

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

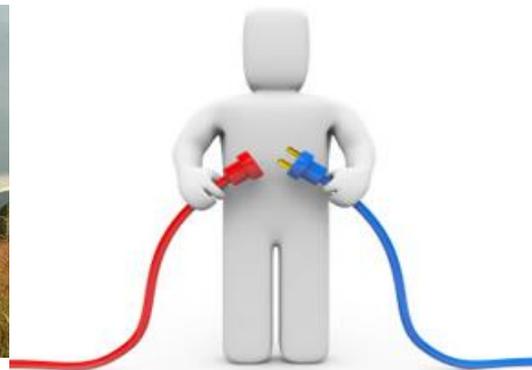


Modélisation

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

Depuis 2016, une autre ambition

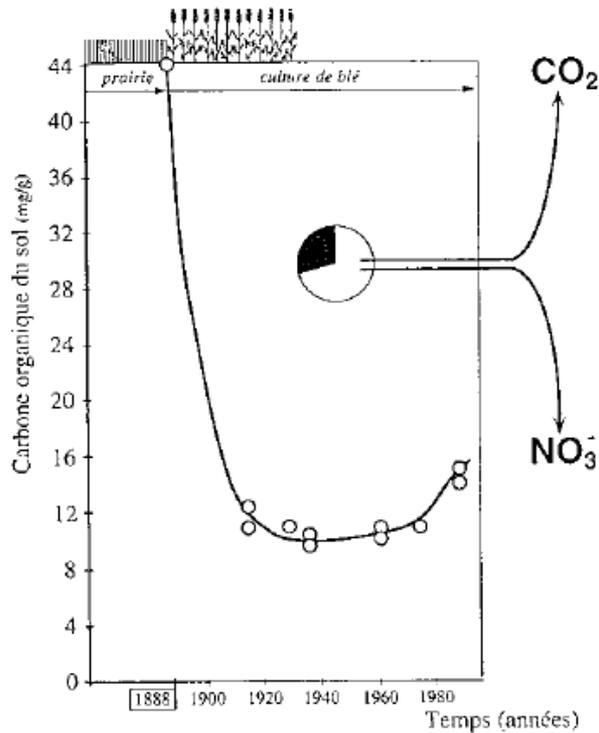
- Contribuer à la création de nouveaux systèmes de culture inspirés du fonctionnement vertueux des prairies (Agroécologie).
- Réinjecter de la régulation biologique dans les cultures



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



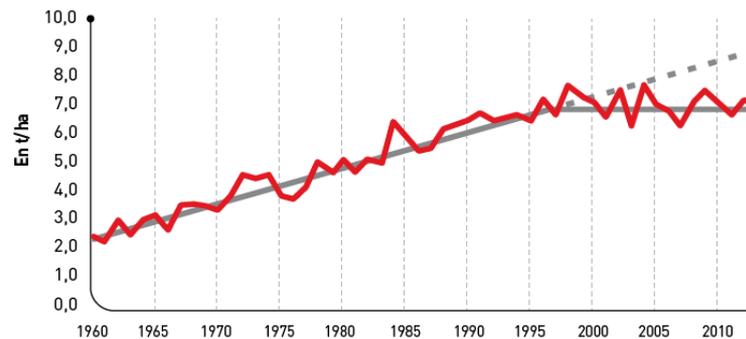
Source : Gis Sol, 2013 – d'après Meersmans *et al.*, 2012. Traitements : SOeS, 2013.

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.

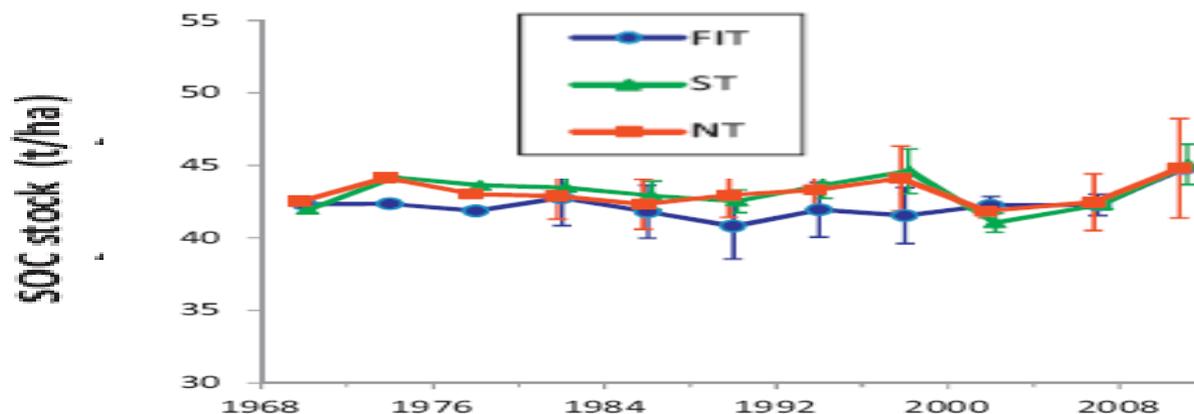
Évolution des rendements du blé tendre en France



- Emissions de gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O) 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

