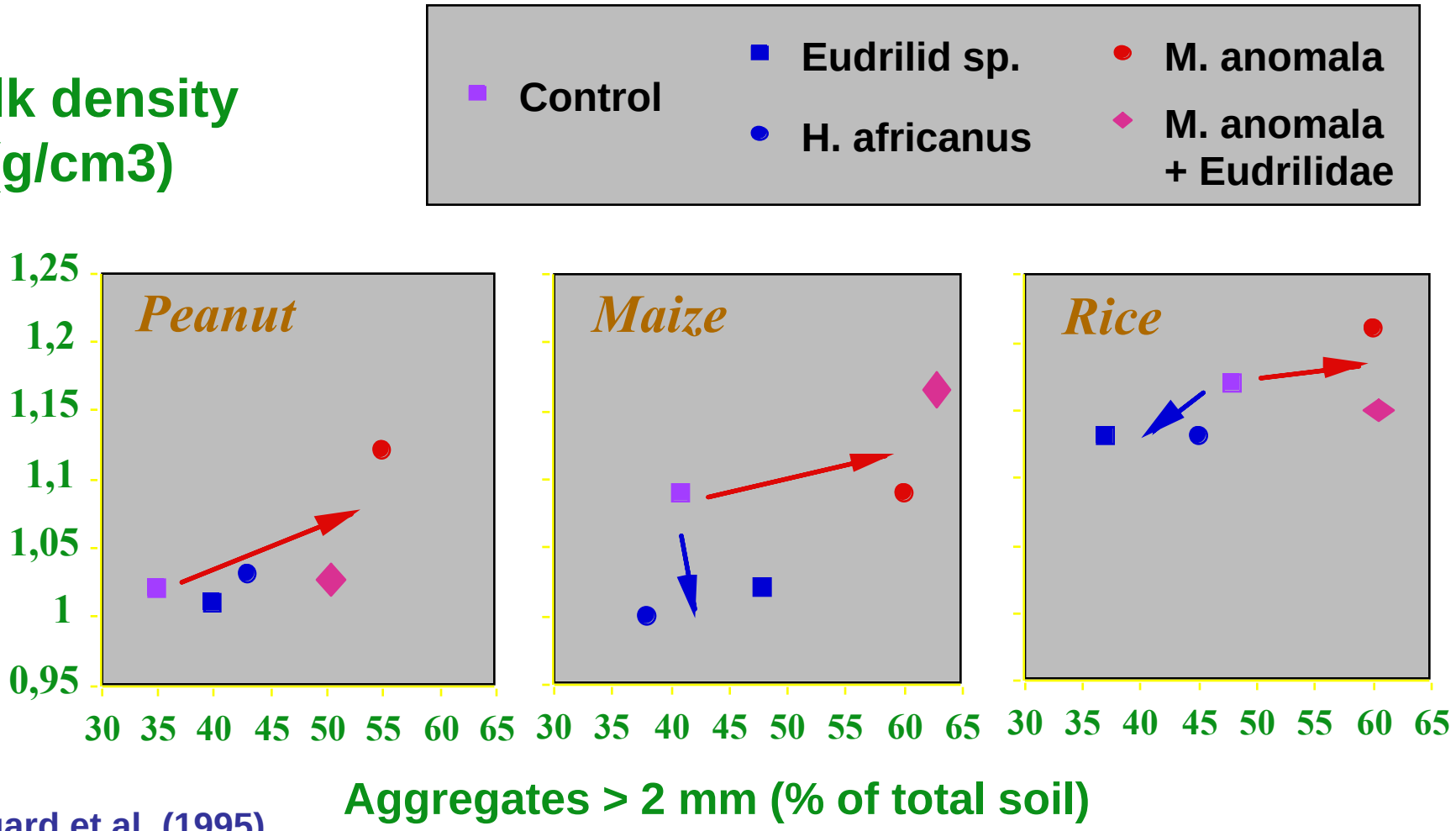
Densité du ver de terre compactant *Millsonia anomala*



Rossi & Lavelle, 1998

3. Modification de l'agrégation

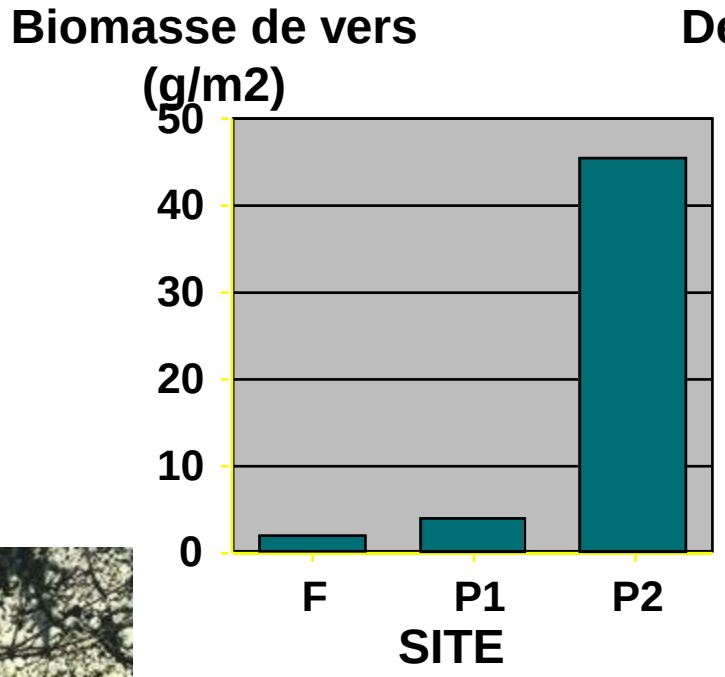
Effets compactants / décompactants
Lamto (Côte d'Ivoire) - Expérience en pots

