

# SYNCHRONIE DES ÉCHANGES SOL-PLANTE EN PRAIRIE PERMANENTE : UNE SOURCE D'INSPIRATION POUR LA CONSTRUCTION DE NOUVEAUX SYSTÈMES DE CULTURE

Séminaire scientifique des Journées annuelles du RMT F&E  
Paris, le 10 mai 2017

UMR Ecosystème Prairial, INRA VetAgro, CLERMONT FERRAND

# UMR Ecosystème Prairial

- Comprendre et modéliser le fonctionnement écologique des prairies permanentes dans un contexte de changement global

## Observation

Dispositifs larges échelles  
/ long terme -  
SOERE-ACBB



## Expérimentations

Microcosmes/ECOTRONS

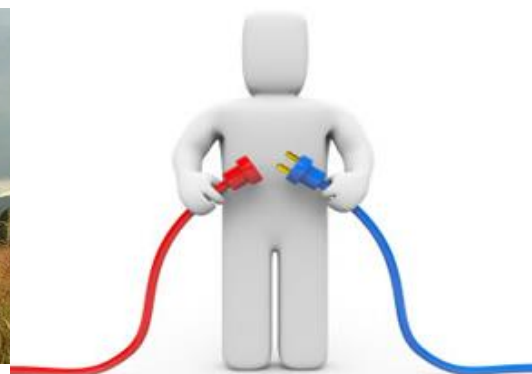


## Modélisation

PASIM, Gemini, CNSPAT, ModVege, Symphony, SisFRT,...

# Depuis 2016, une autre ambition

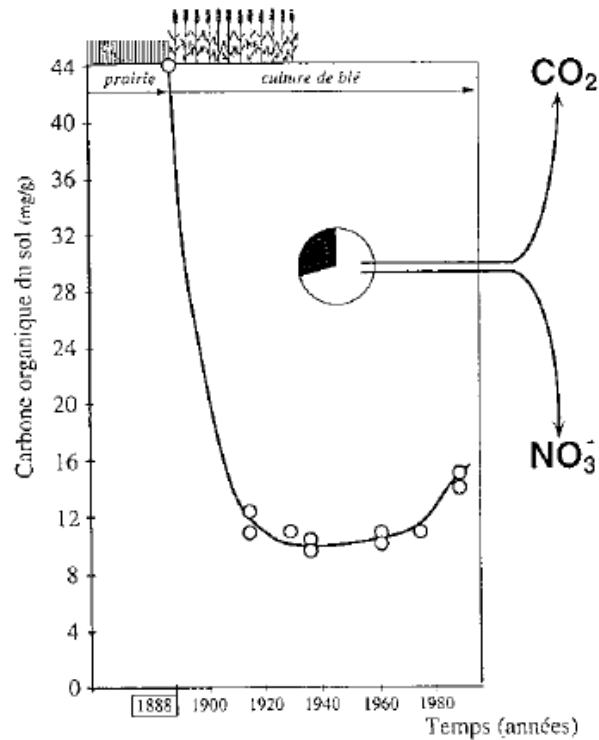
- Contribuer à la création de nouveaux systèmes de culture inspirés du fonctionnement vertueux des prairies (Agroécologie).
- Réinjecter de la régulation biologique dans les cultures



Coll. INRA Reims, ZALF (Allemagne), Réseau A2C, Limagrain

# *Rapide comparatif prairies/sols cultivés*

# La mise en culture induit une diminution rapide des MOS



Balesdent et al., 1988

Les stocks de carbone organique dans la partie superficielle du sol en France métropolitaine



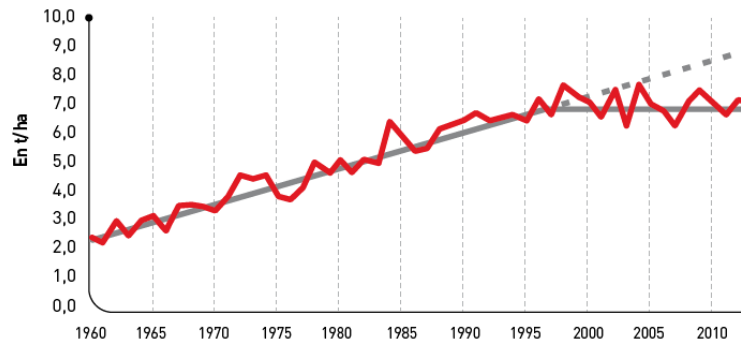
Source : Gis Sol, 2013 – d'après Meersmans *et al.*, 2012. Traitements : SOeS, 2013.

Avec des conséquences sur les stocks de C visibles à l'échelle du territoire.

# Les limites du système actuel

- Erosion des sols
- Les cultures deviennent totalement dépendante de la fertilisation N
- A l'échelle globale: 150 Tg N/an injectés, 50% est perdu.
- Stagnation des rendements dans de nombreux pays.

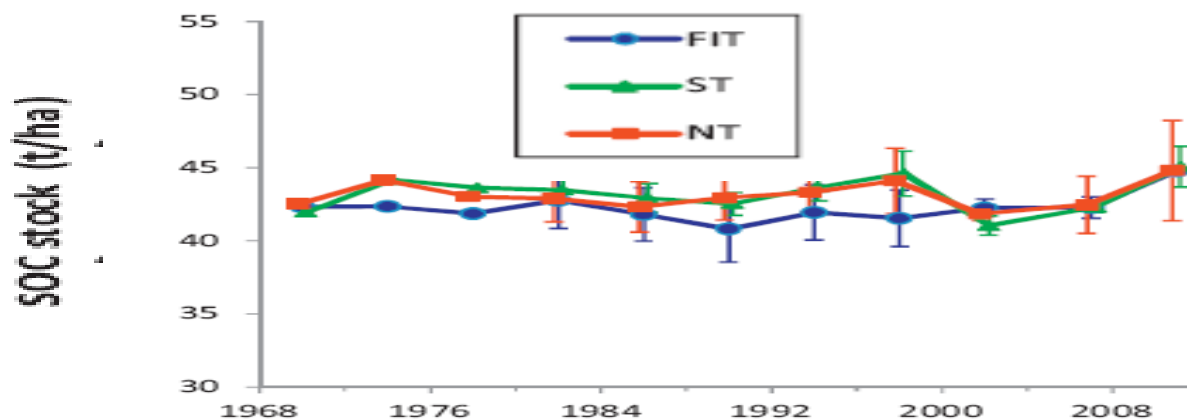
Évolution des rendements du blé tendre en France



- Emissions de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) représentant  $\frac{1}{4}$  des émissions totales.

# Des ajustements techniques efficaces mais insuffisants

- Le bilan prévisionnel des besoins & pilotage de la fertilisation limitent les pertes d'N.
- La réduction du travail du sol réduit l'érosion et augmente les MOS en surface. Mais l'effet sur les MOS intégré sur le profil de sol est nul:



- Et les cultures restantes dépendantes à la fertilisation minérale.

Dimassi et al., 2014

# Les prairies permanentes: un écosystème diversifié et productif

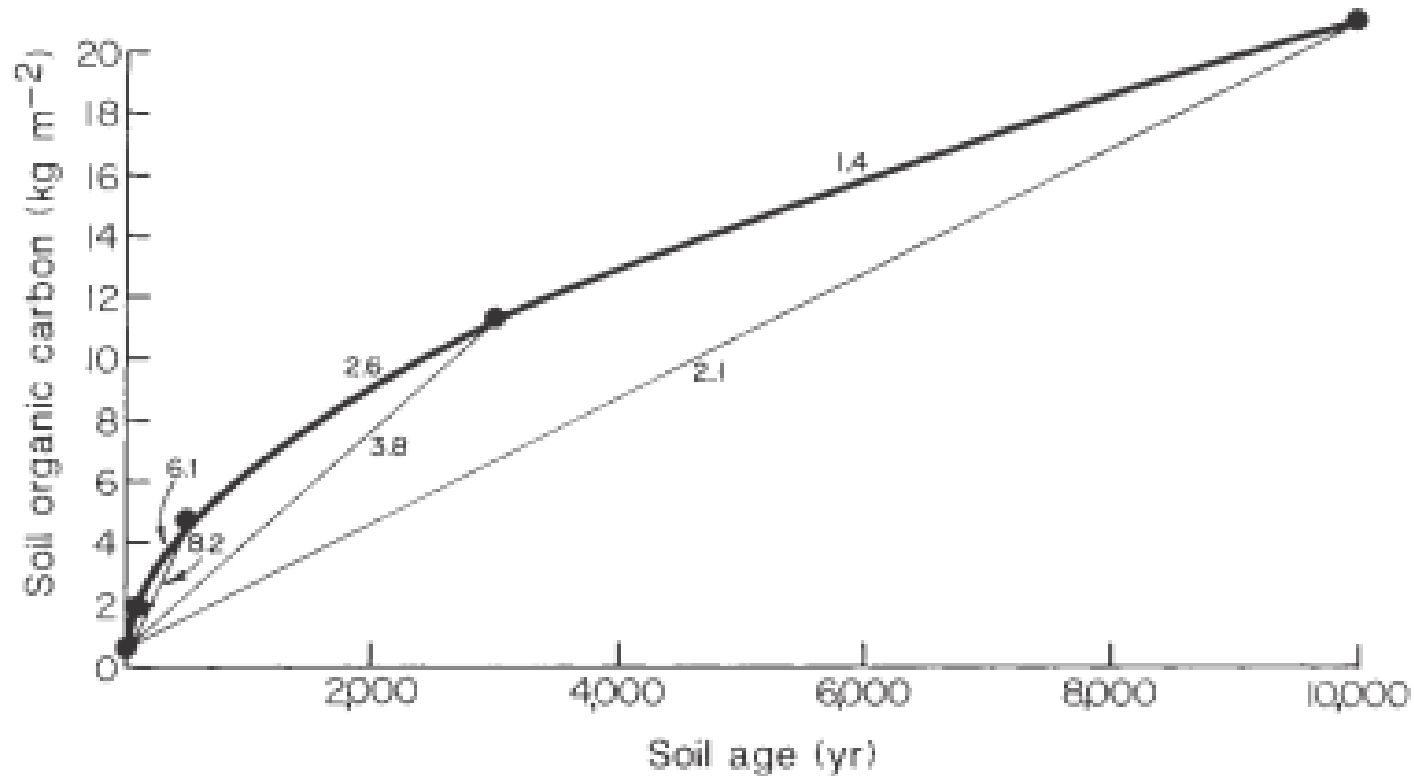


- 60 à 130 espèces végétales

- Production primaire net: 600 à 1400 g C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> (versus 500-1000 pour les cultures)
- Un hectare de prairie permanente peut fournir:
  - **10 T de fourrage an<sup>-1</sup>**
  - **Alimente 1-2 UGB**
  - **3000 - 6000 L de lait an<sup>-1</sup>**
  - **350 – 550 kg de poids vif an<sup>-1</sup>**
- Fertilisation N facultative (légumineuses)



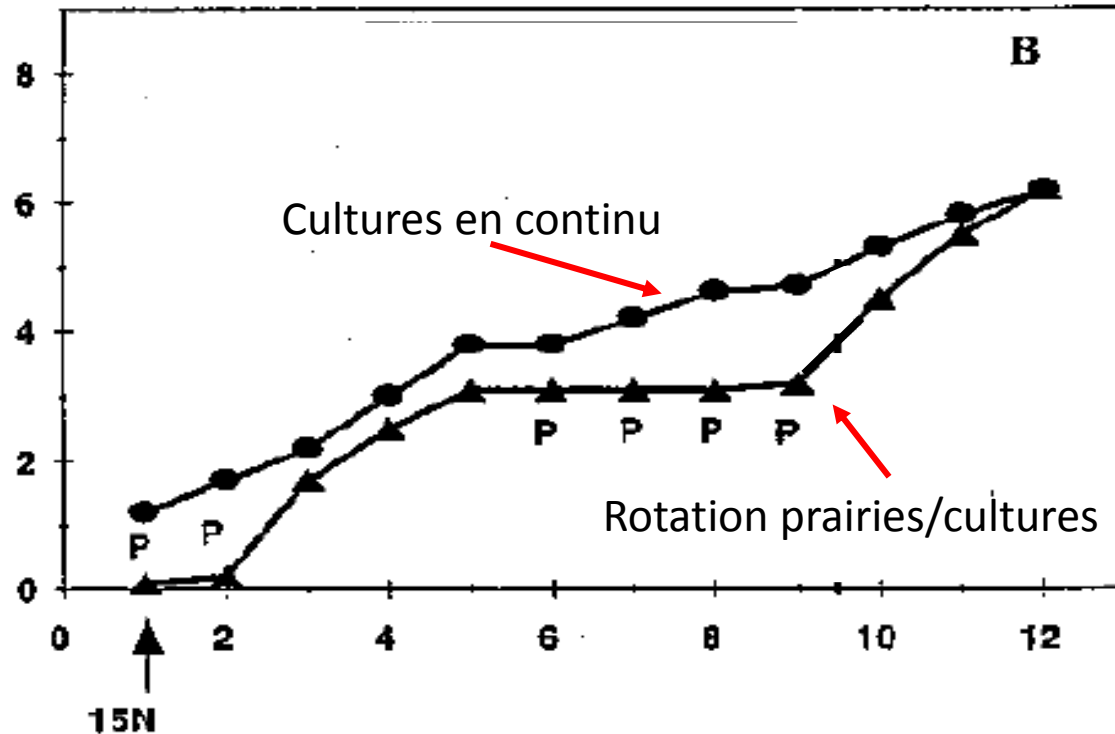
# Accumulation continue de MOS



- Actuellement, les prairies européennes séquestrent de 0,5 à 3 TC/ ha /an sous forme de MOS