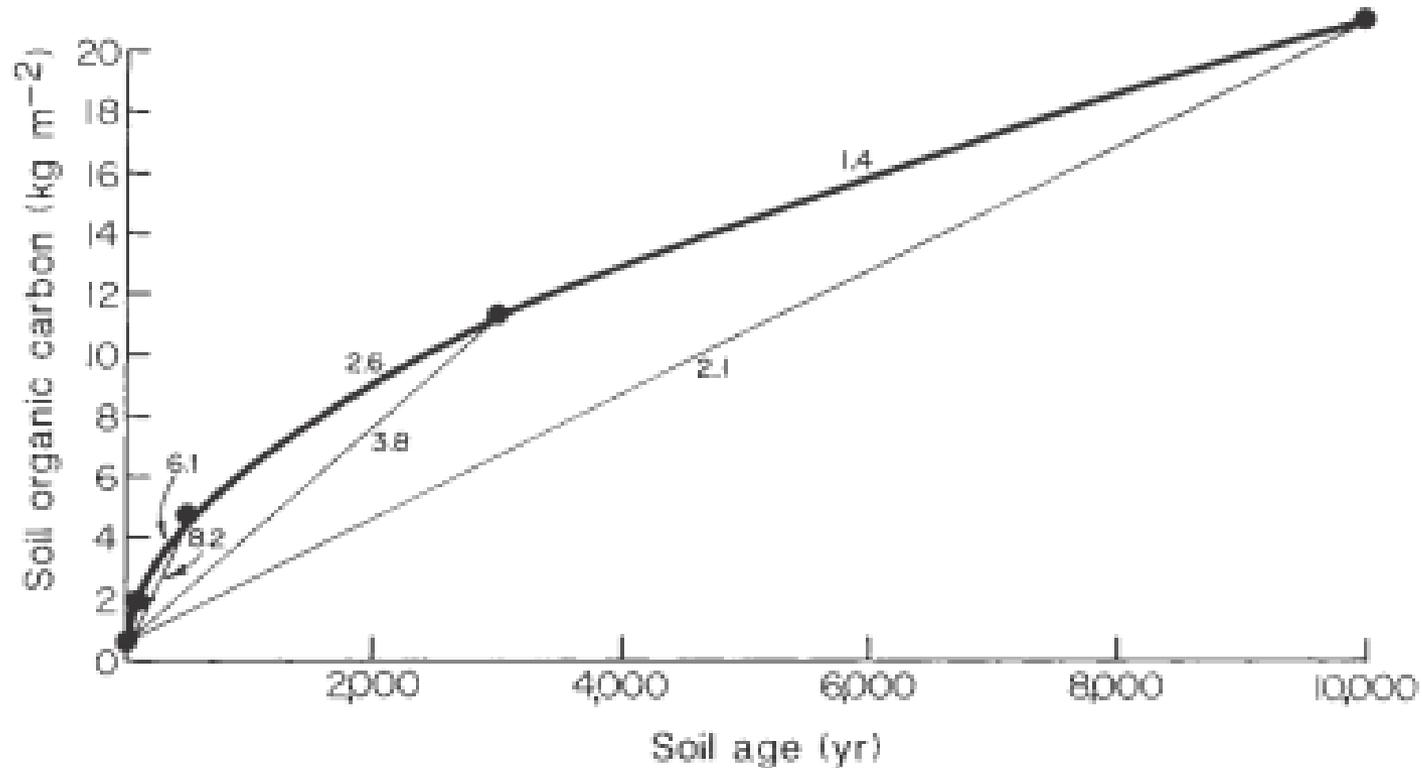
Les prairies permanentes: un écosystème diversifié et productif



- 60 à 130 espèces végétales

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

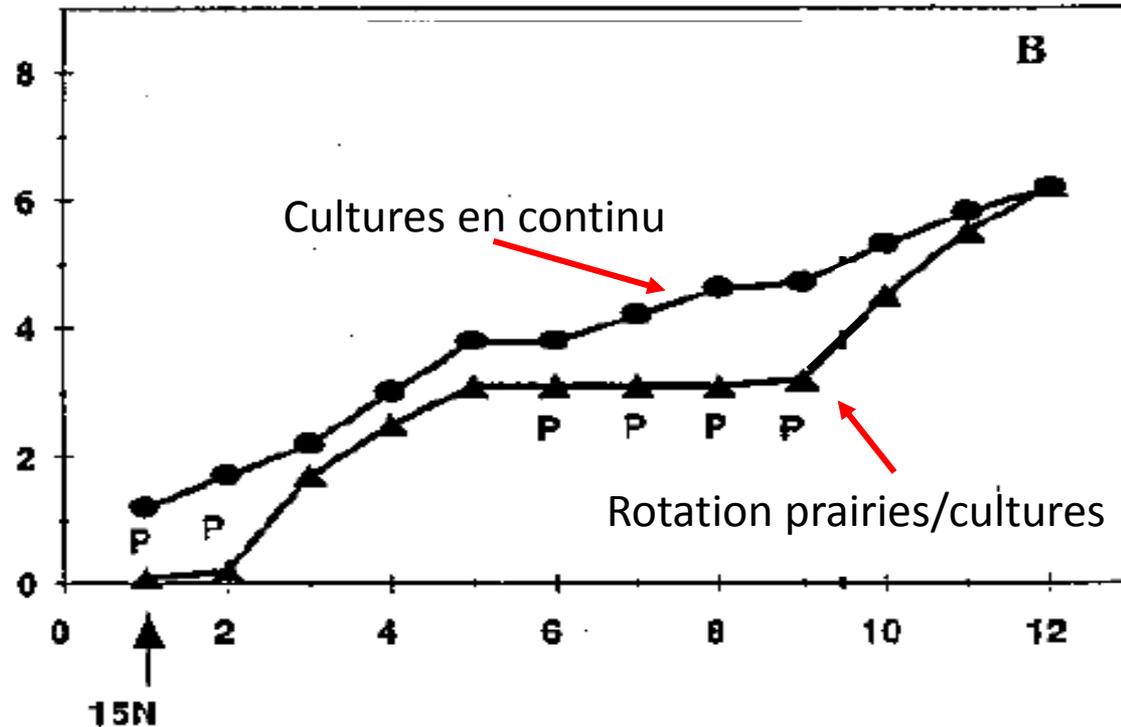
Accumulation continue de MOS



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

Un cycle des nutriments fermés

^{15}N lessivé (%apport)