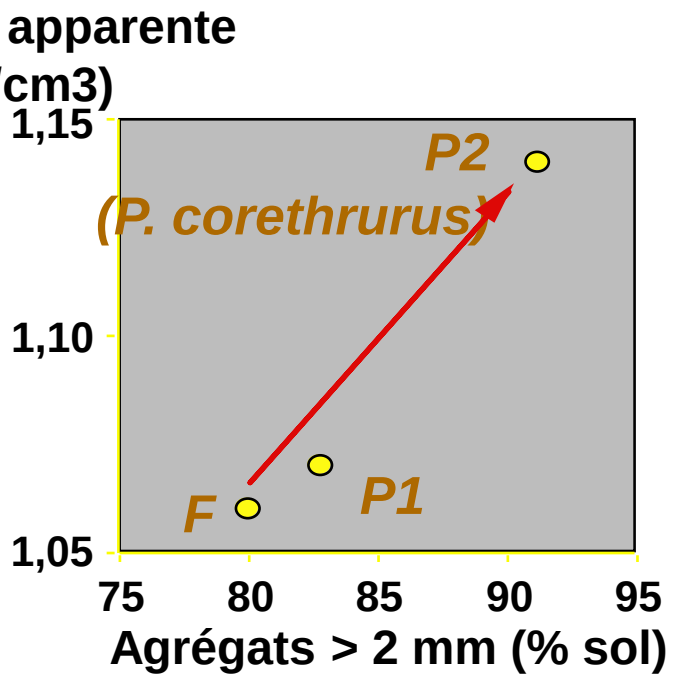


Derouard et al. (1995)

3. Modification de l'agrégation

Problèmes liés au développement des compactants





Croûte continue de turricules
Hydromorphie, émission de CH_4

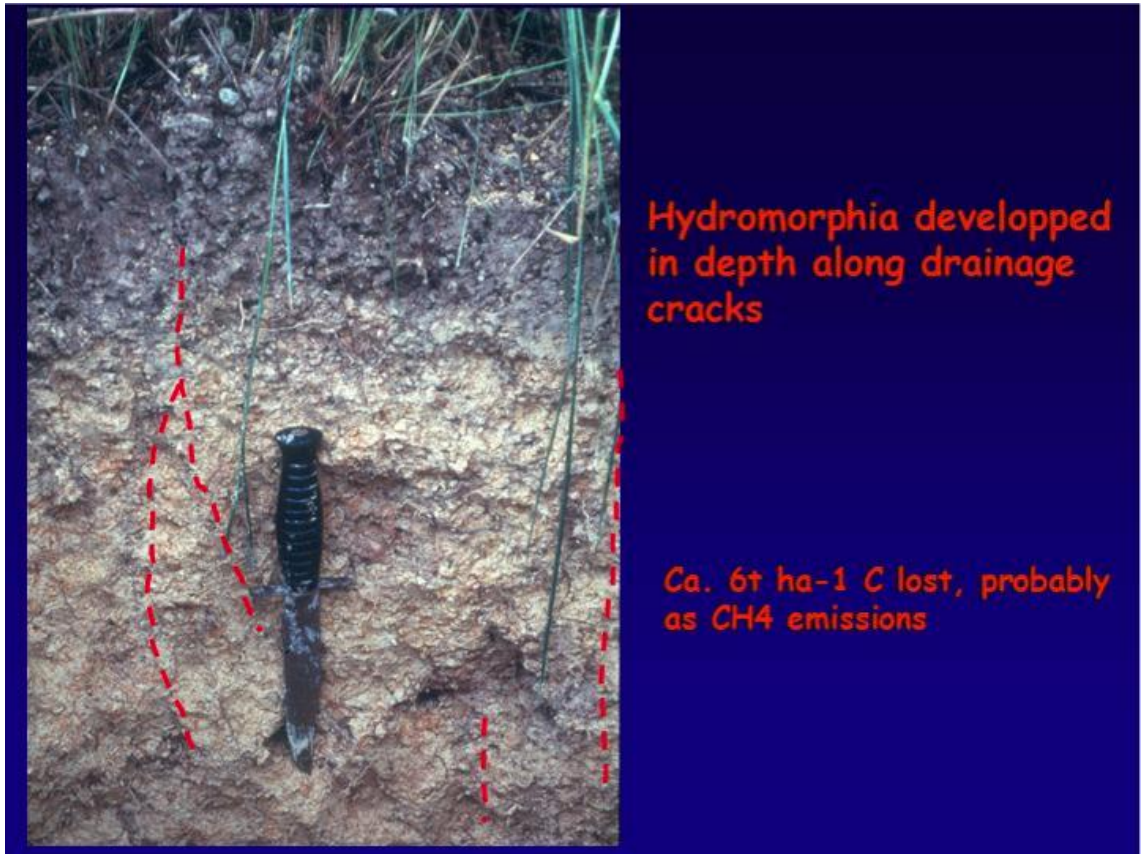
- « Accidents de biodiversité »

Déséquilibre dans la diversité fonctionnelle

Chauvel et al., 1999 ; Barros et al., 2001 ; 2004

3. Modification de l'agrégation

Problèmes liés au développement des compactants

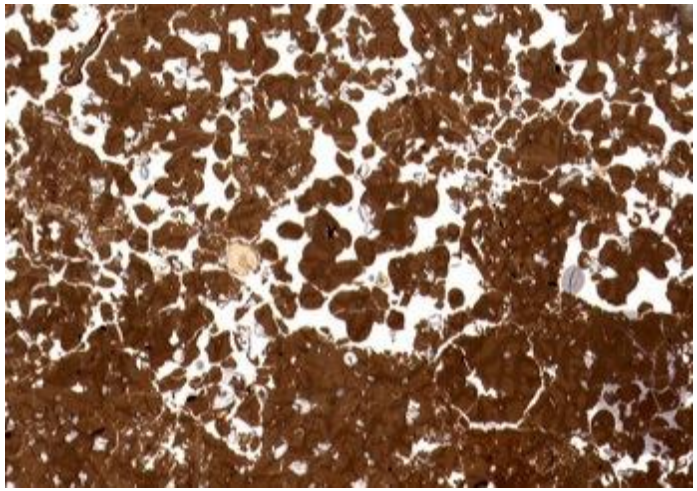


Espèce compactante (P. corethrurus)