# Un cycle des nutriments fermés

$^{15}\text{N}$  lessivé (%apport)

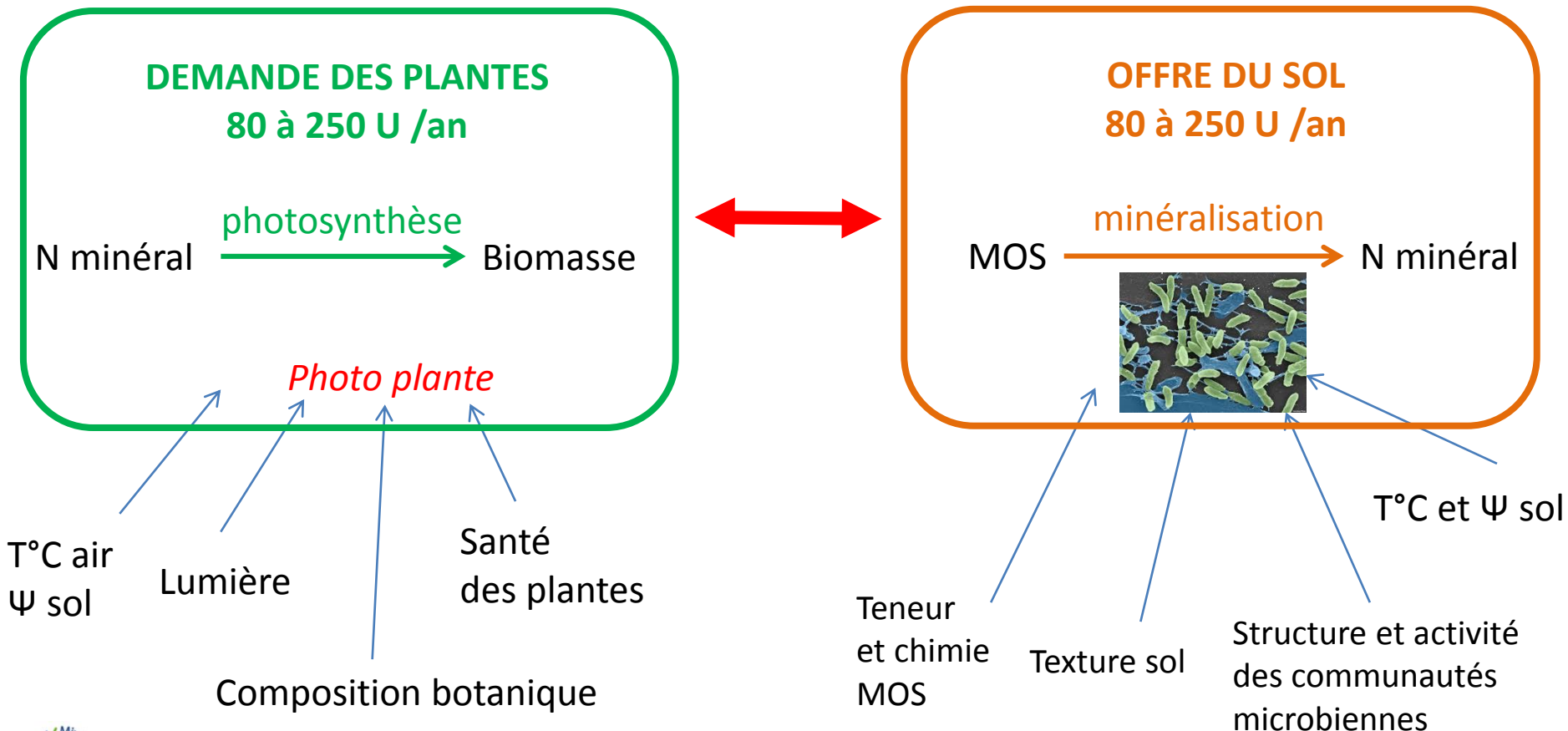


- En prairies: pas/peu de lessivage d’N, pertes par voies gazeuses 3x plus faibles qu’en cultures.

Triboi & Loiseau, 1996

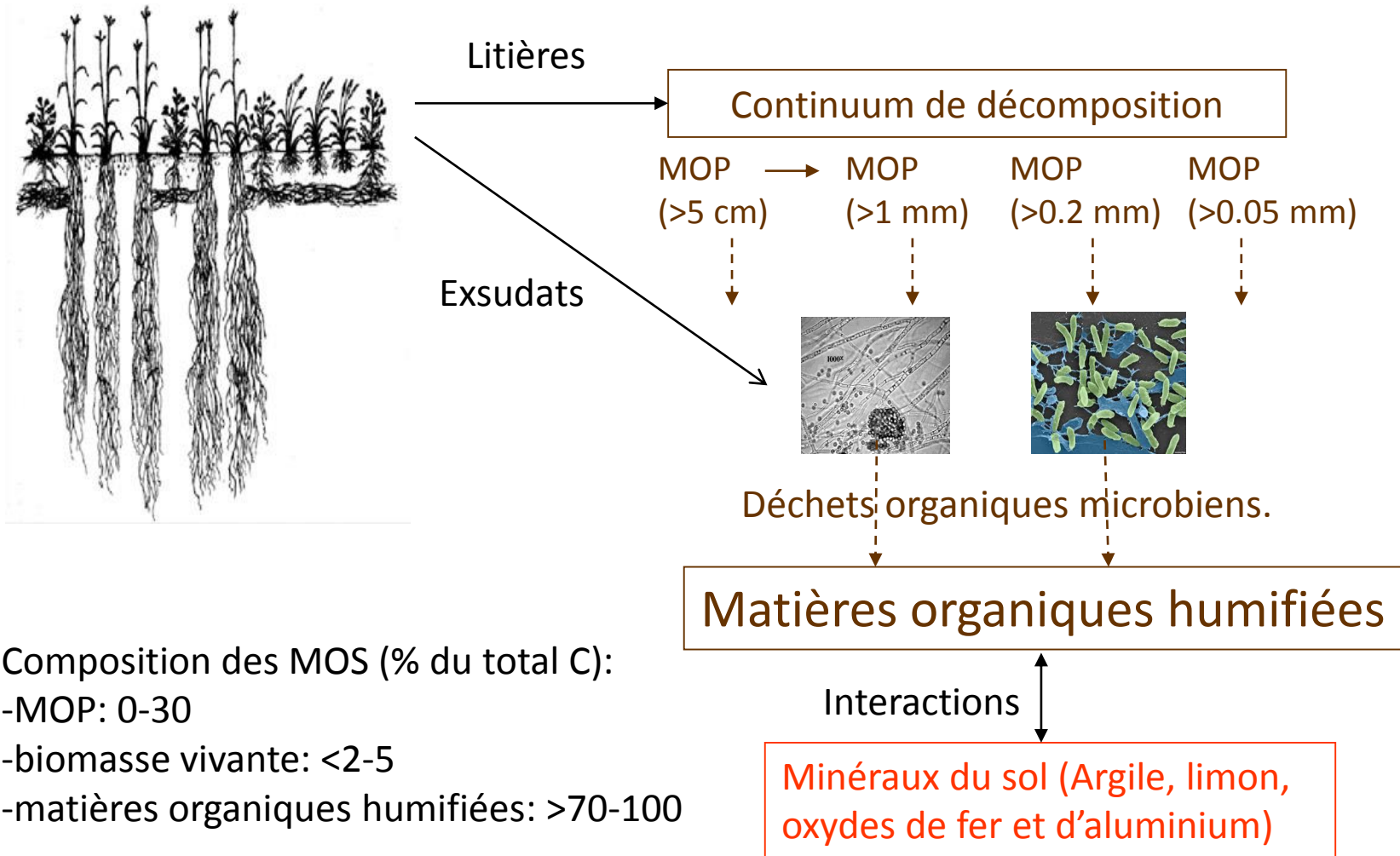
# Paradoxe de la synchronisation entre l'offre et la demande dans les prairies

**Synchronisation quasi parfaite (< 5% perte)**



- *Petite plongée dans les processus du sol*

# Formation des MOS



Composition des MOS (% du total C):

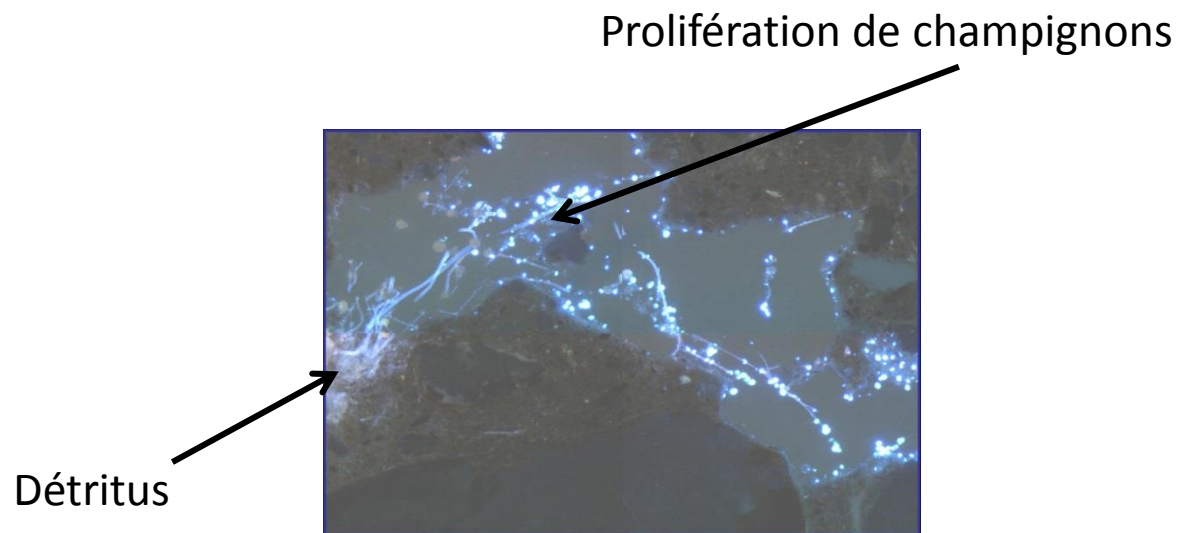
-MOP: 0-30

-biomasse vivante: <2-5

-matières organiques humifiées: >70-100

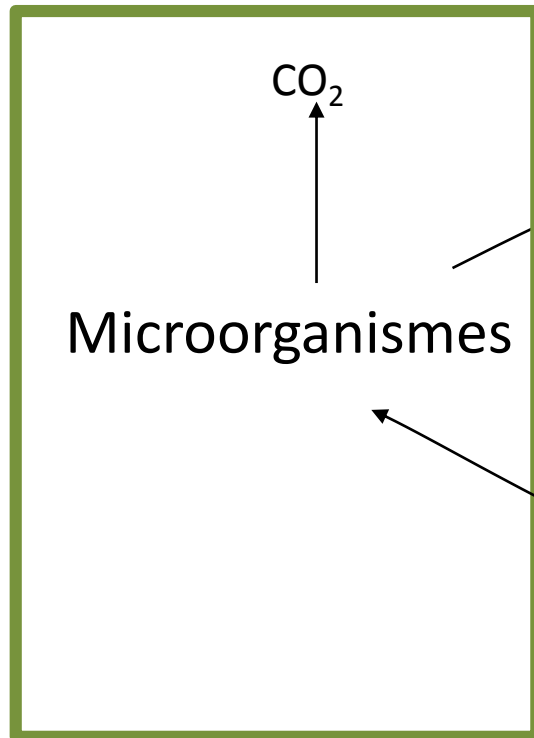
# Distribution des microorganismes dans le sol.

- Dans 1g de sol:  $10^6$  à  $10^9$  bactéries, des kms d'hyphes et des millions d'espèces différentes.
- <2-3% des surfaces des MOS sont colonisées.
- Le sol est un désert avec des oasis : rhizosphère, détritusphère.