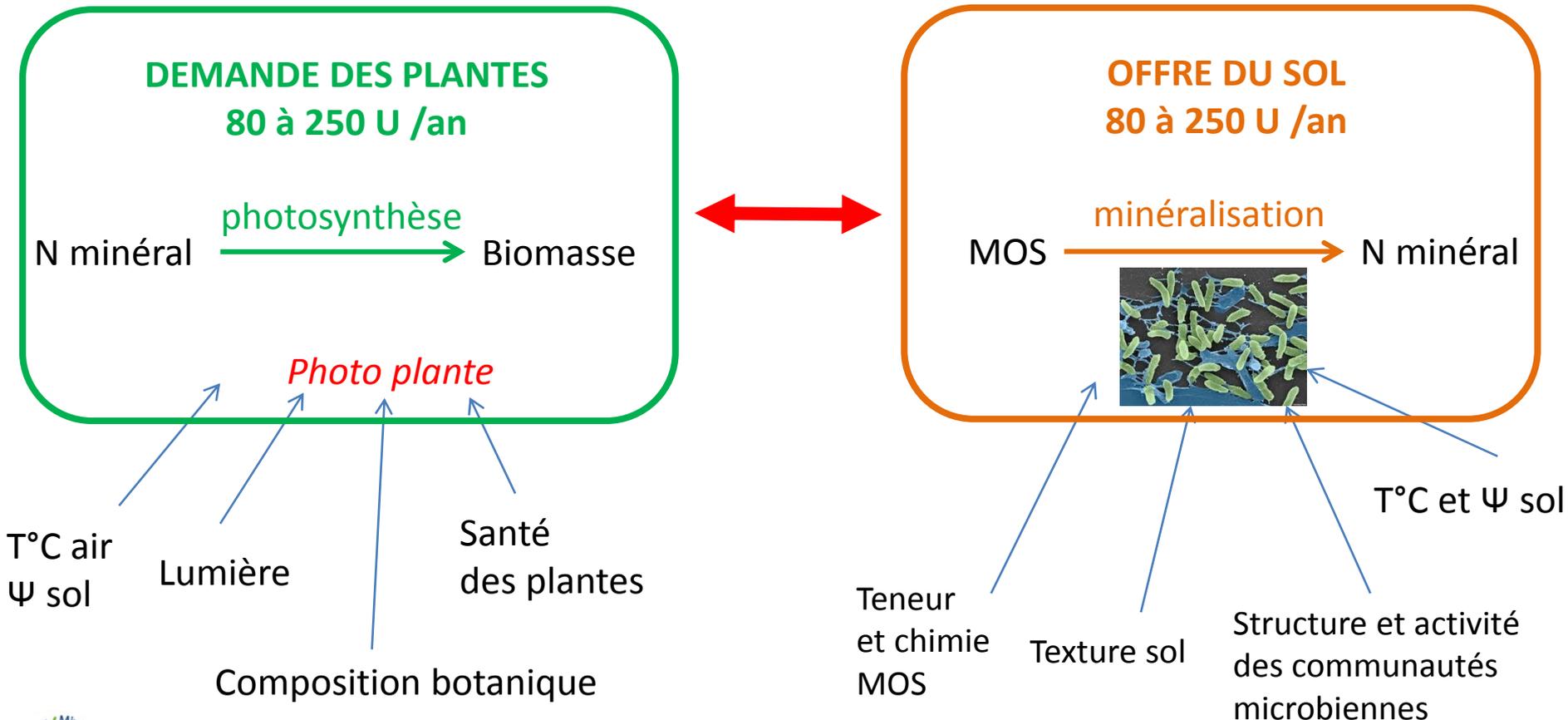


- En prairies: pas/peu de lessivage d' N , pertes par voies gazeuses 3x plus faibles qu'en cultures.

Triboi & Loiseau, 1996

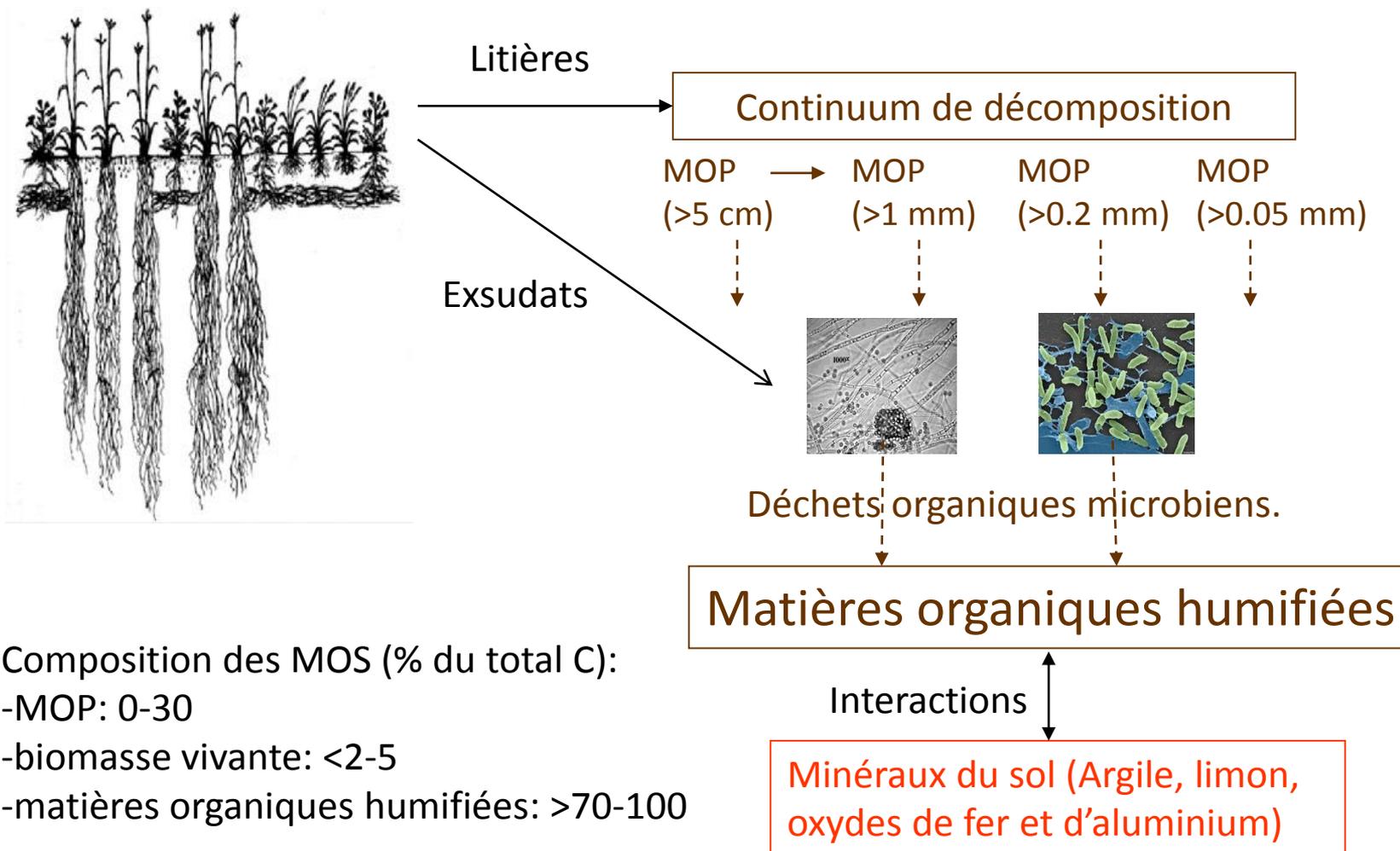
Paradoxe de la synchronisation entre l'offre et la demande dans les prairies

Synchronisation quasi parfaite (< 5% perte)



- *Petite plongée dans les processus du sol*

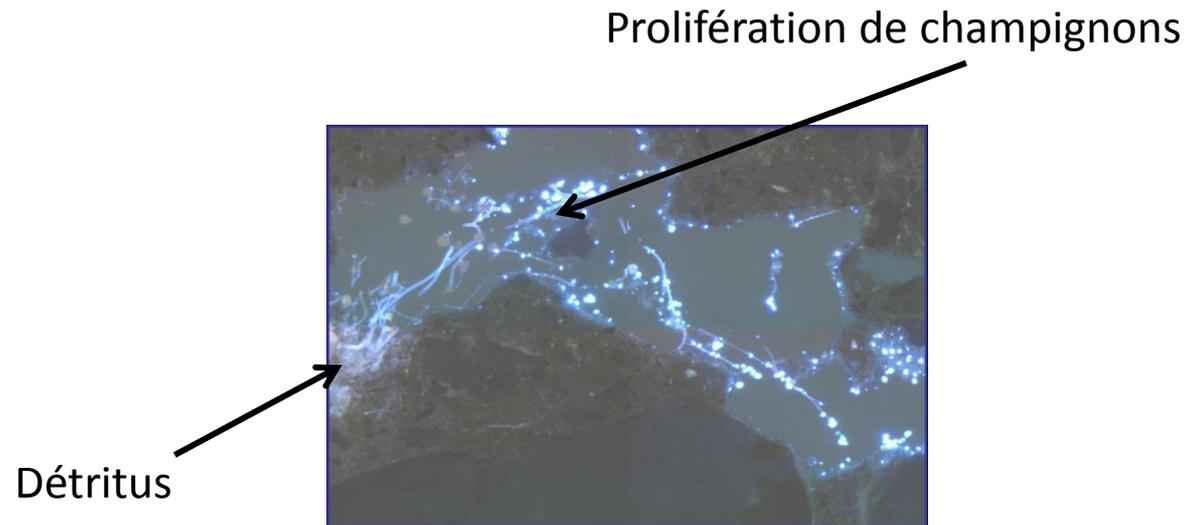
Formation des MOS



- Composition des MOS (% du total C):
- MOP: 0-30
 - biomasse vivante: <2-5
 - matières organiques humifiées: >70-100