Chauvel et al., 1999 ; Barros et al., 2001 ; 2004

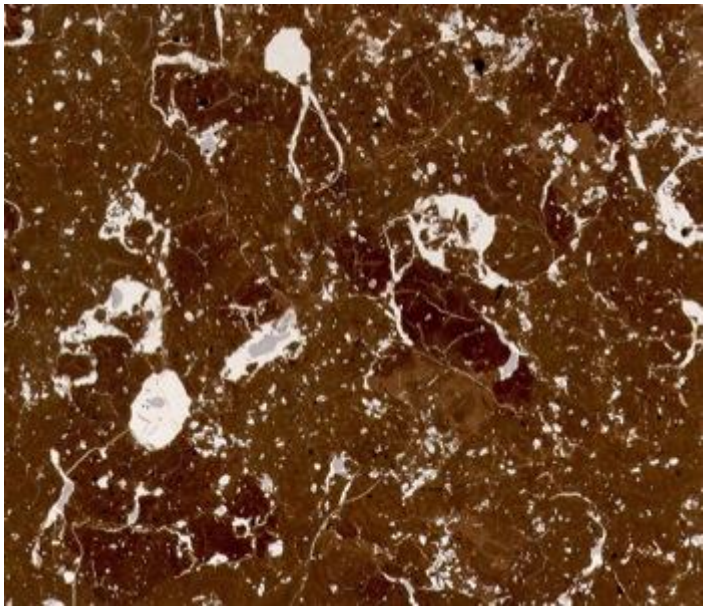
3. Modification de l'agrégation

Problèmes liés au développement des compactants



Turricules de vers de terre sous forêt

L=2,52 cm ; lame mince scannée, lumière transmise

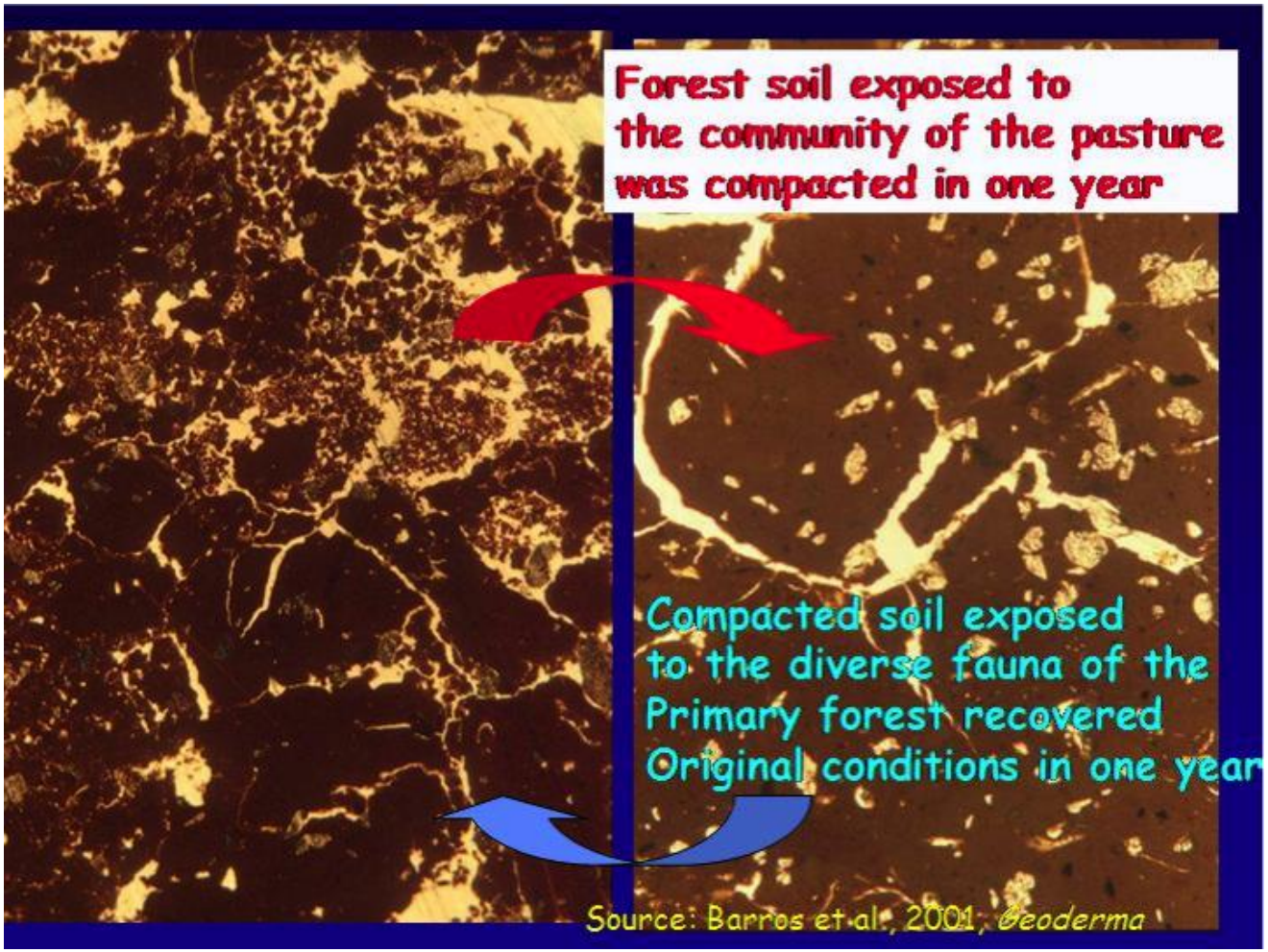


Agrégation sous pâturage (Pah)