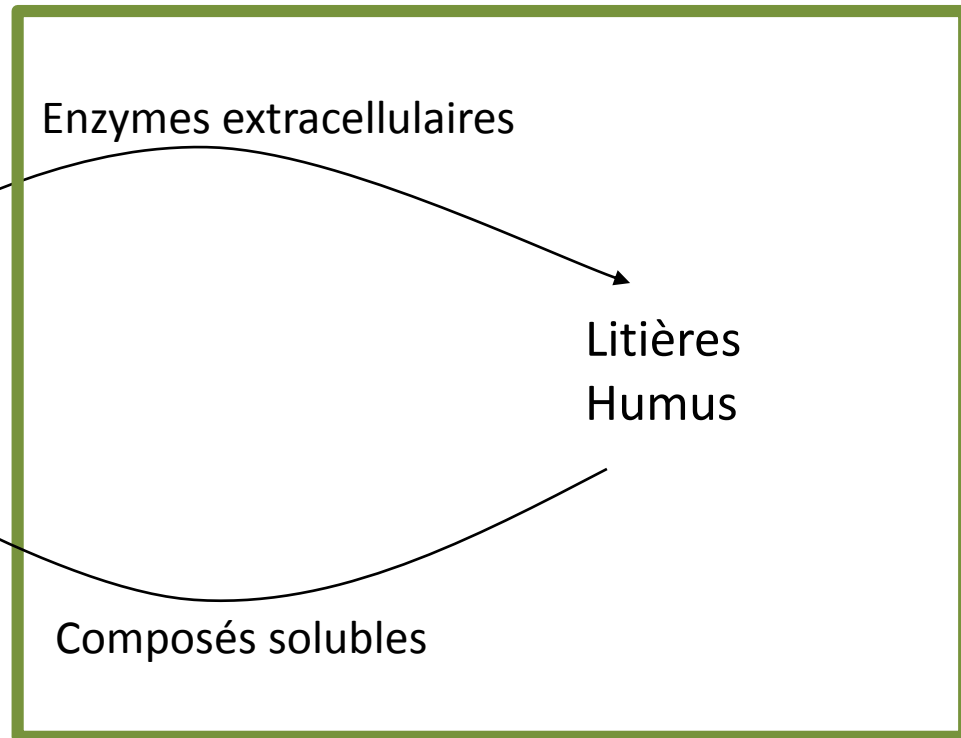


# Les deux étapes de la décomposition des MOS

## 2. Respiration (intra)



## 1. Solubilisation (extra)



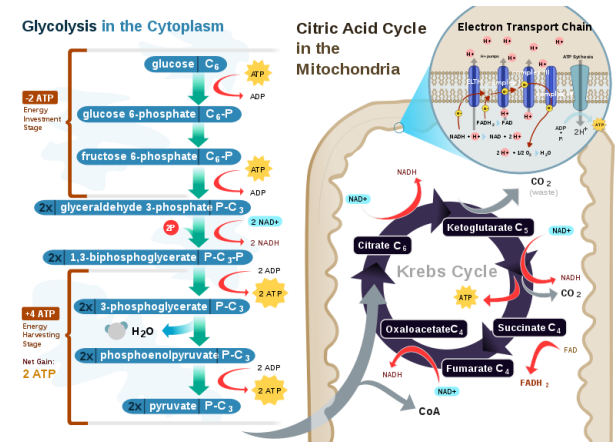
# L'activité microbienne du bilan gain-dépenses

**Gains: ATP produit lors du métabolisme oxydatif (Glycolyse, cycle de Krebs etc)**

**Dépenses:**

- Entretien de la cellule (métabolismes, génome etc)
- Production d'enzymes extracellulaires
- etc

- Si **gains** > **dépenses**: prolifération des microorganismes.
- Si **gains** < **dépenses** : mortalité, dormance ou sporulation. Pas de dégradation du substrat.



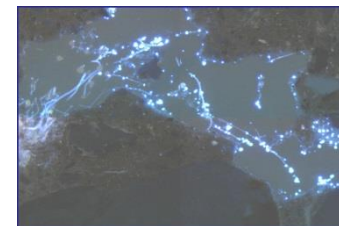


# Persistance de l'humus dans les sols: un problème d'accessibilité et d'énergie

- Les litières et les exsudats sont accessibles et riches en énergie (riche en  $H^+$  et  $e^-$ ).

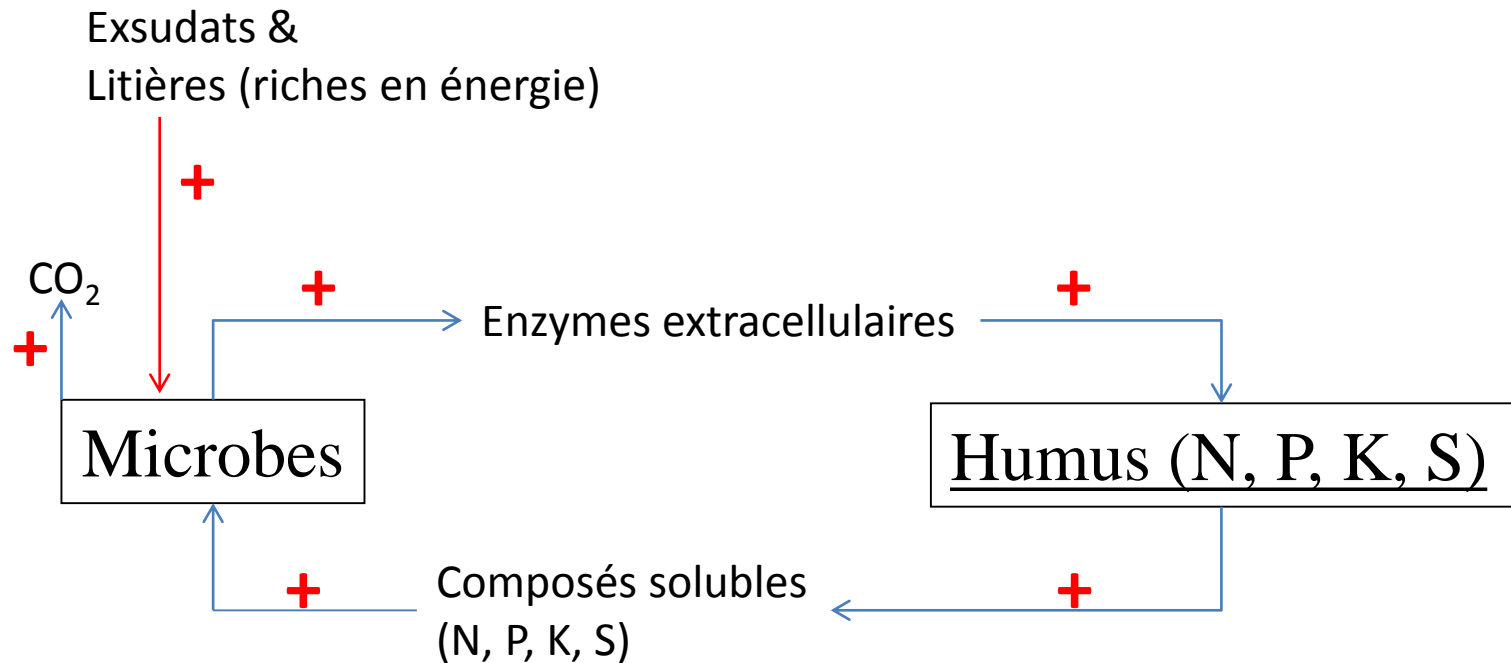


- La décomposition de l'humus est bloquée car
  - molécules pauvres en énergie (pauvre en H et riche en O)
  - dispersé dans les pores du sol dont la majorité n'est pas accessible
  - requiert une diffusion longue des enzymes qui sont inactivées
  - Bilan gains/dépenses pour les microbes négatif



**D'où le désert microbien dans une abondance de MOS !**

# Décomposition de l'humus au travers d'un co-métabolisme

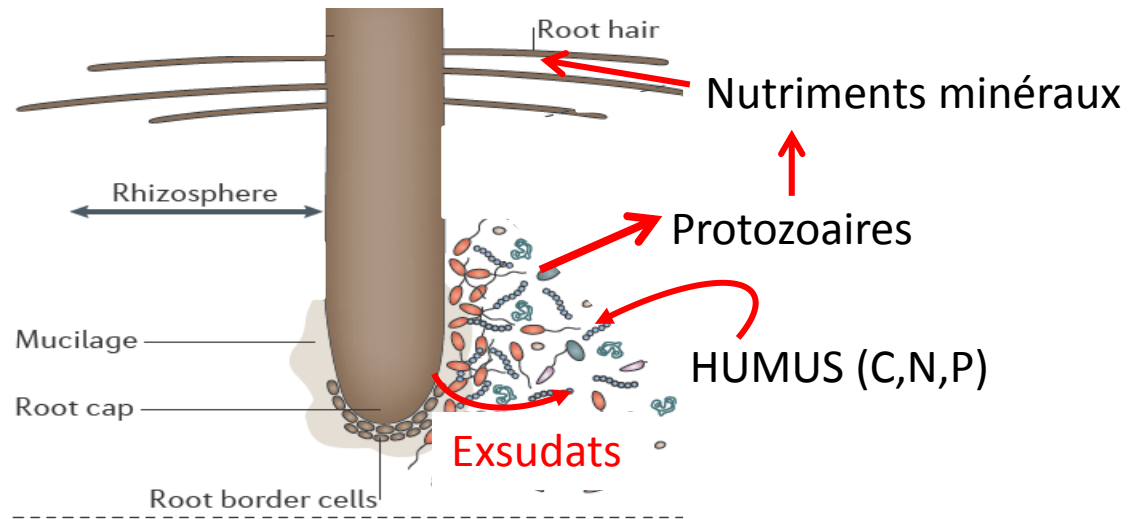


**L'incorporation d'exsudats ou de litières accélère la minéralisation d'humus, un effet appelé « priming »**

Fontaine et al, 2003; 2004.

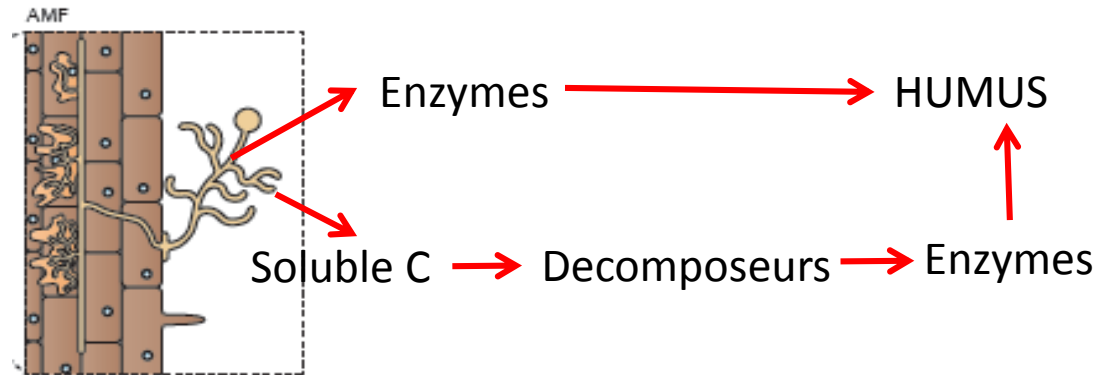
# Plusieurs voies de stimulation possibles:

## 1) Via les exsudats

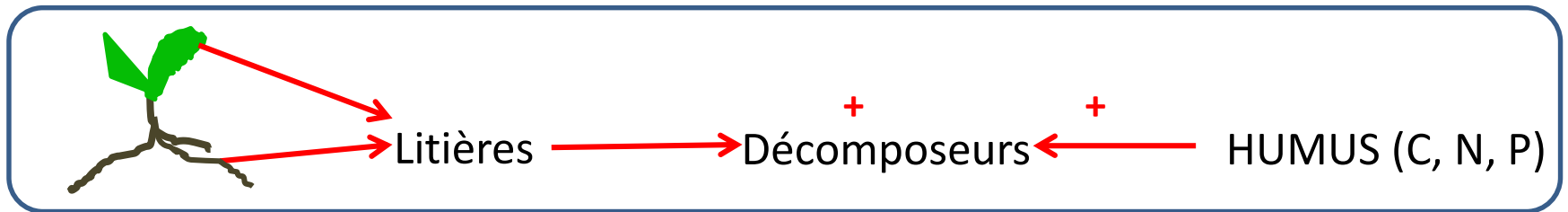


*Clarholm, 1985; Kuzyakov, 2012; Cheng et al., 2012*

## 2. Via les mycorhizes



## 3. Via les litières des plantes.



*Bingeman et al., 1953; Hodge et al., 2001; Fontaine et al., 2004*

# MISE EN PLACE d'EXPERIMENTATION

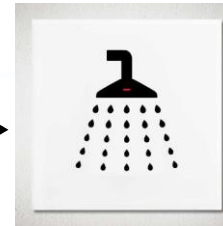
- Quantifier la stimulation induit par les plantes pérennes des prairies.
- Séparer la contribution des exsudats, des mycorhizes et des dépôts de litières
- *Lolium perenne*, *Poa trivialis* and *Trifolium repens* ont été cultivées sous  $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ .

# Marquage continu des plantes avec du $^{13}\text{CO}_2$

Air extérieur  
( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )



Air « pur »  
( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ )



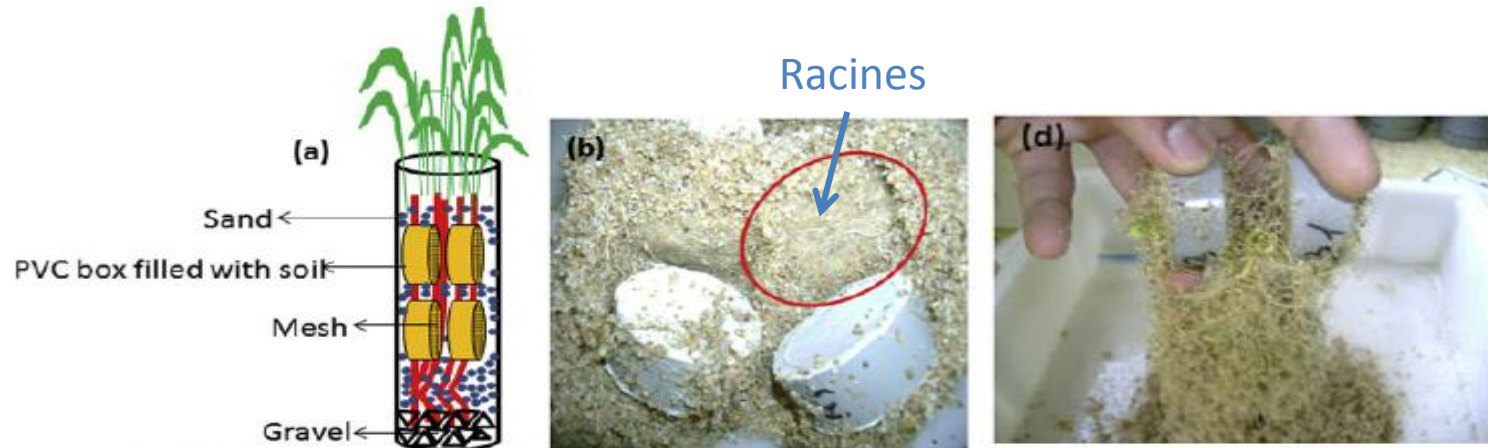
( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )



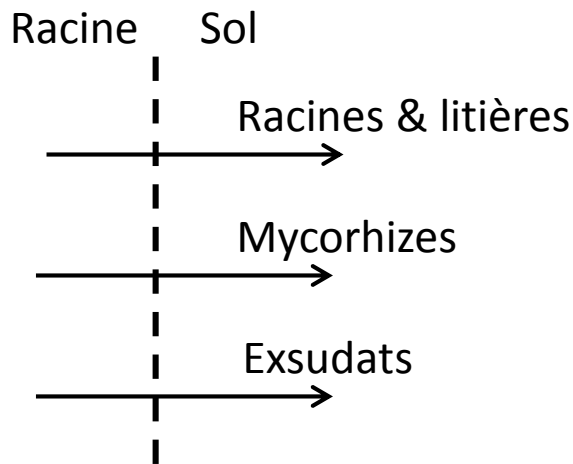
$^{13}\text{CO}_2$



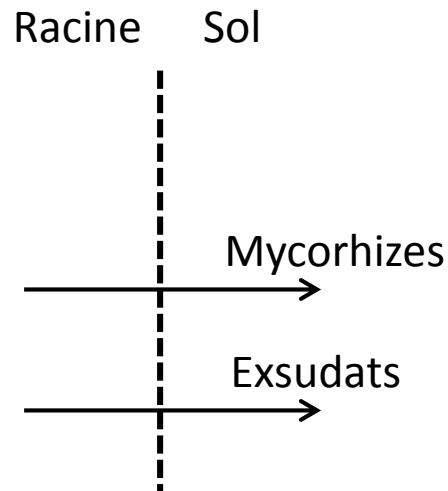
# Dispositif expérimental pour séparer les processus rhizosphériques



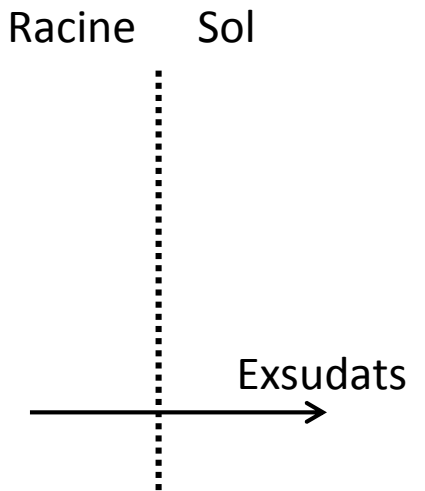
## Filet large (1 mm)



## Filet intermédiaire (30 $\mu\text{m}$ )

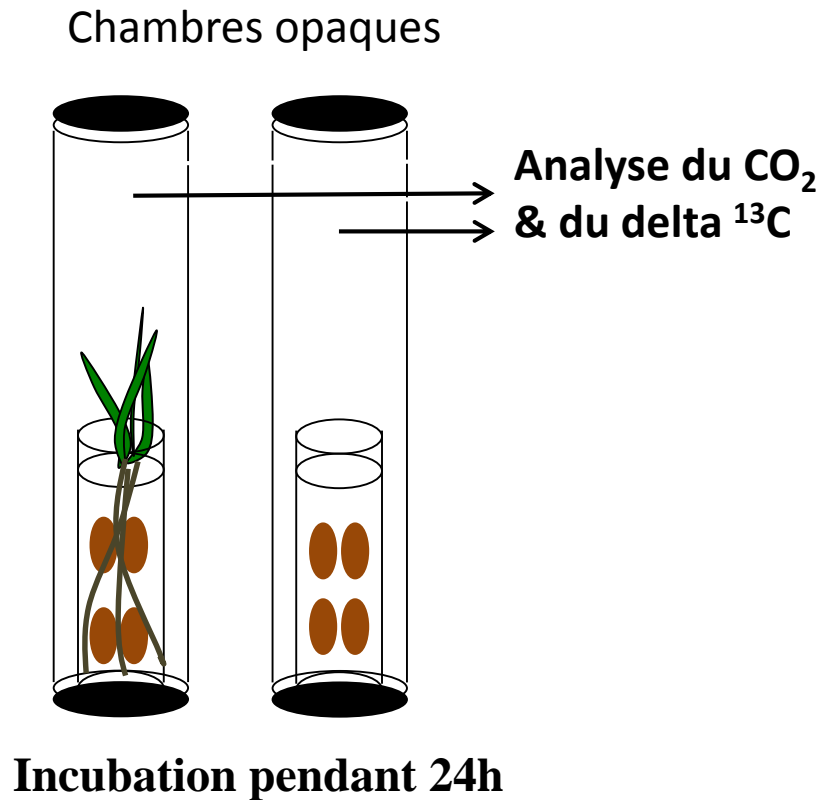


## Filet fin (0.45 $\mu\text{m}$ )

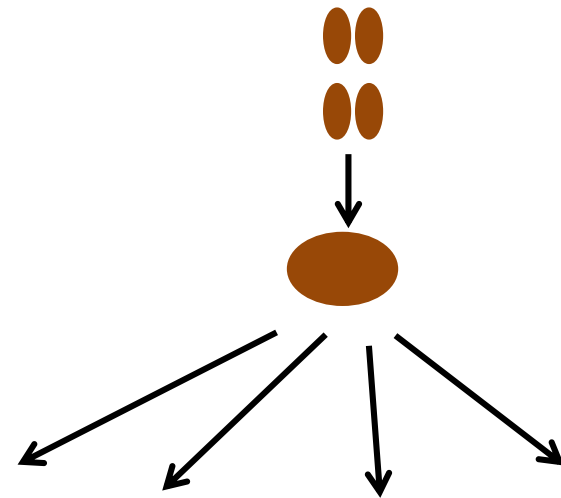


# Analyses gaz et sols

## Mesures respiration



## Récoltes destructives

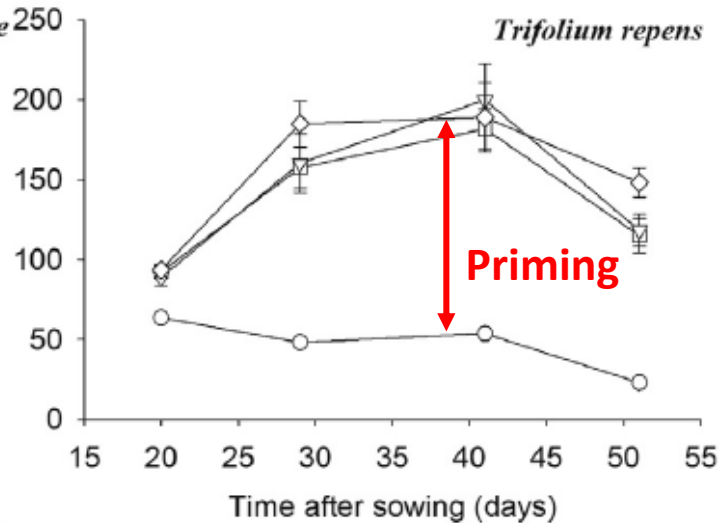
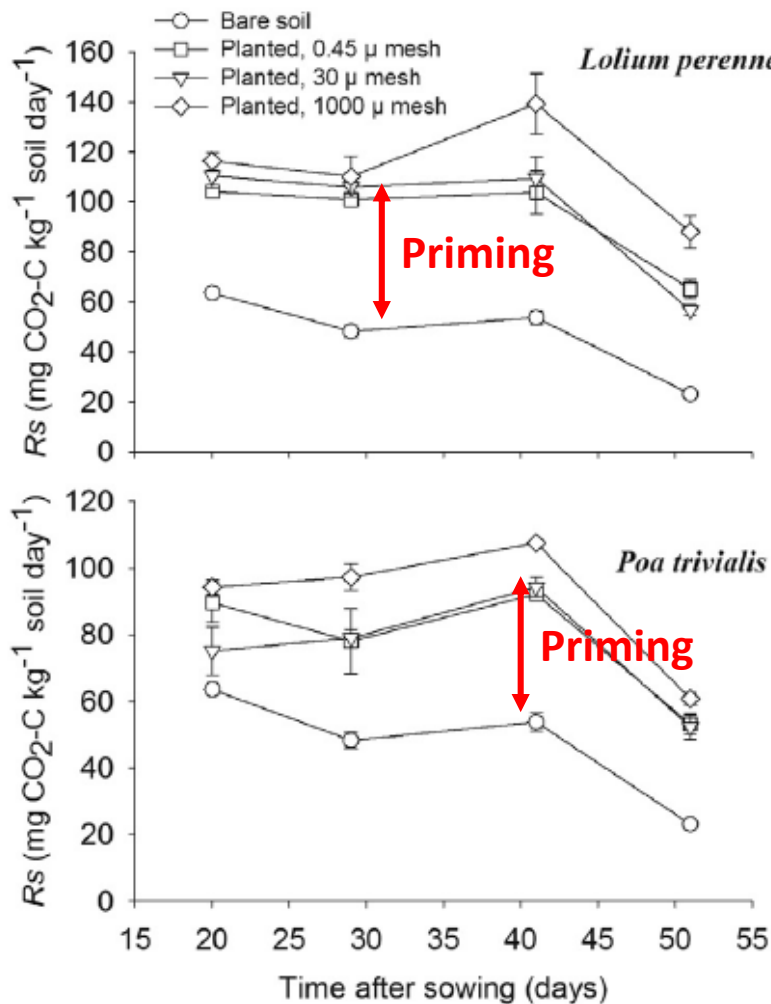


- Biomasse racinaire
- Mycorhize
- C and  $\delta^{13}\text{C}$  microbien
- Communautés microbiennes (PLFA)