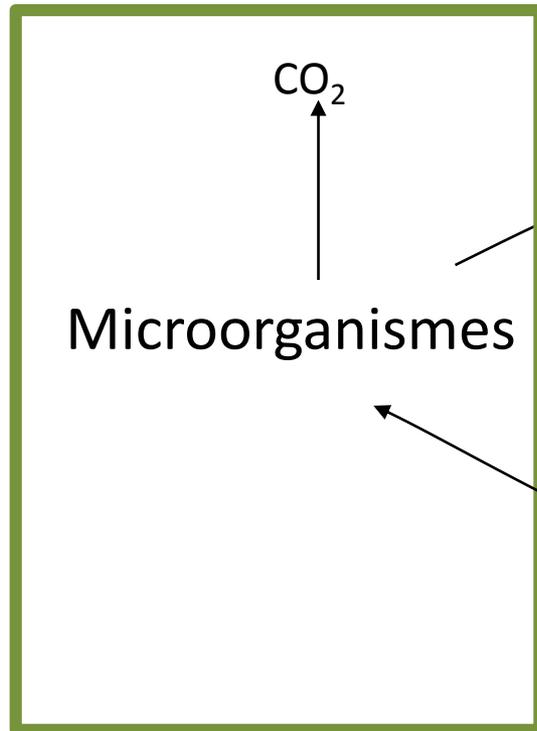
Distribution des microorganismes dans le sol.

- 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.

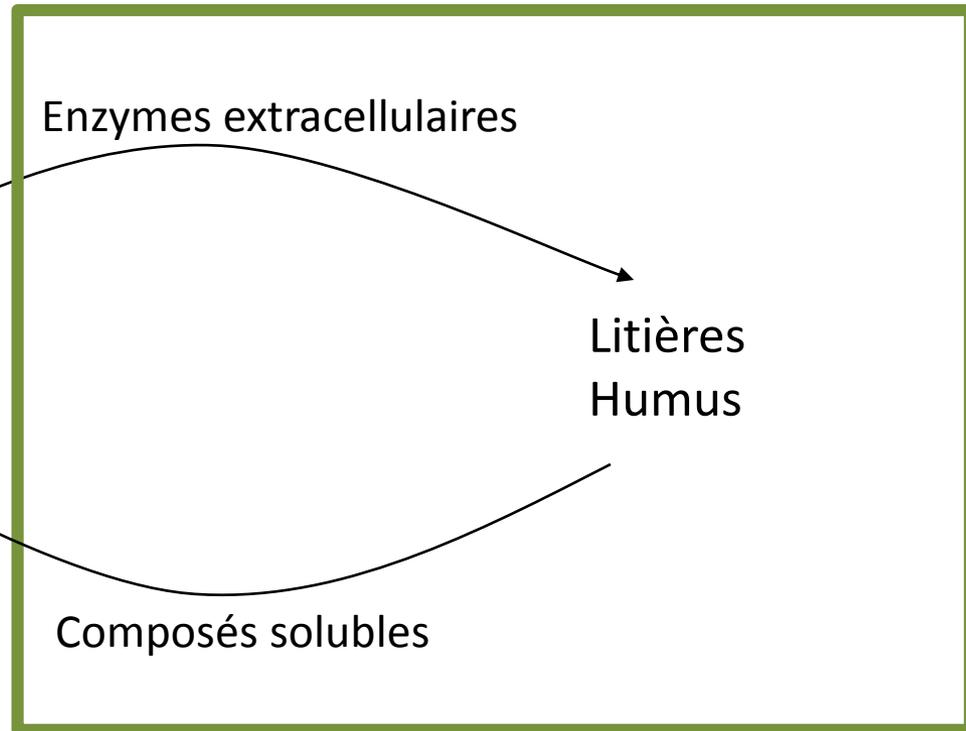


Les deux étapes de la décomposition des MOS

2. Respiration (intra)



1. Solubilisation (extra)



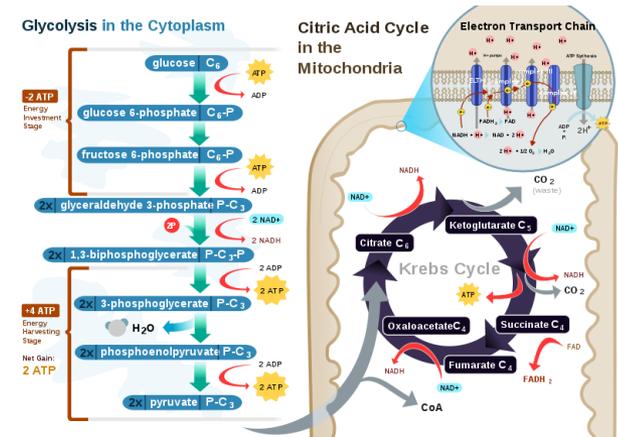
L'activité microbienne du bilan gain-dépenses

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.