L=3,6 cm ; lame mince scannée, lumière transmise

3. Modification de l'agrégation

Problèmes liés au développement des compactants

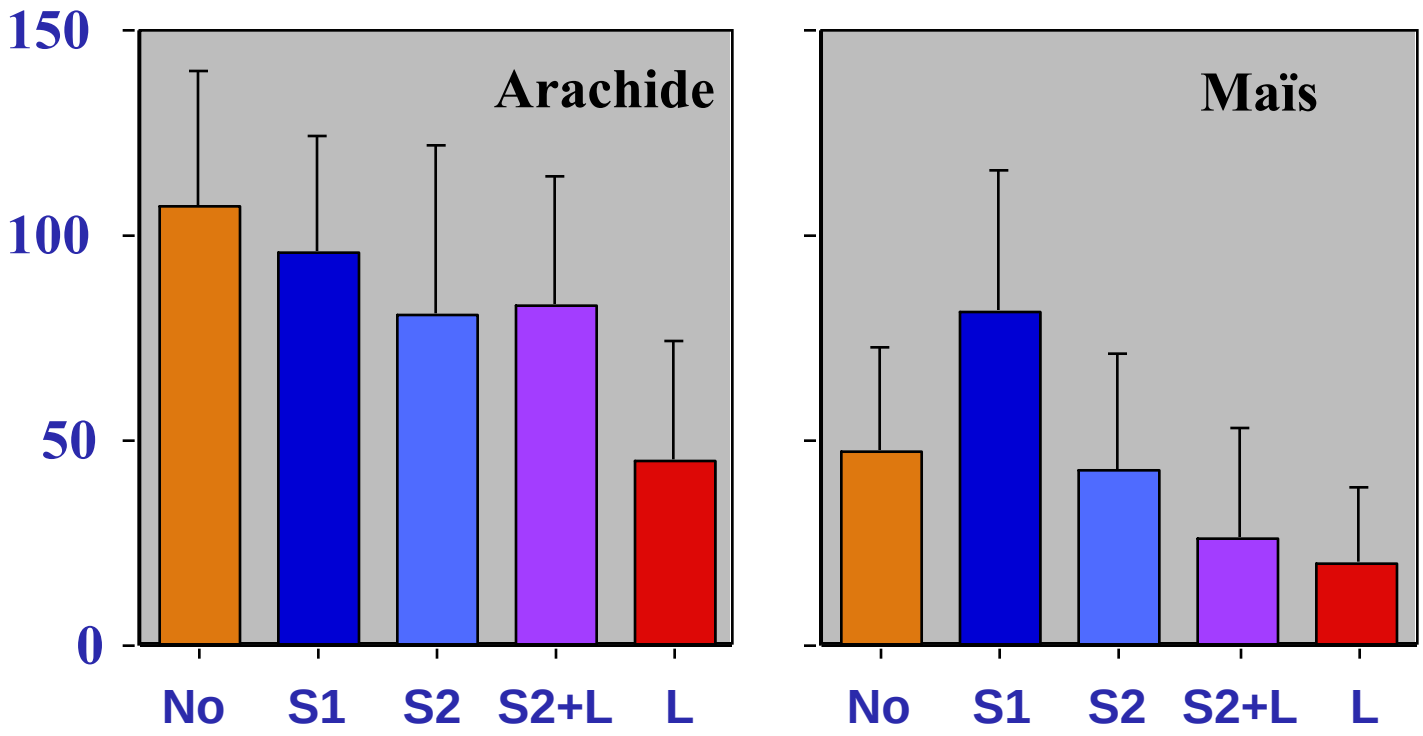


Chauvel et al., 1999 ; Barros et al., 2001 ;
2004

3. Modification de l'agrégation

Conséquences sur les propriétés physiques

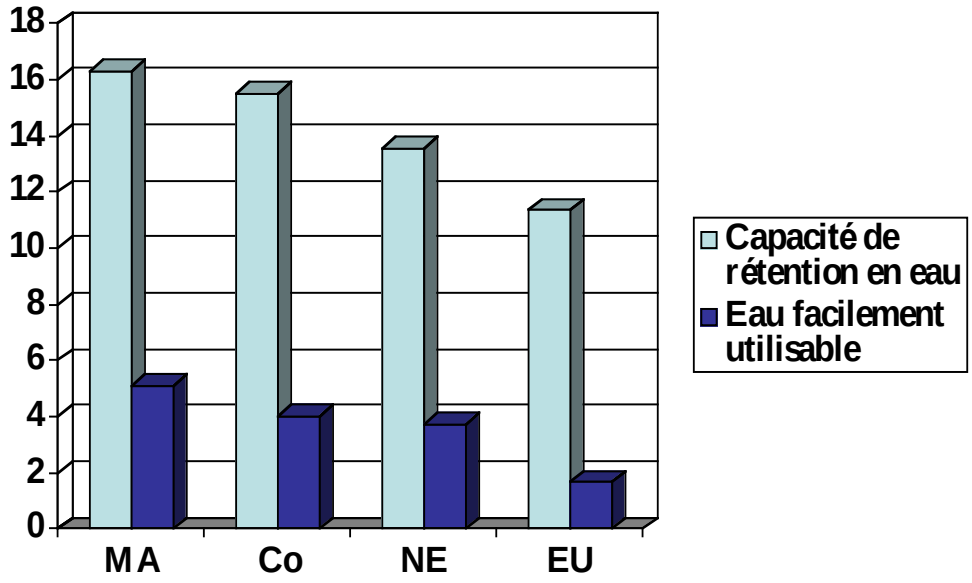
No = sans vers de terre
S1 = Hyperiodrilus africanus
S2 = Eudrilidae
L = Millsonia anomala