# L'effet plante sur la décomposition de l'humus

Décomposition de l'humus

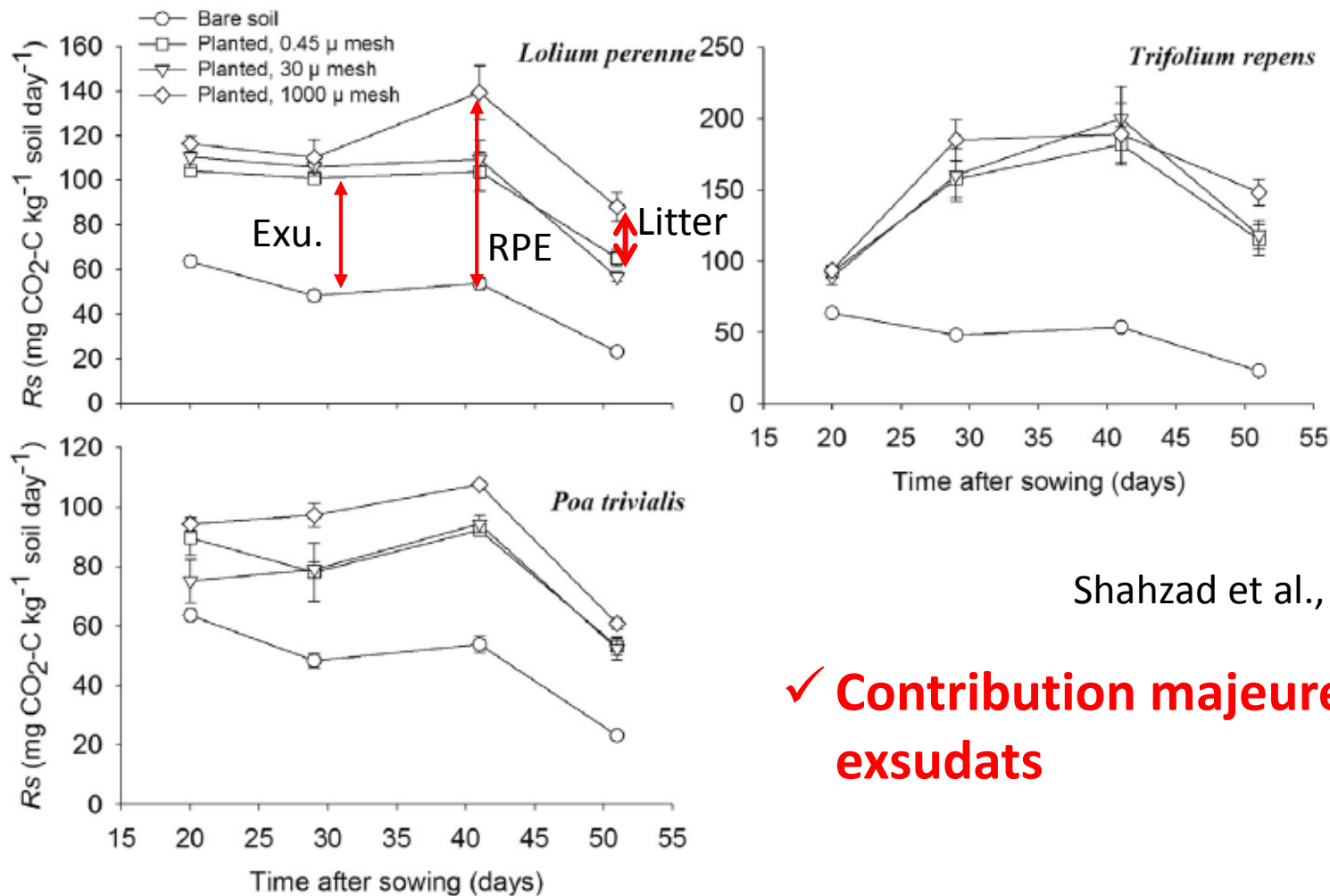


Shahzad et al., 2012

✓ La décomposition de l'humus x 2-4 en présence de la plante

# L'effet plante sur la décomposition de l'humus

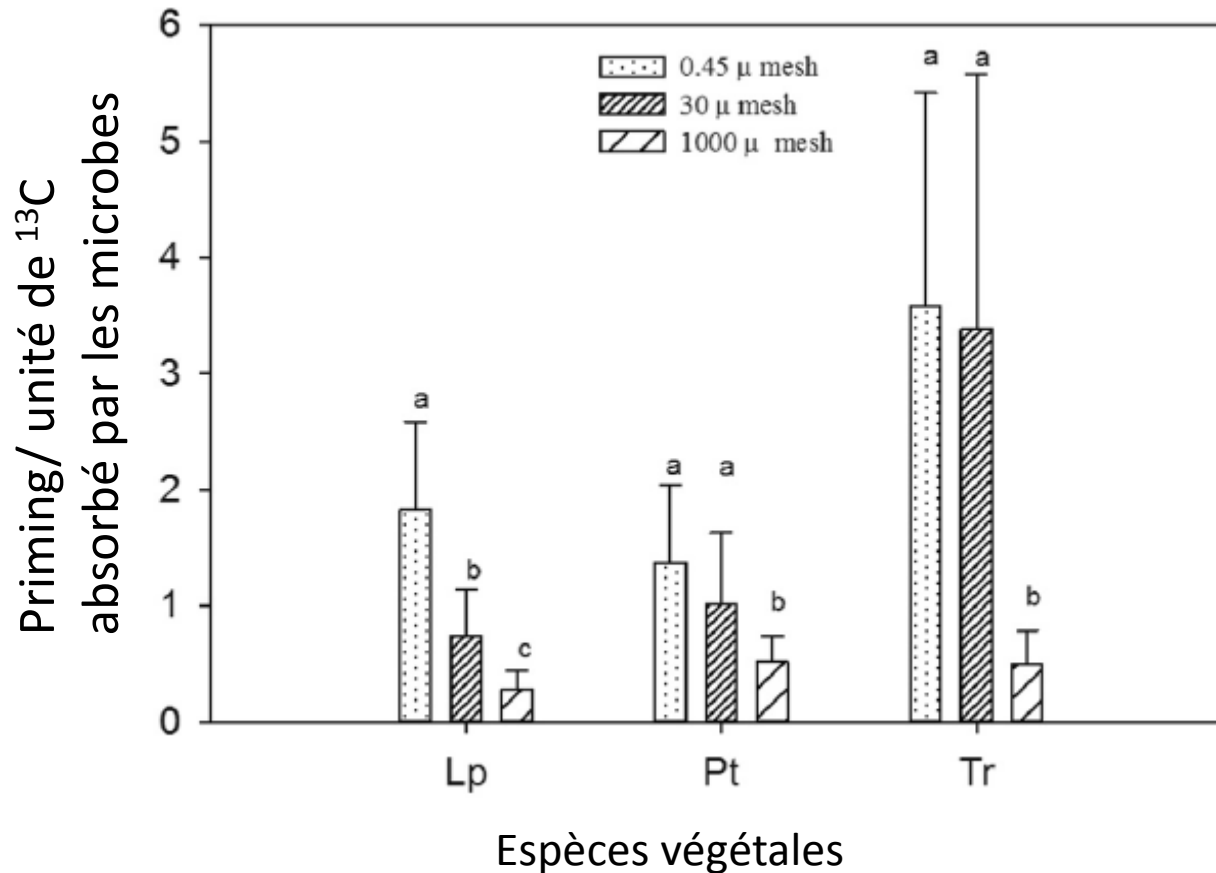
Décomposition de l'humus



Shahzad et al., 2012

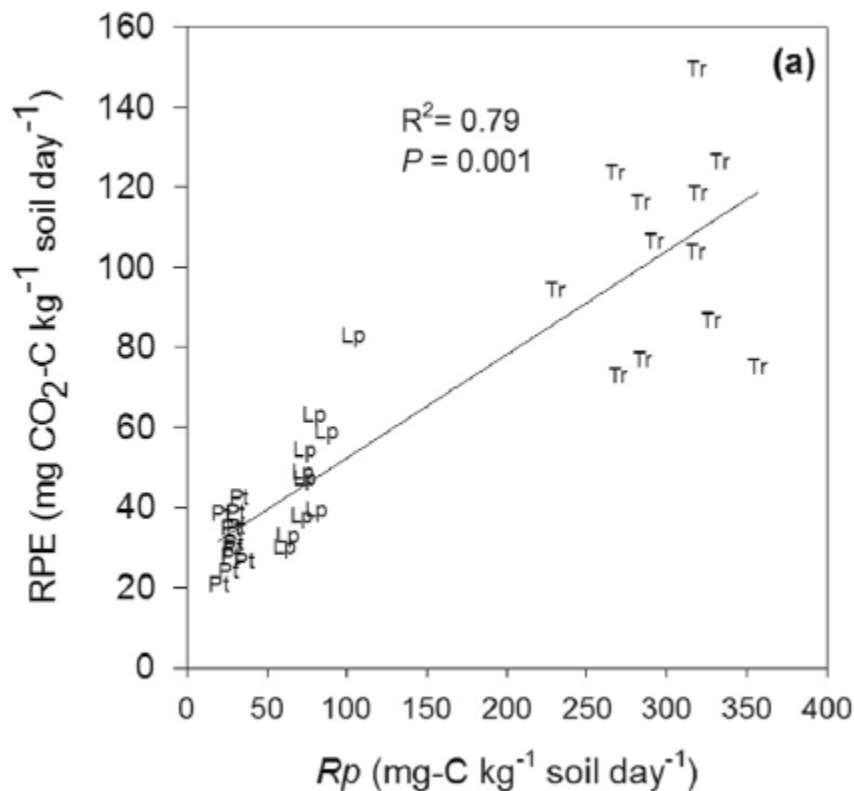
✓ Contribution majeure des exsudats

# Exsudats: une source de C très efficace pour stimuler la décomposition



# Lien entre activité photosynthétique et décomposition de l'humus

Décomposition de l'humus



Activité photosynthétique

- Suggère un ajustement entre la « demande » en nutriments des plantes et « offre » du sol dans la rhizosphère.

Shahzad et al., 2014

# Complément d'expérimentation

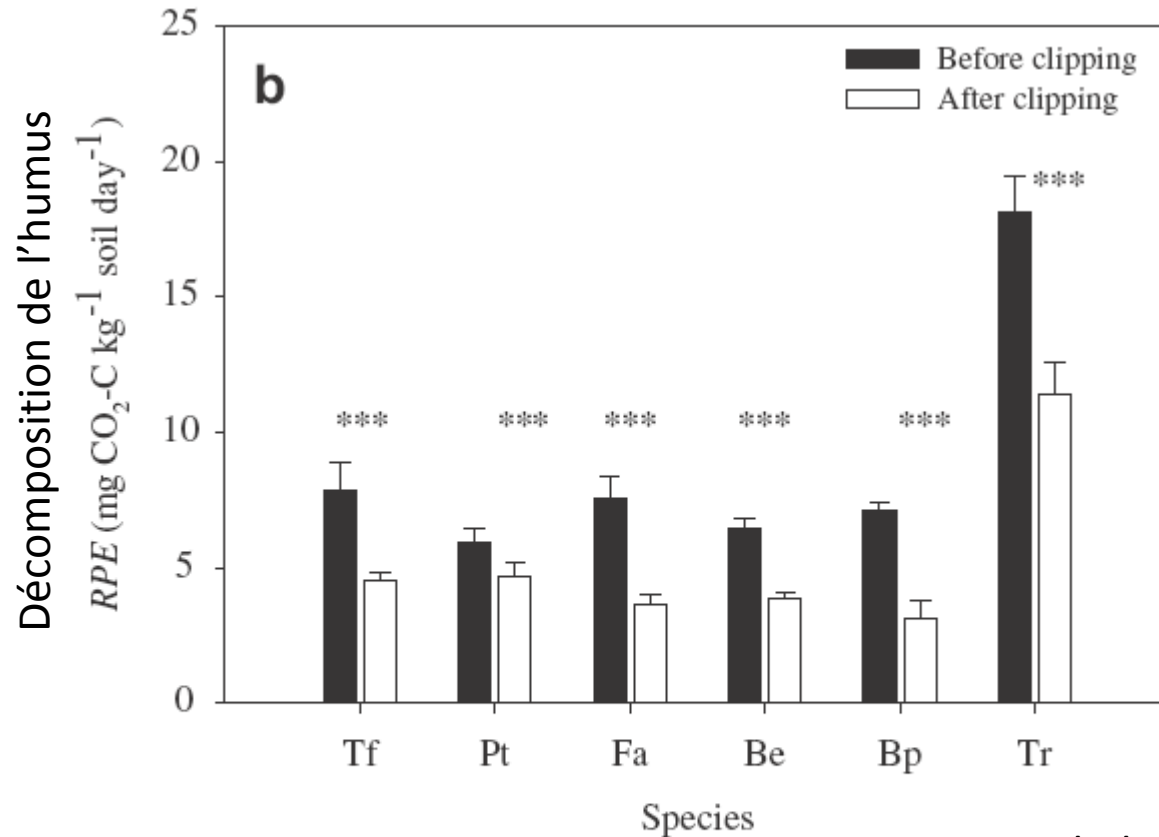
## ➤ OBJECTIFS

Y-a-t-il un ajustement offre/demande? A quelle vitesse s'opère-t-il?

## ➤ APPROCHE

- Manipulation de la demande de la plante par la coupe d'une partie de la biomasse aérienne.
- 5 graminées et 1 légumineuse (trèfle blanc) sont cultivés sont  $^{13}\text{C-CO}_2$ .

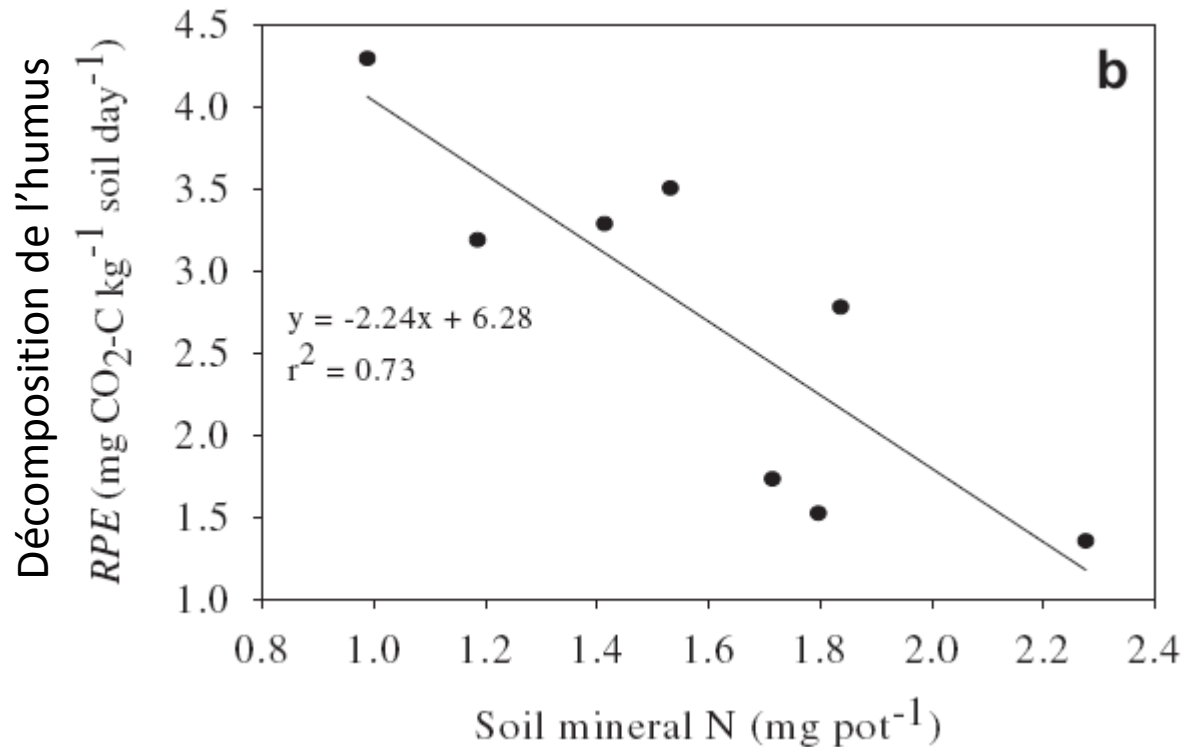
# La décomposition de l'humus réduite de moitié en 24h par la coupe des plantes.