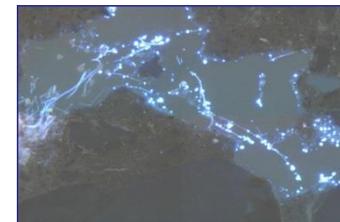


Persistance de l'humus dans les sols: un problème d'accessibilité et d'énergie

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

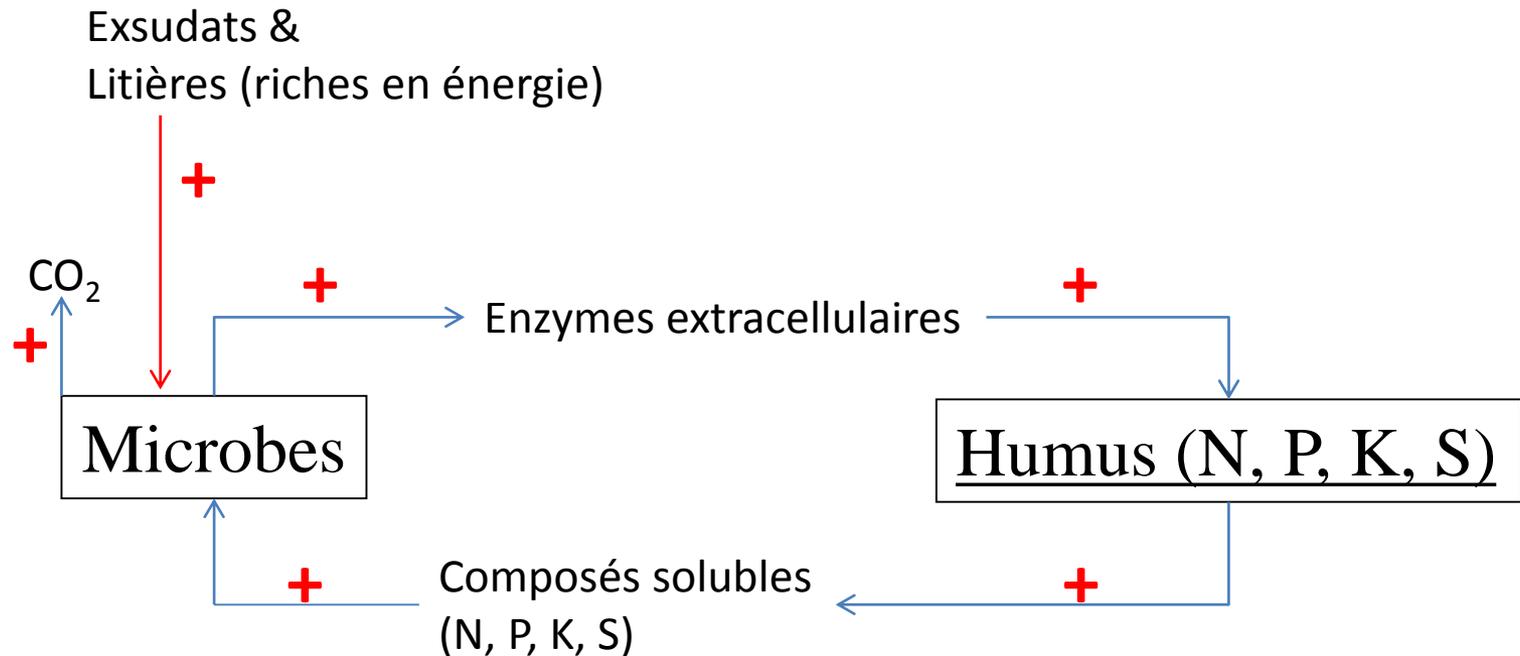


- La décomposition de l'humus est bloquée car
 - molécules pauvres en énergie (pauvre en H et riche en O)
 - dispersé dans les pores du sol dont la majorité n'est pas accessible
 - requiert une diffusion longue des enzymes qui sont inactivées
 - Bilan gains/dépenses pour les microbes négatif



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

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

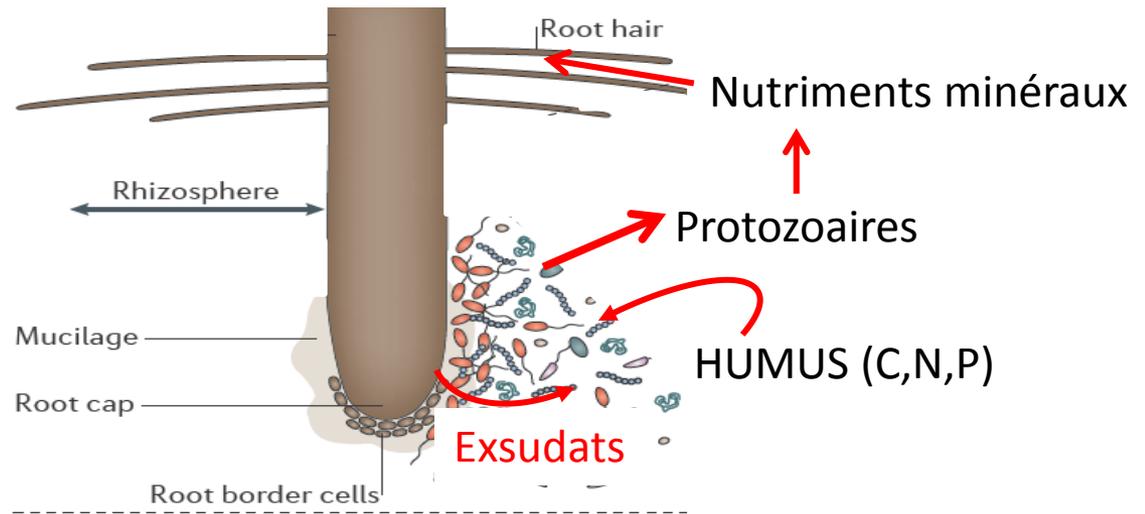


L'incorporation d'exsudats ou de litières accélère la minéralisation d'humus, un effet appelé « priming »

Fontaine et al, 2003; 2004.

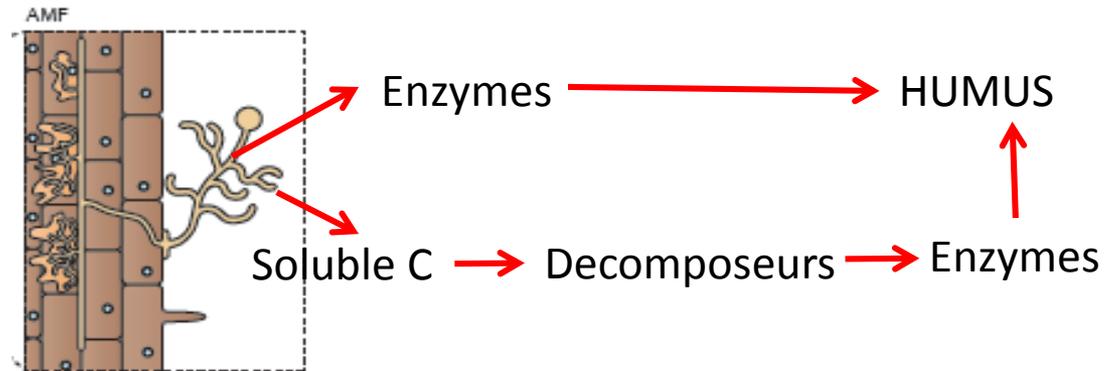
Plusieurs voies de stimulation possibles:

1) Via les exsudats

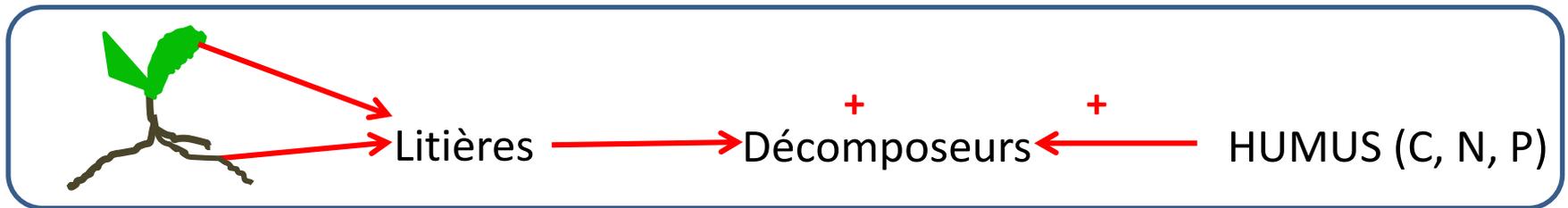


Clarholm, 1985; Kuzyakov, 2012; Cheng et al., 2012

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

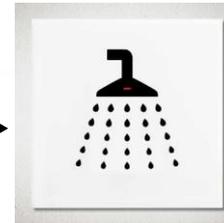
- Quantifier la stimulation induit par les plantes pérennes des prairies.
- Séparer la contribution des exsudats, des mycorhizes et des dépôts de litières
- *Lolium perenne*, *Poa trivialis* and *Trifolium repens* ont été cultivées sous $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$.

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

Air extérieur
(N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O)



Air « pur »
(N_2 , O_2)



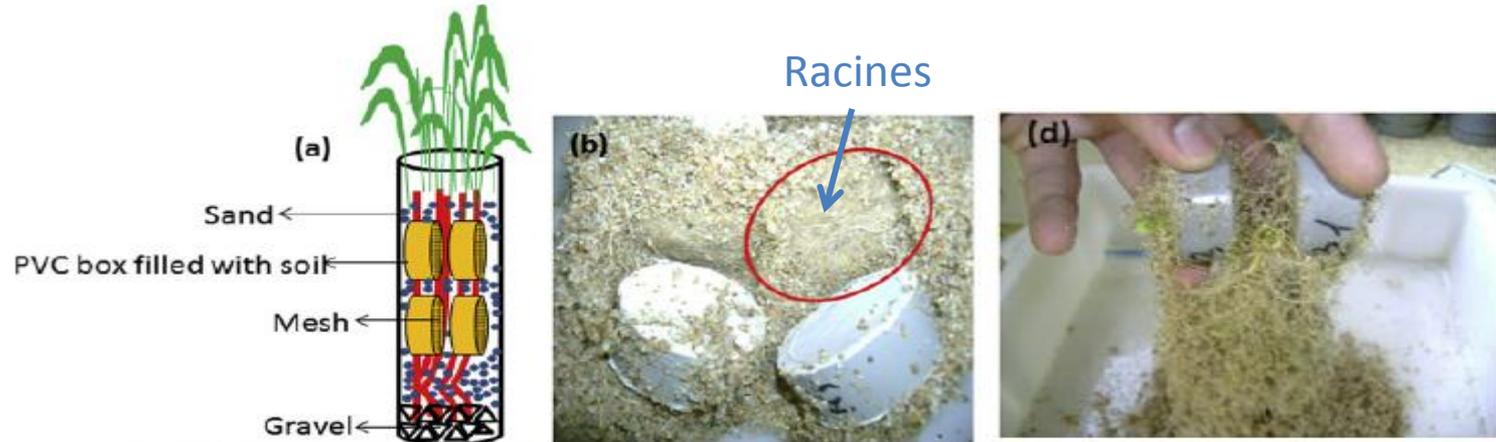
(N_2 , O_2 , H_2O)



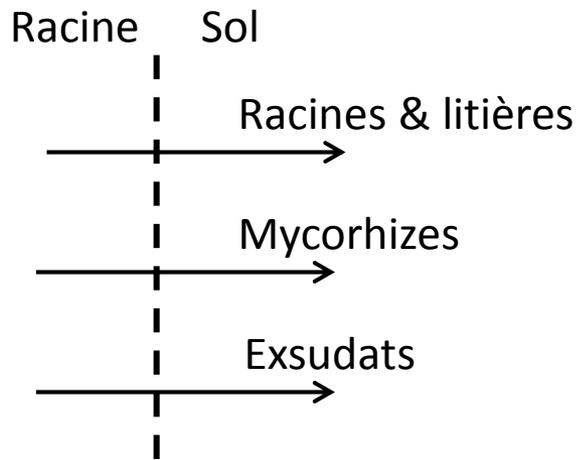
$^{13}\text{CO}_2$



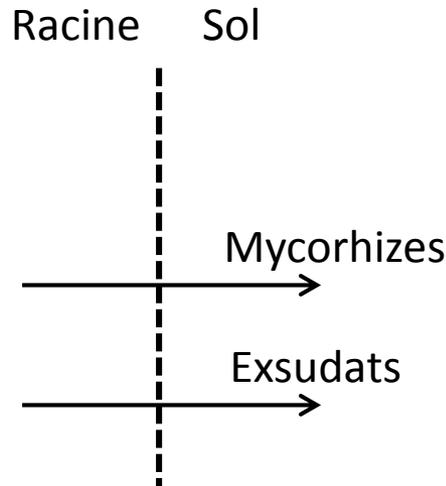
Dispositif expérimental pour séparer les processus rhizosphériques



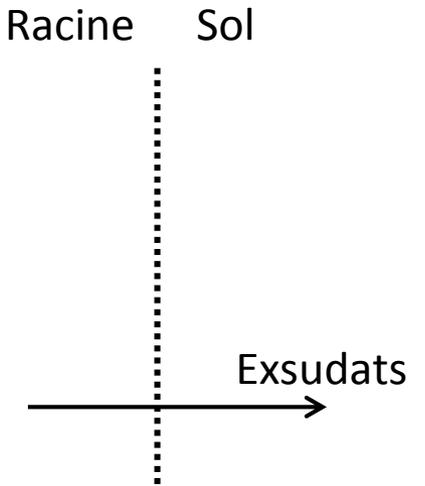
Filet large (1 mm)



Filet intermédiaire (30 µm)