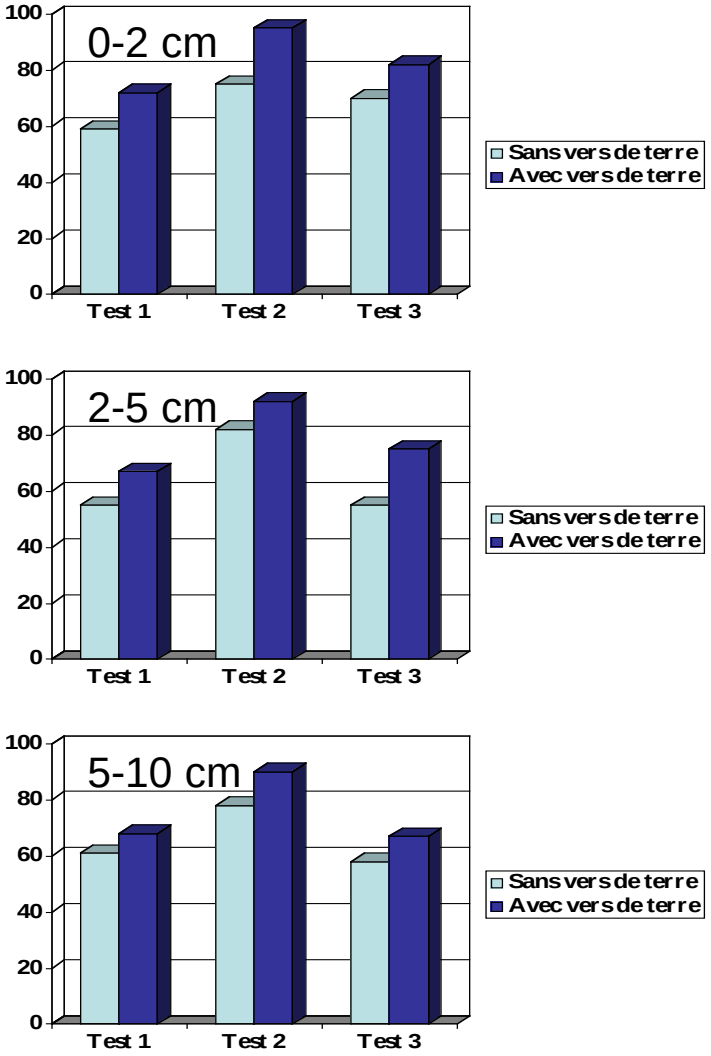
Derouard et al., 1997

3. Modification de l'agrégation

Conséquences sur les propriétés physiques



Rétention en eau du sol
MA= Millsonia anomala
Co = faune totale
NE = sans vers
EU = petits Eudrilidae

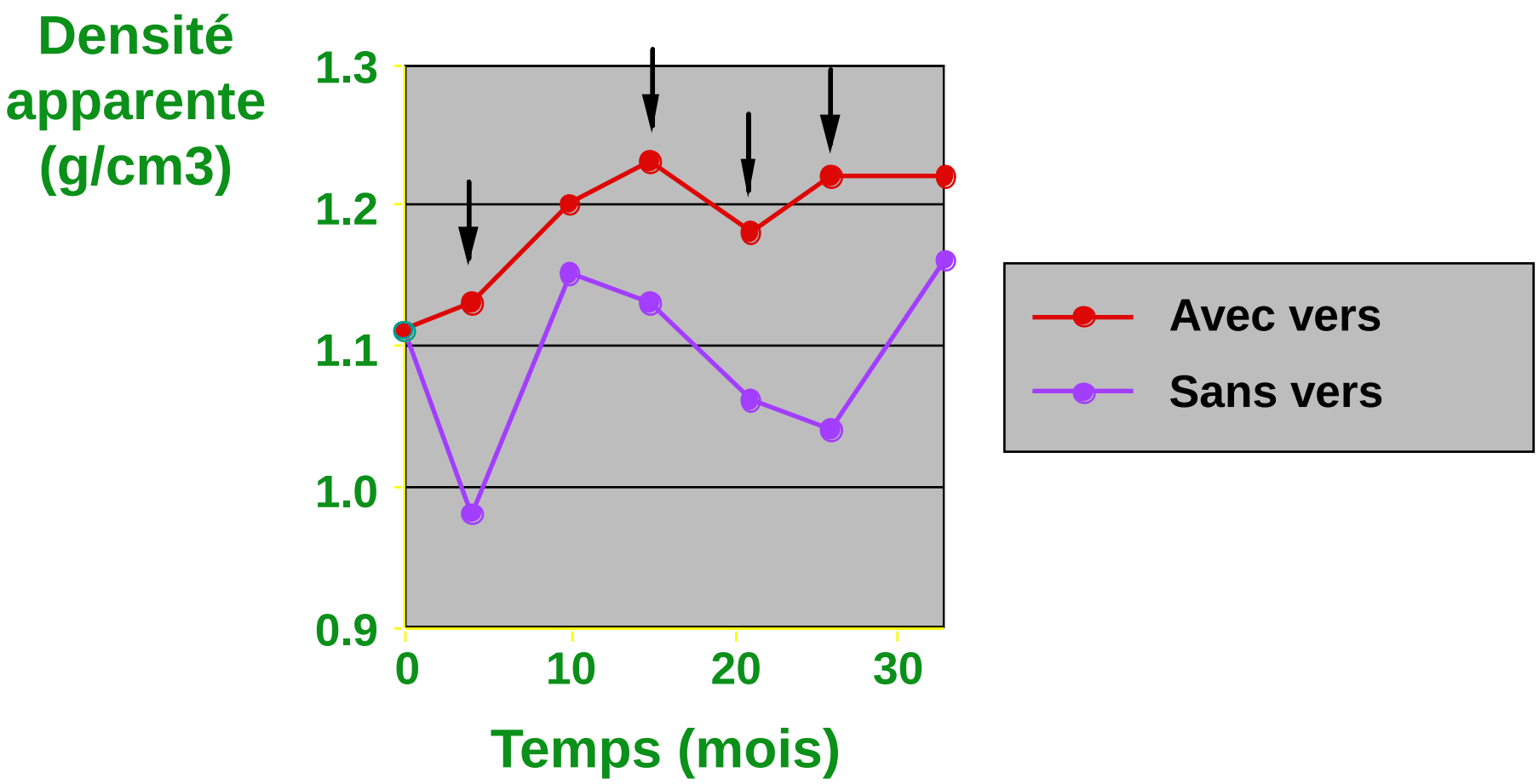


Stabilité structurale du sol

Blanchart (1990)