Shahzad et al., 2012

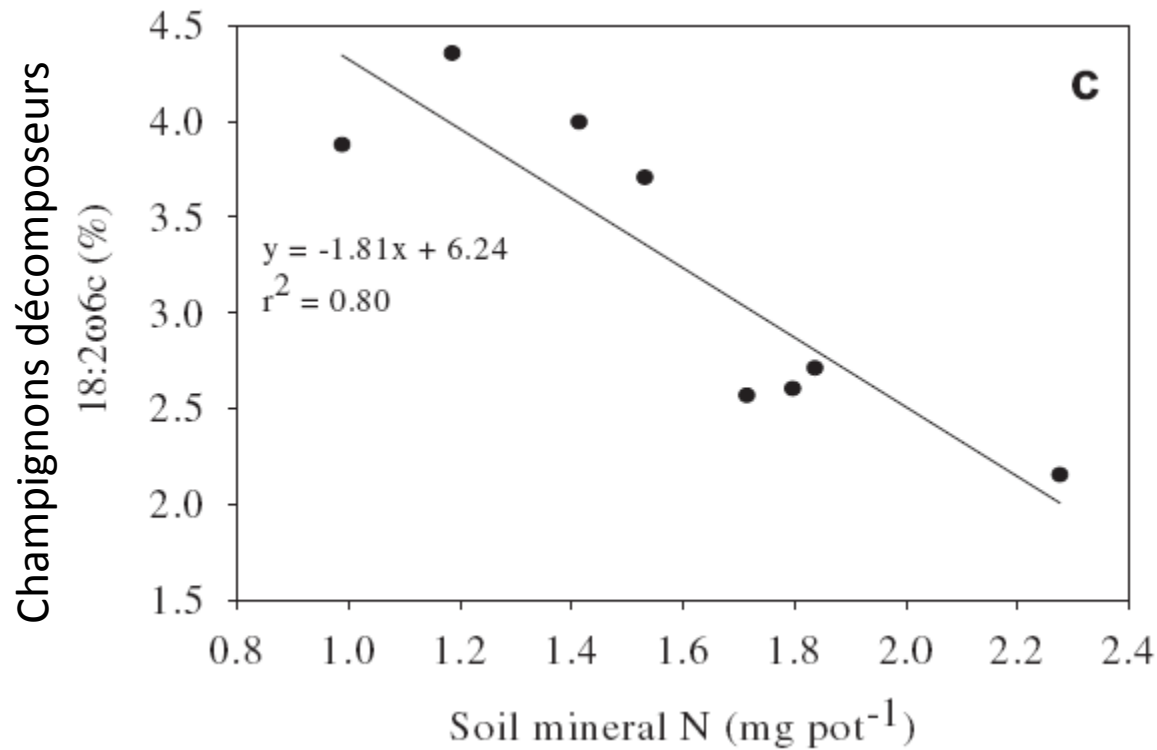
Supporte l'idée d'un ajustement « en ligne » de l'offre du sol à la demande de la plante.

# La diminution de la décomposition est expliquée par une accumulation d'N minéral dans le sol



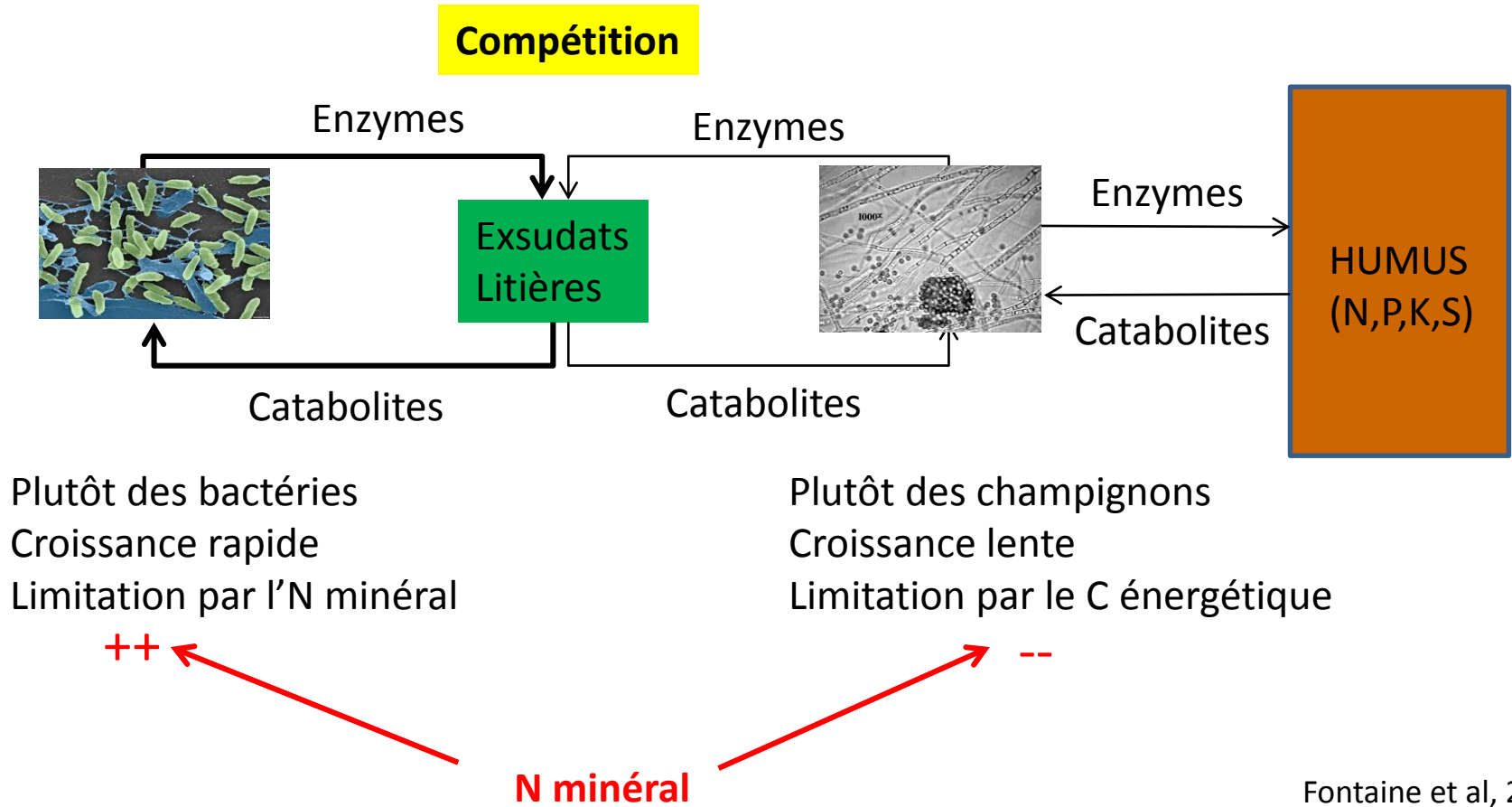
Shahzad et al., 2012

# N inhibant les champignons impliqués dans la décomposition de l'humus





# La décomposition de l'humus sous le contrôle d'une compétition microbienne



- *Conséquences de ces avancées pour la modélisation*

# Les modèles de sol actuels

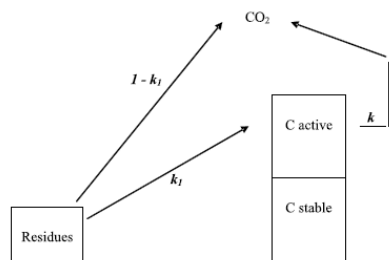


Figure 1 - Diagram of the three-compartment model of soil C evolution.  $k_1$  = crop residues humification coefficient.  $k$  = annual coefficient of mineralization of active SOM.

Hénin Dupuis

Cantis

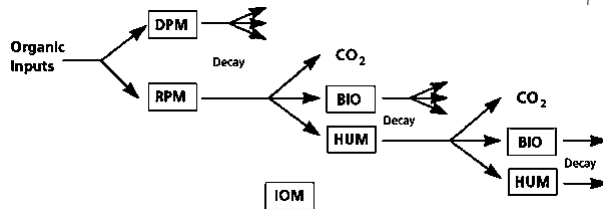
Daisy

Jenny

SOMM

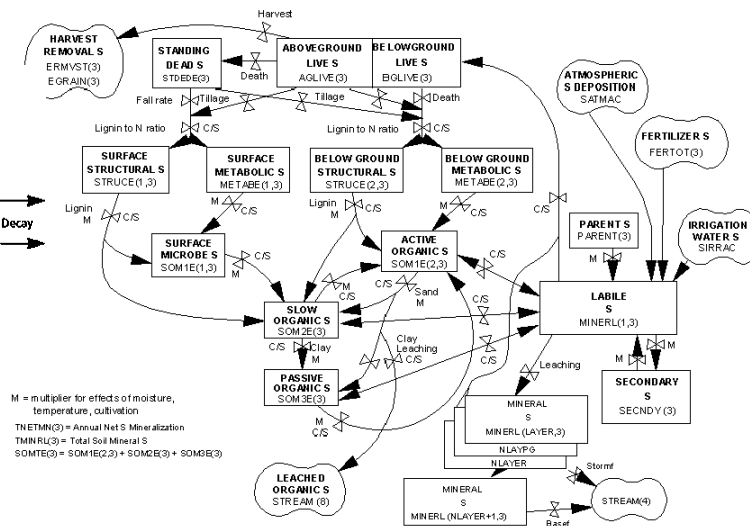
VVV

ITE



Roth C

DNDC

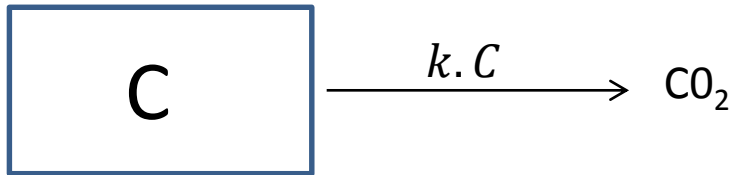


M = multiplier for effects of moisture, temperature, cultivation  
 TNETH(3) = Annual Net S Mineralization  
 TMINRL(3) = Total Soil Mineral S  
 SOMTE(3) = SOMTE(2,3) + SOMDE(3) + SOMBE(3)

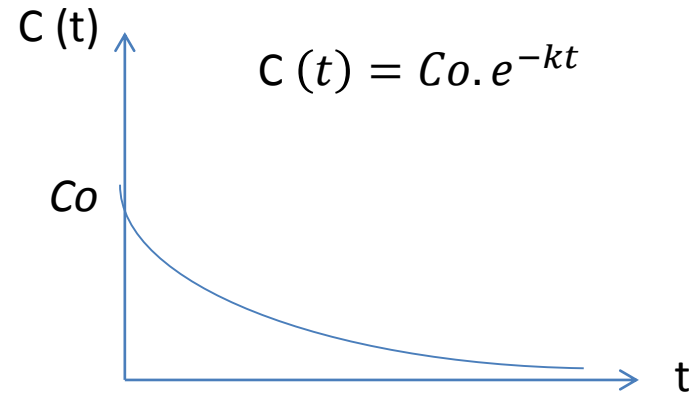
Century

Un grand nombre de modèles, mais reposant sur le même « pilier »...

# Modélisation de la décomposition



$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C$$



- La décomposition est limitée par la quantité de substrat (pas les microorganismes).
- La décomposition est un processus continu. Pas stockage permanent du C.

# Modèle de dynamique du C du sol

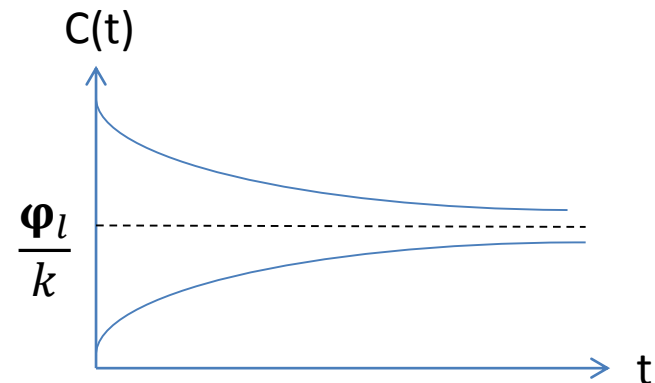


$$C(t) = \frac{\Phi_l}{k} + (C_0 - \frac{\Phi_l}{k})e^{-kt}$$

$$\frac{dC}{dt} = \Phi_l - k.C$$

✓ A l'équilibre ( $\frac{dC}{dt} = 0$ )

$$C^* = \frac{\Phi_l}{k}$$



- Le pool de C du sol tend toujours vers un équilibre
- La capacité de stockage de C des sols est limitée

# Ces modèles sont-ils pertinents?

Vis-à-vis de leur fondement.