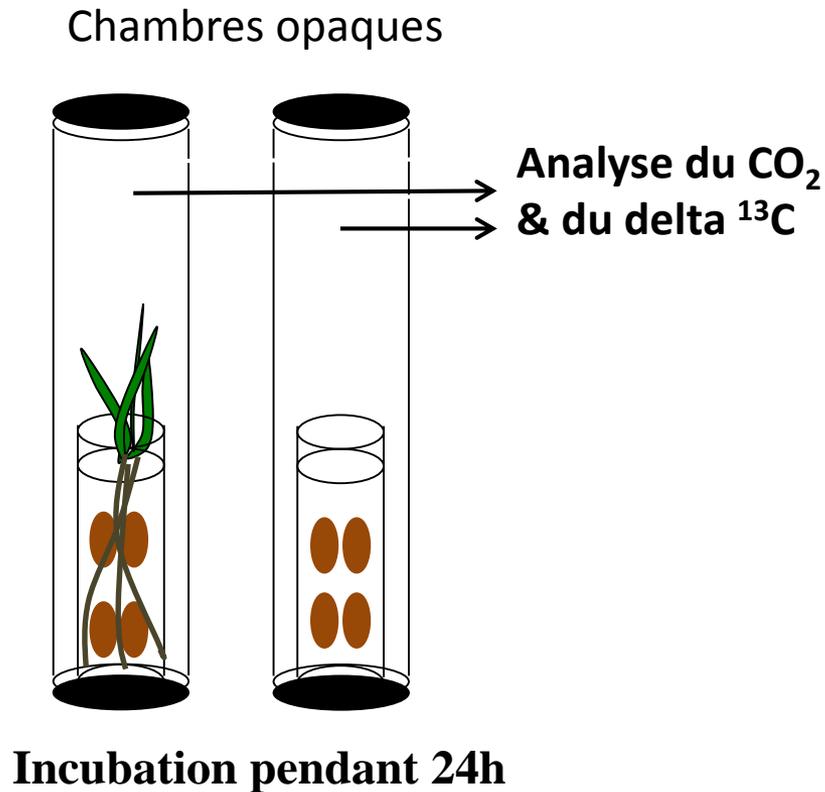


Filet fin (0.45 µm)

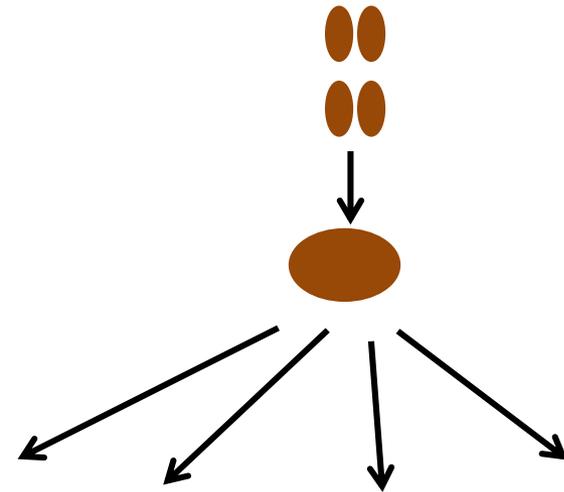


Analyses gaz et sols

Mesures respiration



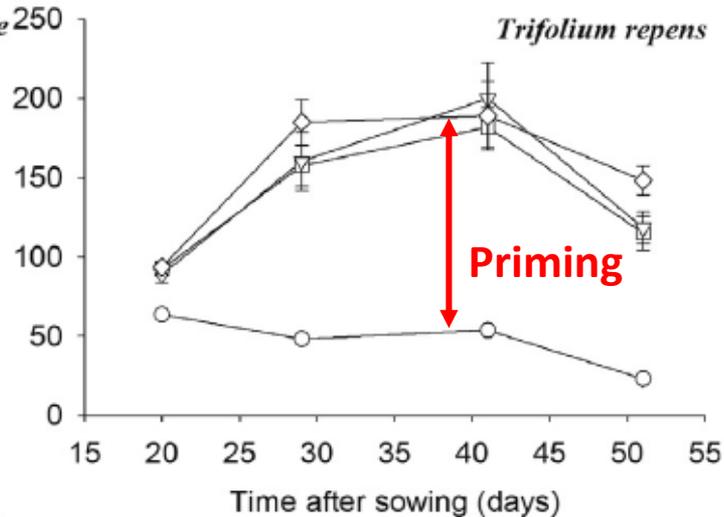
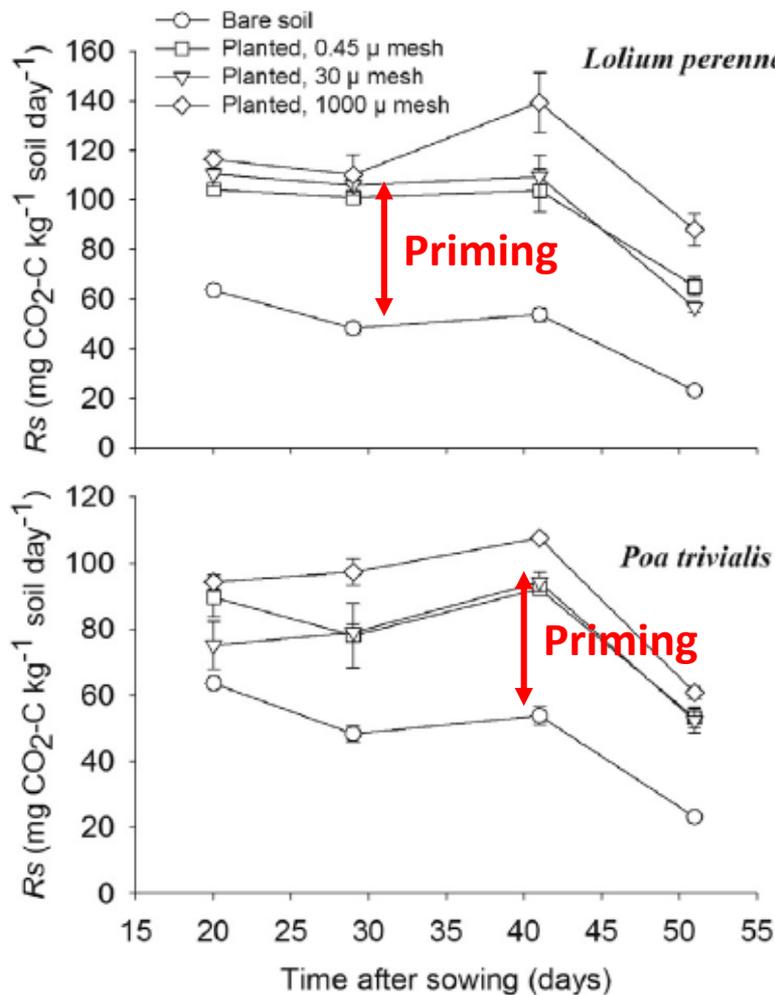
Récoltes destructives