3. Modification de l'agrégation

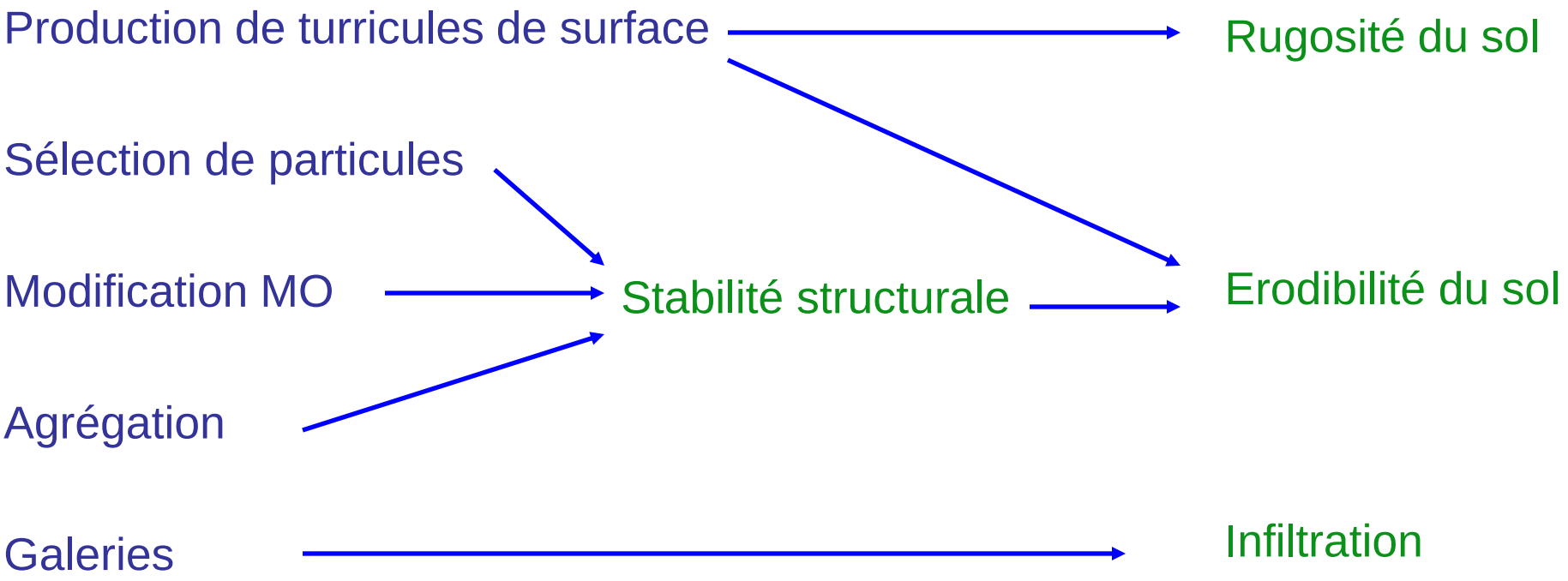
Effet des vers de terre sur la densité apparente du sol
Yurimaguas (Pérou) - Sol cutivé



Alegre et al. (1995)

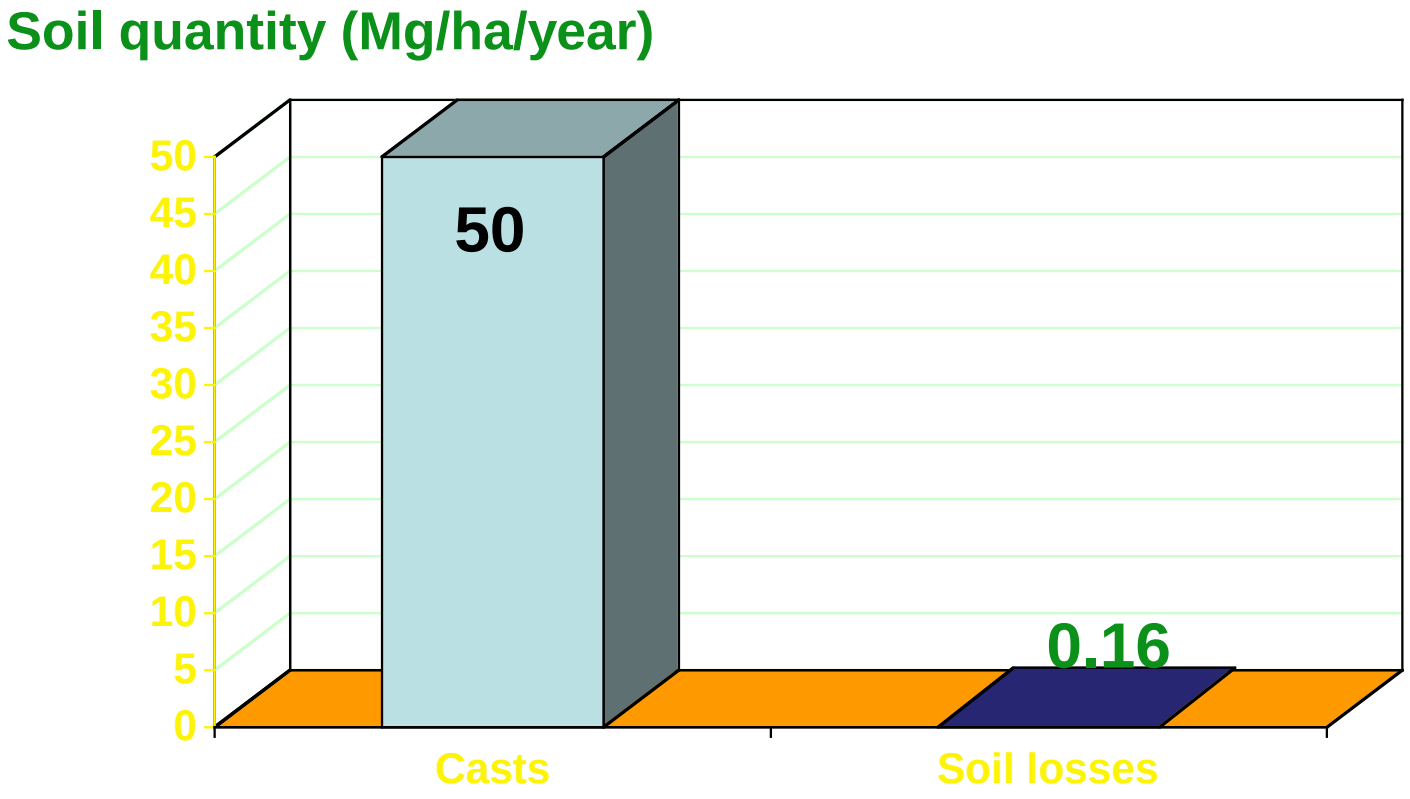
3. Modification de l'agrégation

Activités des vers de terre et érosion
Processus / Conséquences



3. Modification de l'agrégation

Production de turricules à la surface du sol
Côte d'Ivoire - Forêt



(Roose, 1976)

3. Modification de l'agrégation

Groupes fonctionnels et érosion

Epigés : Faible influence sur l'érosion

Anéciques : abondants dans les régions tempérées. Formation de galeries larges, verticles et continues. Effets sur l'infiltration

Endogés : dominants dans les tropiques. Intense production d'agrégats

3. Modification de l'agrégation

Groupes fonctionnels et érosion

Sols à kaolinite :

FORT potentiel de l'activité des vers de terre pour réduire l'érosion.