« La décomposition est limitée par la quantité de substrat et pas par les microorganismes »

OUI pour la décomposition des exsudats & litières  
NON pour l'humus.

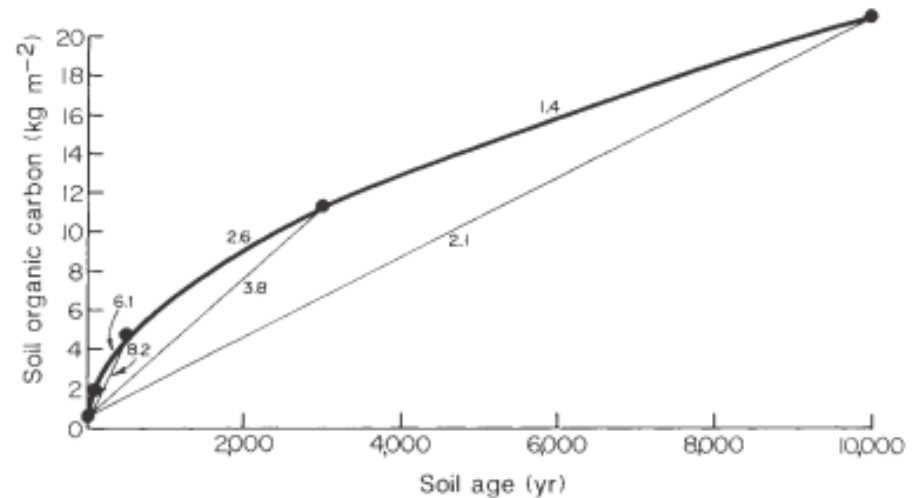
# Ces modèles sont-ils pertinents?

## Vis-à-vis de leurs prévisions.

Pas mauvaises à court terme dans les sols cultivés, mais à long terme dans les écosystèmes...

TABLE 3. Altamira Soil Profile

Lab code (CENA-)	Sample horizon (cm)	$^{14}\text{C}$ (pMC)	$^{14}\text{C}$ (yr BP)
239	0 to 10	$103.9 \pm 0.8$	--
--	10 to 20	--	--
--	20 to 30	--	--
--	30 to 40	--	--
237	40 to 50	$84.1 \pm 0.7$	$1440 \pm 70$
--	50 to 60	--	--
--	60 to 70	--	--
236	70 to 80	$70.8 \pm 0.7$	$2790 \pm 80$
--	80 to 90	--	--
233	90 to 100	$63.5 \pm 0.7$	$3640 \pm 90$
--	100 to 110	--	--
232	110 to 120	$55.0 \pm 0.6$	$4800 \pm 80$

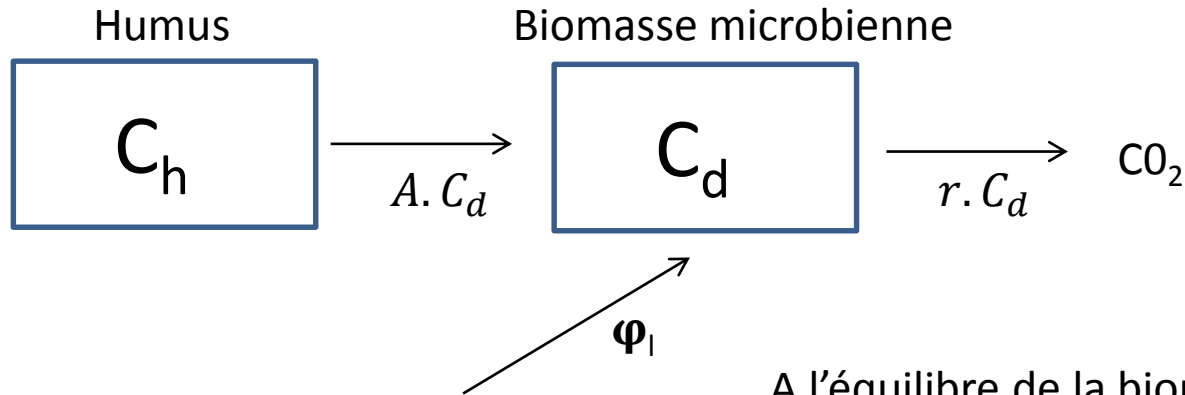


La décomposition peut « s'arrêter »

Pas d'équilibre pour le pool de C du sol dans les écosystèmes.

# Modèle alternatif: couplage des flux de C à l'écologie microbienne

- Modèle de décomposition de l'humus



$$\frac{dC_h}{dt} = -A \cdot C_d$$
$$\frac{dC_d}{dt} = (A - r)C_d + \varphi_l$$

A l'équilibre de la biomasse microbienne:

$$\left(\frac{dC_h}{dt}\right)^* = -A \cdot C_d^*$$

$$C_d^* = \frac{\varphi_l}{r - A}$$

En l'absence de dépôts de C énergétique, la décomposition de l'humus s'arrête.

Fontaine & Barot 2005

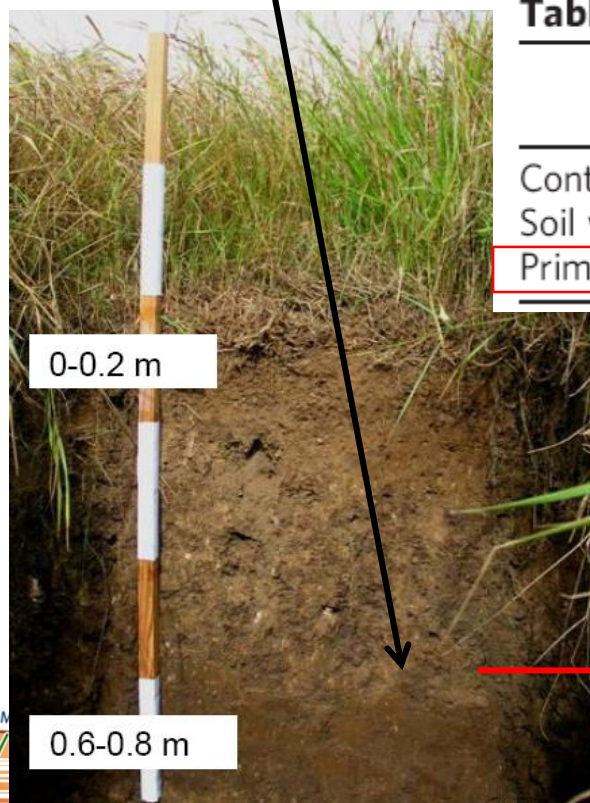


# Test du modèle

**Hyp:** la stabilité de l'humus dans les horizons profonds sur des millénaires est due à l'absence de C frais (pas ou peu de racines).

**Test:** l'apport de C frais devrait réactiver la décomposition.

Cellulose marqué au  $^{13}\text{C}$  et  $^{14}\text{C}$

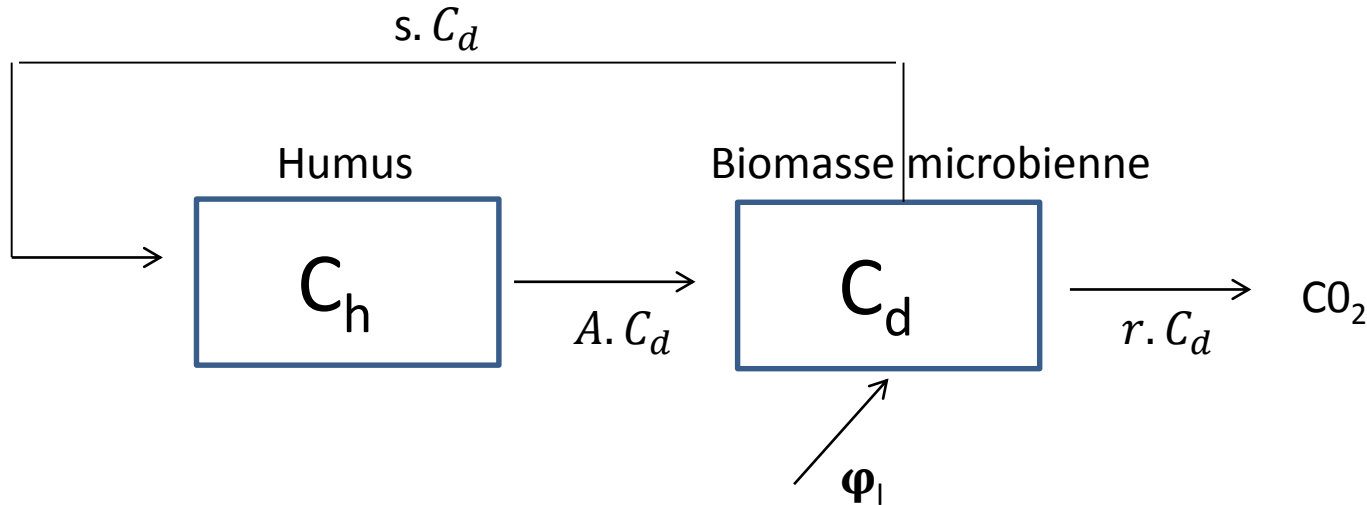


**Table 2 | Properties of unlabelled soil C released during incubation**

	Quantity (mg C kg <sup>-1</sup> )	<sup>14</sup> C activity (MC%)	<sup>14</sup> C age (yr BP)
Control soil	100 ± 4	97 ± 1.4	222 (+119/-117)
Soil with cellulose	172 ± 3	85 ± 1.6	1,329 (+154/-152)
Priming effect	72 ± 2	73 ± 2	2,567 (+226/-219)

Fontaine et al 2007

# Modèle de dynamique



$$\frac{dC_h}{dt} = (s - A)C_d$$

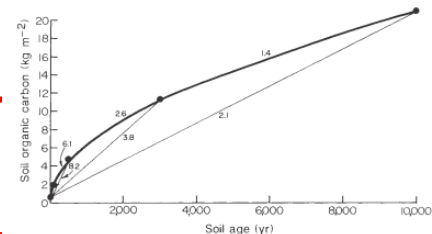
$$\frac{dC_d}{dt} = (A - s - r)C_d + \phi_l$$

A l'équilibre de la biomasse microbienne:

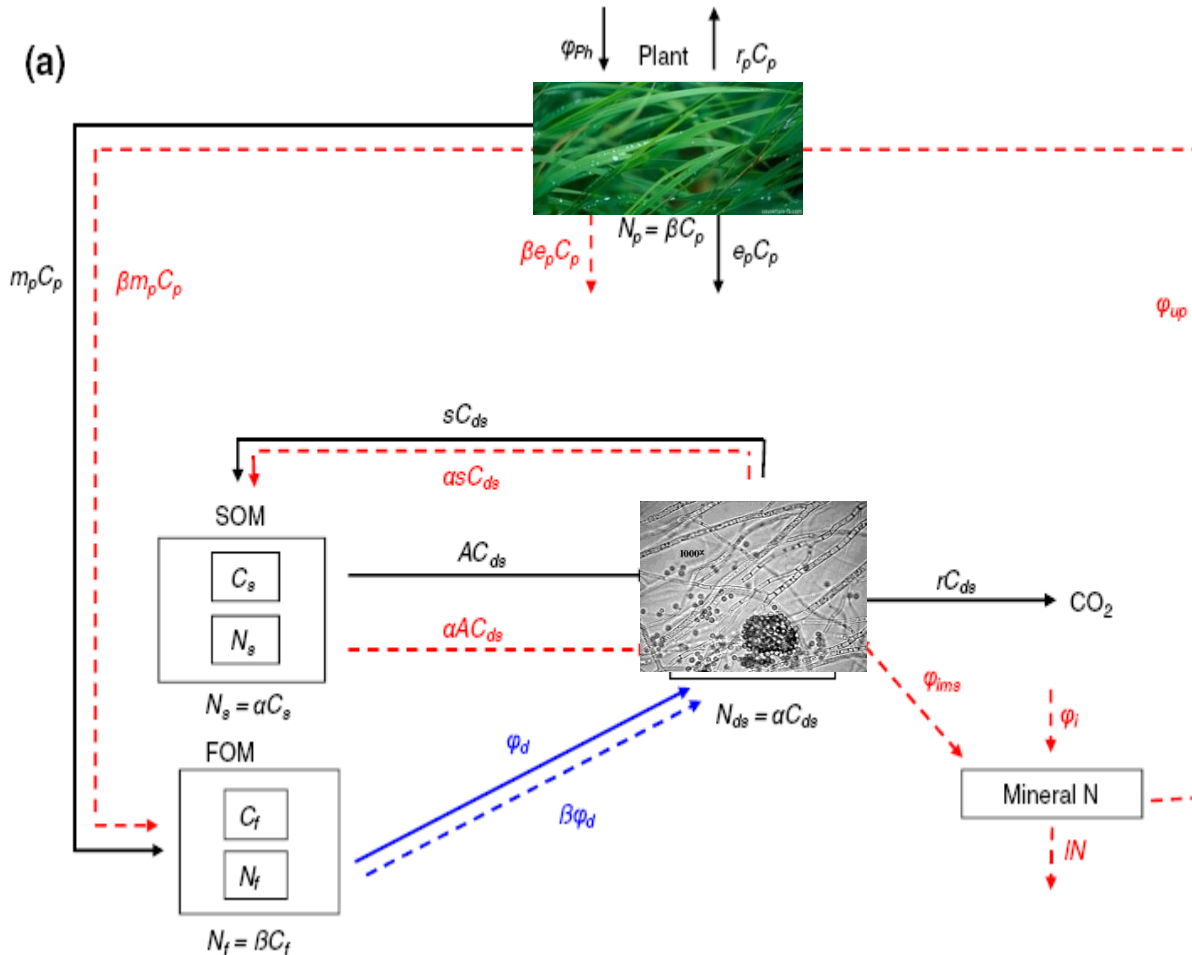
$$\left(\frac{dC_h}{dt}\right) = (s - A)C_d^*$$

$$C_d^* = \frac{\phi_l}{s+r-A}$$

- Pas d'équilibre fini du pool d'humus du sol.
- La capacité des sols à accumuler du C est potentiellement infinie.



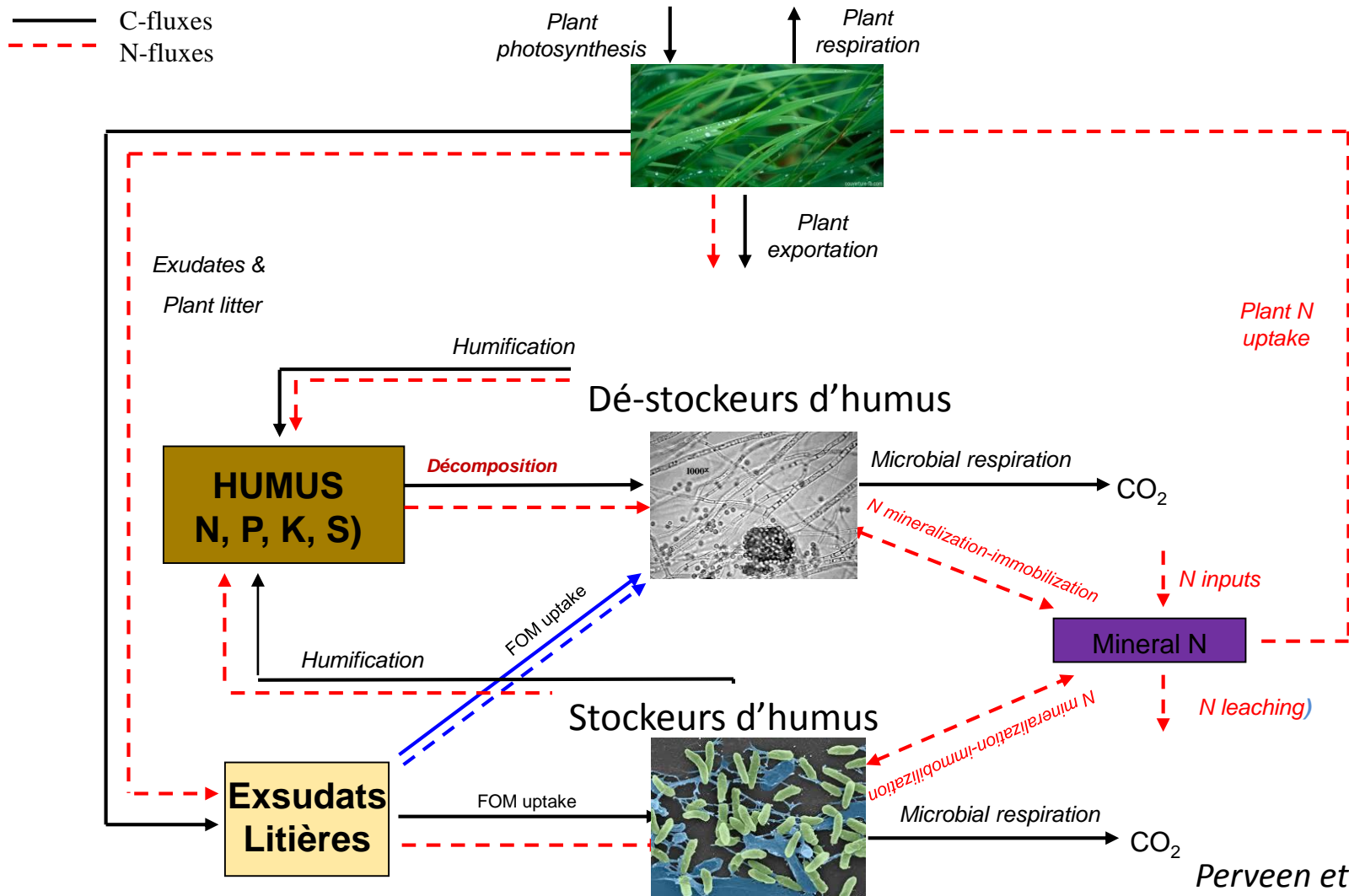
# Un peu plus compliqué...



**Modèle sol-plante  
Couplé CN  
Dommage la plante ne survit  
pas dans ce modèle...**

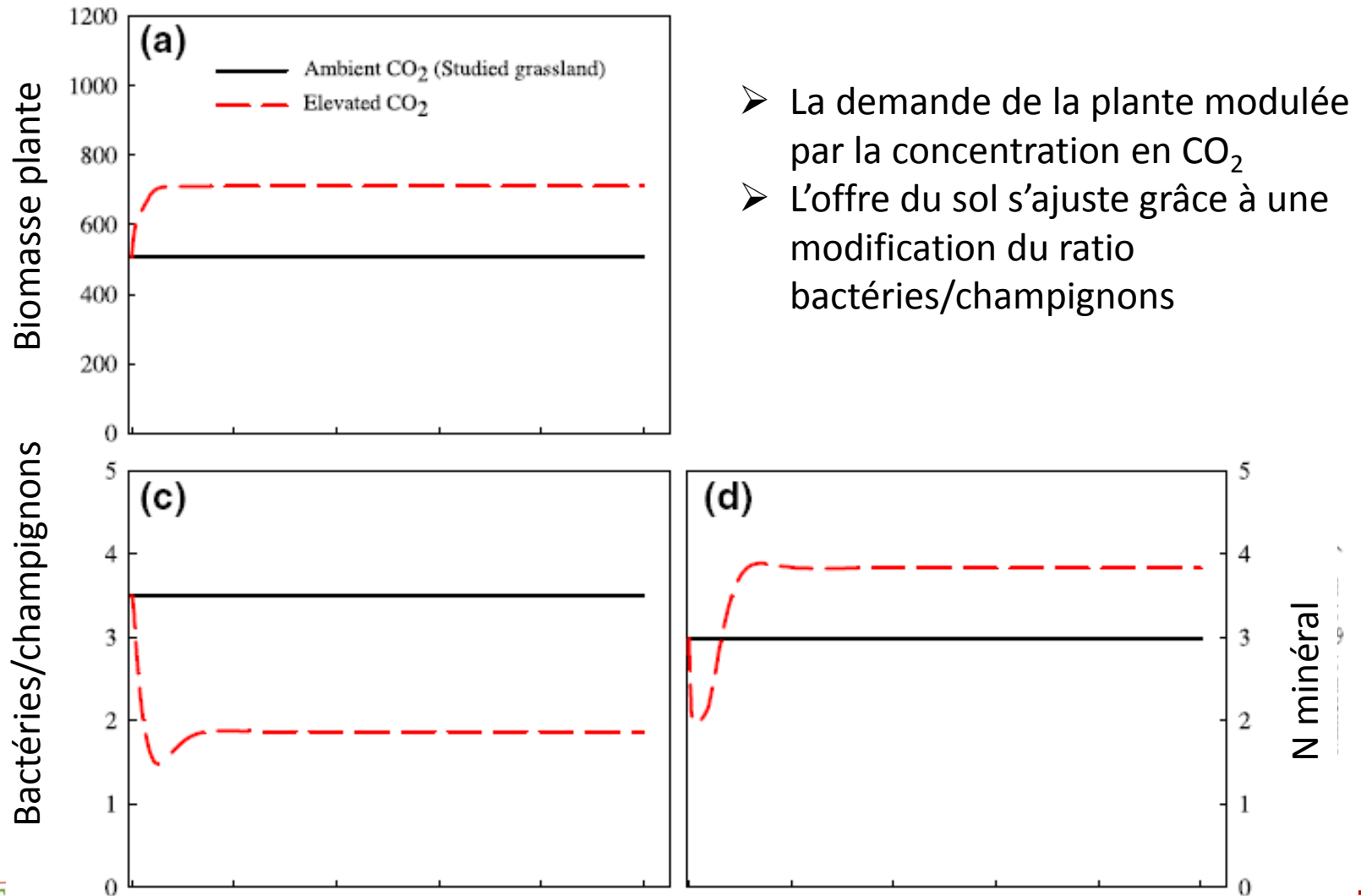
*Perveen et al. 2014*

# Modèle Symphony



Perveen et al. 2014

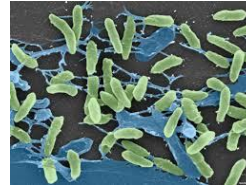
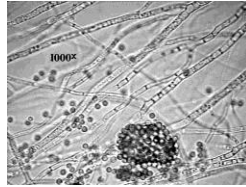
# Symphony simule la synchronisation offre/demande



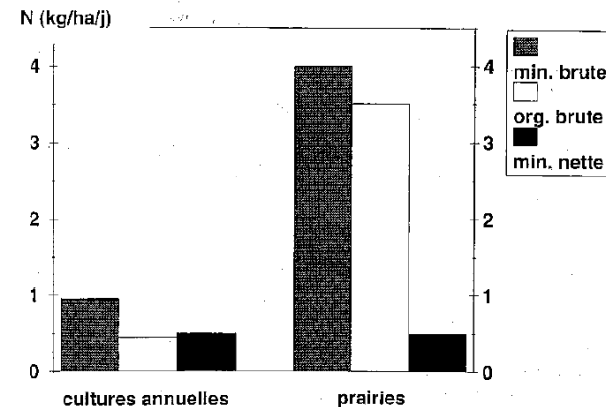
- *Quels enseignements à tirer pour la construction de nouveaux systèmes de culture?*

# La rhizosphère des plantes pérennes hébergent une diversité de régulations microbiennes

- Deux groupes de décomposeurs vont contribuer à la synchronisation offre/demande



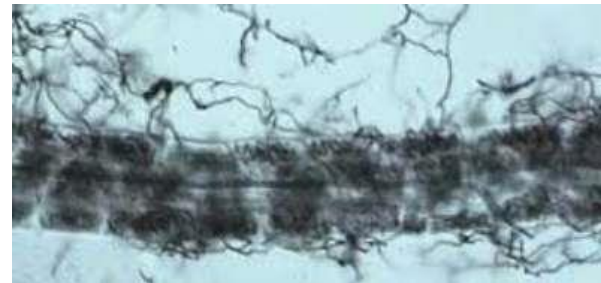
- Et la constitution des réserves organiques des sols
- Les flux d'immobilisation/minéralisation d'N pilotés par ces décomposeurs sont 4 fois plus grands sous plantes pérennes comparées à des annuelles.



Aita, 1996; Loiseau & Thiery 1992

# La rhizosphère des plantes pérennes hébergent une diversité de régulations microbiennes

- D'autres microorganismes contribuent à la synchronisation offre/demande:
  - Mycorhizes dont la biomasse et l'activité (absorption P, eau) dépendent de l'activité photosynthétique des plantes (demande)
  - Rhizobium chez les légumineuses dont la fixation du N<sub>2</sub> dépend de la disponibilité en N minéral (ici c'est la demande qui s'ajuste à l'offre).
- Et injectent des nutriments dans les cycles vivants.





# Quels enseignements à tirer pour la construction de nouveaux systèmes de culture (NSC)

- Ces régulations biologiques offre/demande nécessitent la présence de plantes pérennes
  - 4x plus de biomasse racinaire et d'exsudats. 4x plus de biomasse microbienne entretenue
  - 1 l de sol contient 1 m<sup>2</sup> surface racinaire, 100% du sol de surface est rhizosphérique (Les exsudats diffusant sur 1-4 mm)
  - Pérennité des racines laisse le temps aux symbioses de s'installer.
- Les NSC doivent intégrer des plantes pérennes ayant des forts taux d'exsudation, des mycorhizes et fixatrices de N<sub>2</sub>.

# Autres challenges concernant les NSC:

- Le couvert des espèces pérennes doit être stable (résistant aux adventices)
- Il doit permettre le succès de la culture de rente (gestion de la compétition pour les ressources)
- Nécessite un choix des espèces et une gestion adaptés: s'inspirer des règles d'assemblage des espèces établies par l'étude des milieux naturels.
- La construction des NSC doit impliquer des agronomes, écologistes, des microbiologistes, des biogéochimistes (appréhension d'un système complexe) et...des agriculteurs AC ou agribio (Connaître leurs expériences, moyens opérationnels, faisabilité technique et économique).