Forte interaction avec la matière organique

Sols à smectite :

FAIBLE potentiel de l'activité des vers de terre pour réduire l'érosion.

3. Modification de l'agrégation

Facteurs influençant la structure du sol

Conclusions :

La faune du sol participe activement à la formation et à la conservation de la structure des sols

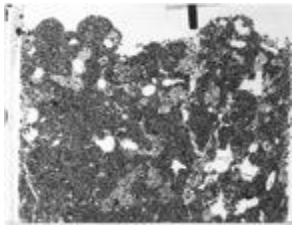
L'amplitude de l'effet dépend de l'environnement (climat, type de sol, végétation) et des espèces impliquées

La présence d'une diversité fonctionnelle équilibrée est un gage de la conservation d'une bonne structure

Des changements dans la faune du sol ont des conséquences immédiates sur la structure et le fonctionnement physique du sol

4. Modélisation

SWORM: un modèle multi-agents pour simuler l'effet des vers de terre sur la structure du sol



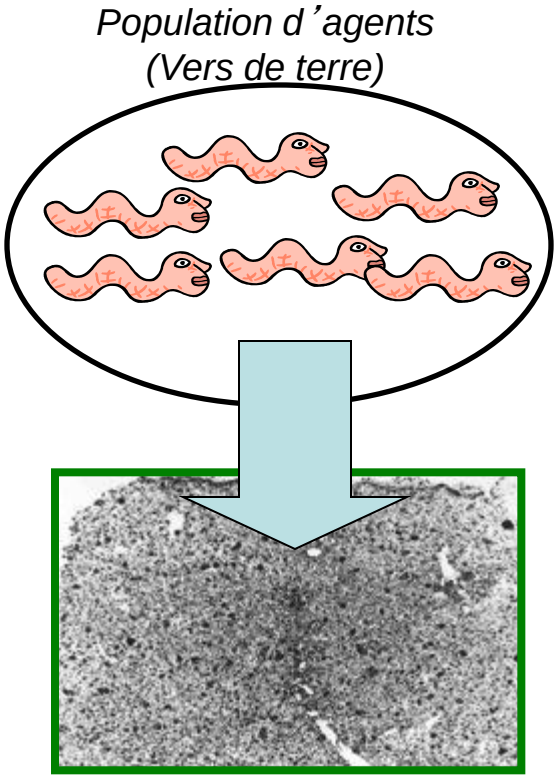
Eric Blanchart, N. Marilleau, C. Cambier, A. Drogoul, E. Perrier, J.L. Chotte

IRD
Institut de Recherche pour le Développement

SeqBio

GEODES

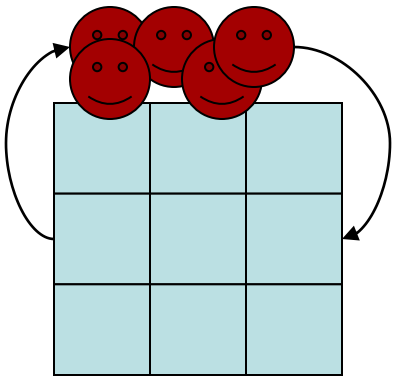
4. Modélisation



Quel modèle ?

Modèles individus-centrés (IBM)

Systèmes multi-agents (MAS)



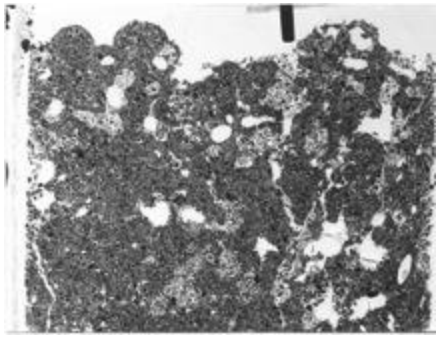
Modéliser l'environnement (sol) = une grille de cellules

Agents autonomes (vers de terre) capables de se déplacer, d'interagir et de modifier l'état des cellules

4. Modélisation

1ère difficulté : décrire *l'environnement physique*

Un sol est un milieu hétérogène, multi-échelles, en 3 dimensions et dynamique



2ème difficulté : décrire *le comportement des VDT*

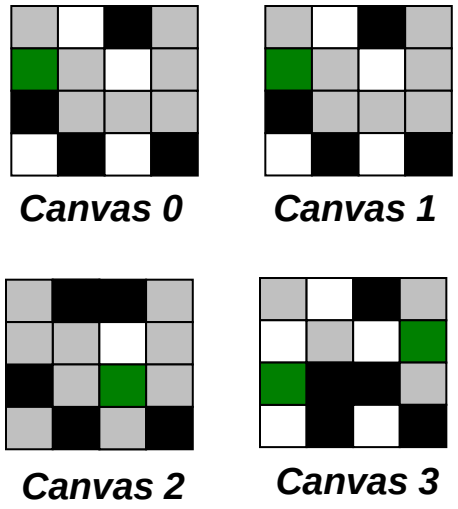
- VDT interagissent avec le sol (perception)
- Comportements ingestion/déjection
- Déplacements

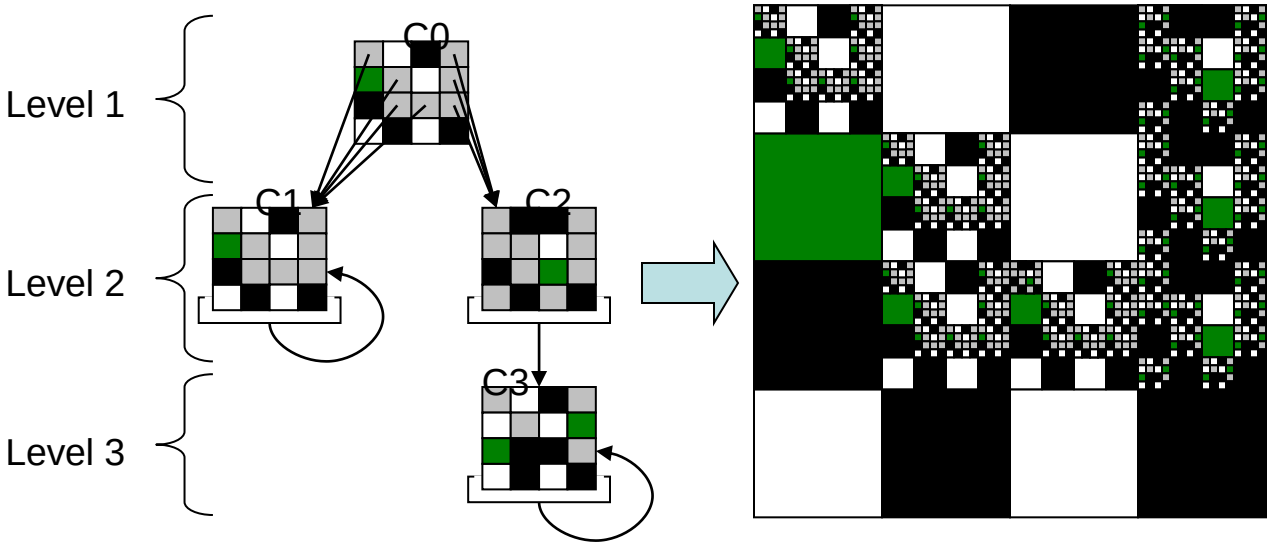
4. Modélisation

Sol = environnement dynamique et multi-échelles

Approche Agent Pore Solid Fractal (APSF)

Patterns = Canevas pour caractériser l'organisation spatiale des cellules





Canevas associés par un arbre (exemple d'un arbre)

Virtual environment

4. Modélisation

Simulateur

Décrit le fonctionnement du sol dans un bloc de 20 x 20 x 20 cm
La taille de chaque cellule est divisée par 10
Taille : 20 mm au niveau 0
2 mm au niveau 1 ⇒ Sand
0.2 mm au niveau 2 ⇒ Fine sand
0.02 mm au niveau 3 ⇒ Fine silt
0.002 mm au niveau 4 ⇒ Clay

Propriétés du sol nécessaires : teneur en MO, texture, densité apparente, densité réelle

Vers de terre: nombre d'espèces, taille moyenne (diamètre), abondance, consommation journalière, taux d'assimilation, sélection de particules

Turricules: teneur en MO, texture, densité apparente

Sorties: Animations, vues 3D, lames minces, évolution de paramètres

4. Modélisation

Vers de terre

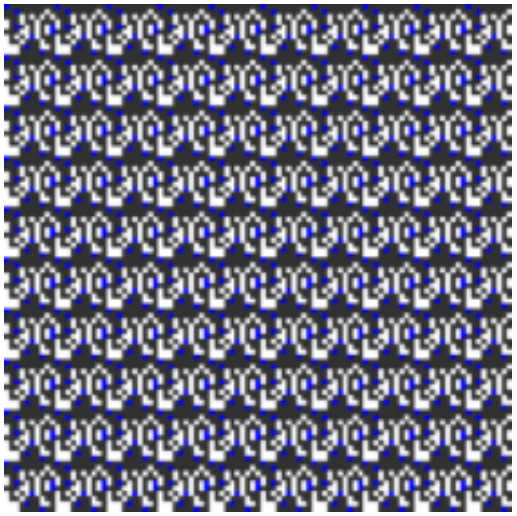
	M. anomala	Eudrilidae
Scale	2 mm	2 mm
Number of simulated worms	20	200
Soil ingested per day per individual	20 g	500 mg
Assimilation rate	9%	9%
Particle selectivity	90%	60%

Jour simulé: **10 périodes d'ingestion alternant avec 10 périodes de rejet**

Simulation: **40 jours**

4. Modélisation

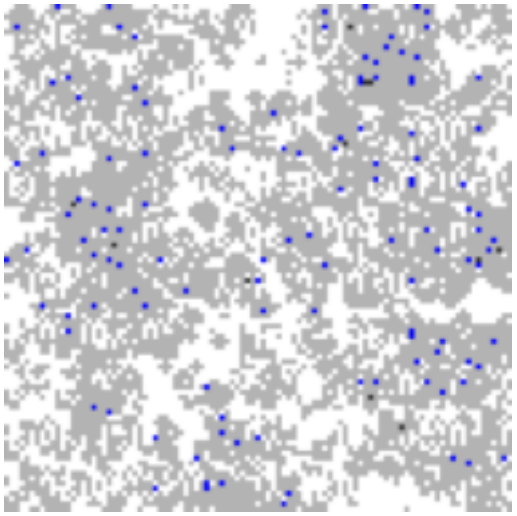
Lames minces de sol



Initial soil structure

40 days

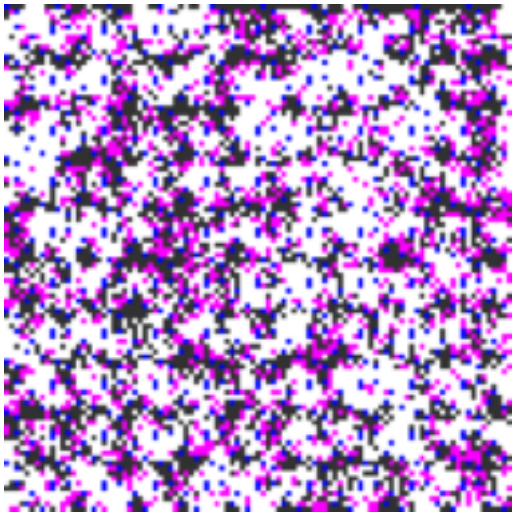
Cast
Solid
Pore



Millsonia anomala

Decomposable
Solid
Pore

Decomposable
Cast
Solid
Pore



Eudrilidae

FIN