- 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

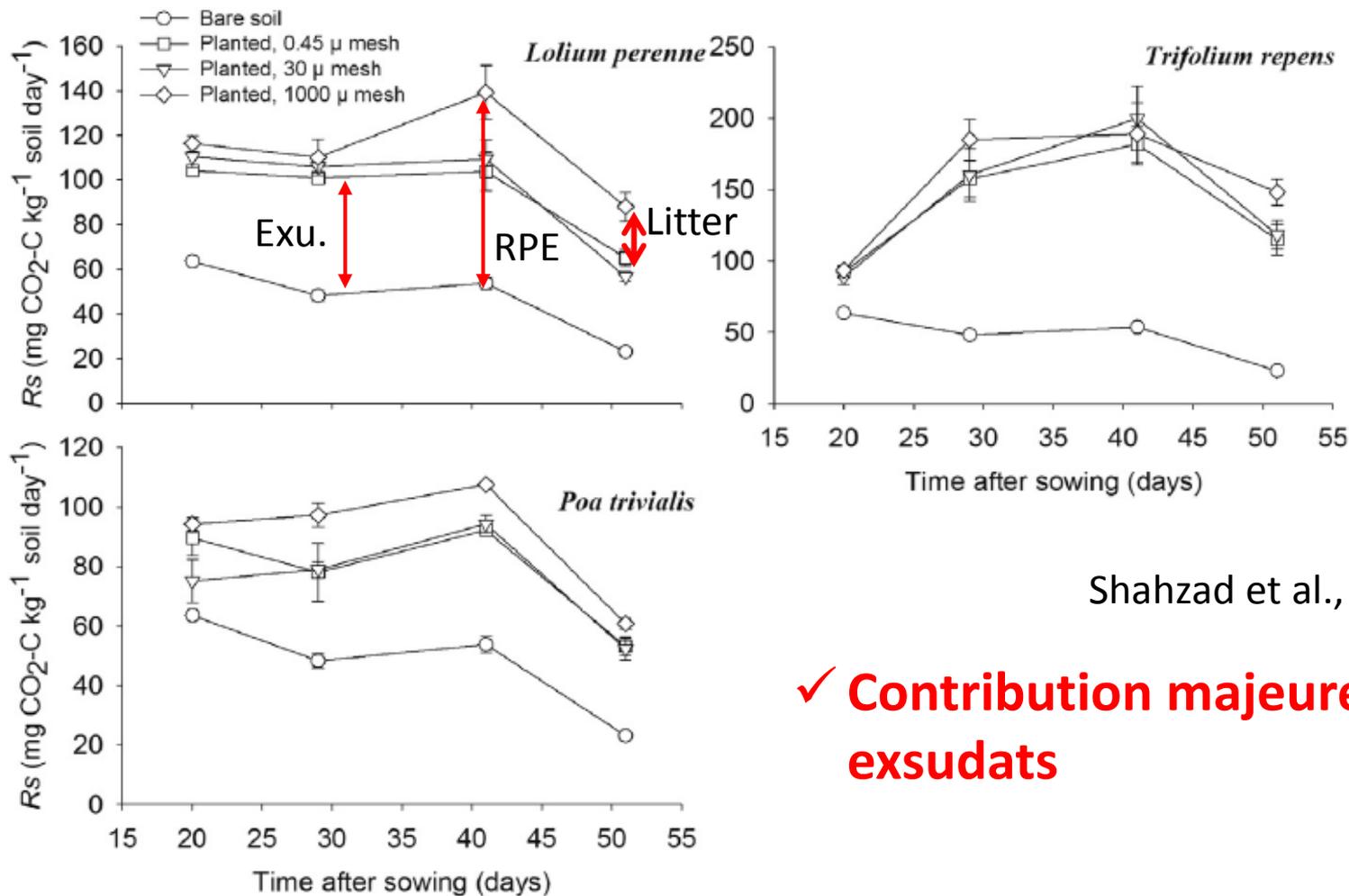


Shahzad et al., 2012

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

L'effet plante sur la décomposition de l'humus

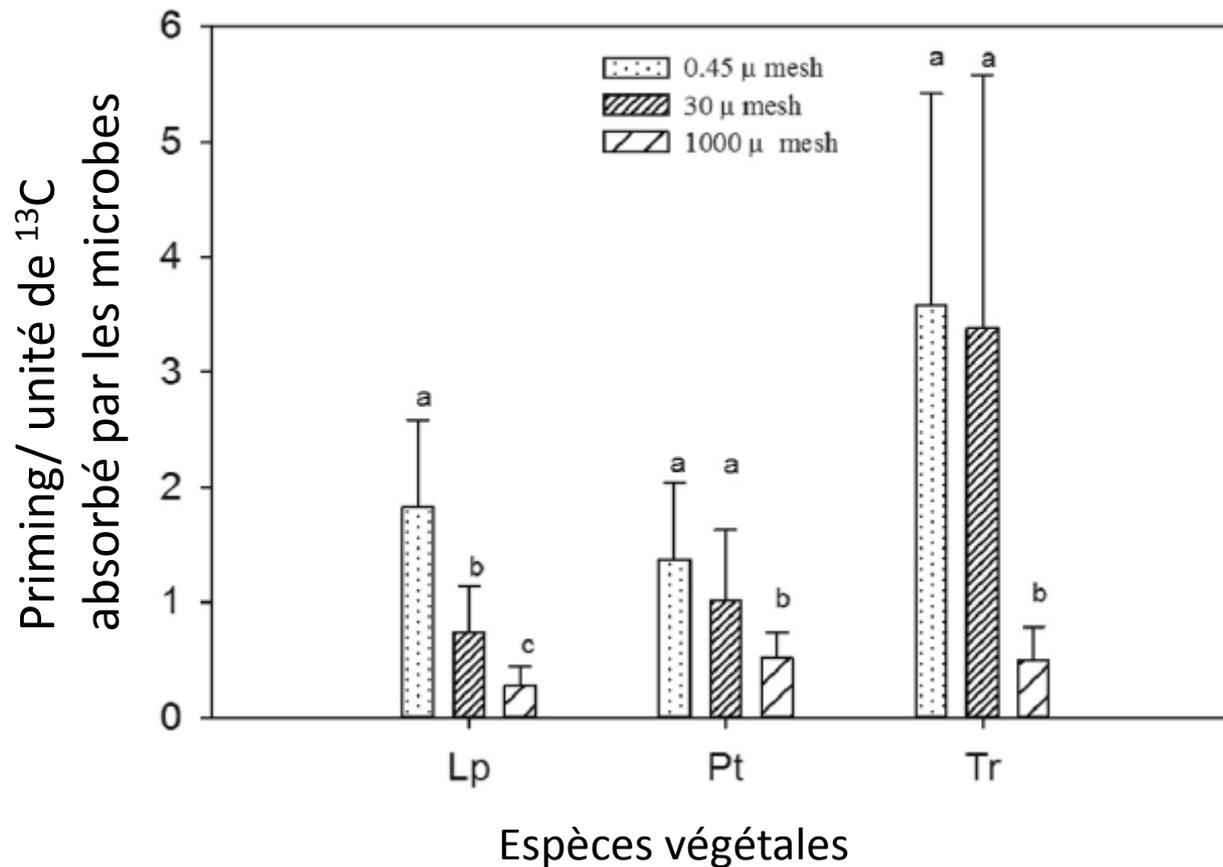
Décomposition de l'humus



Shahzad et al., 2012

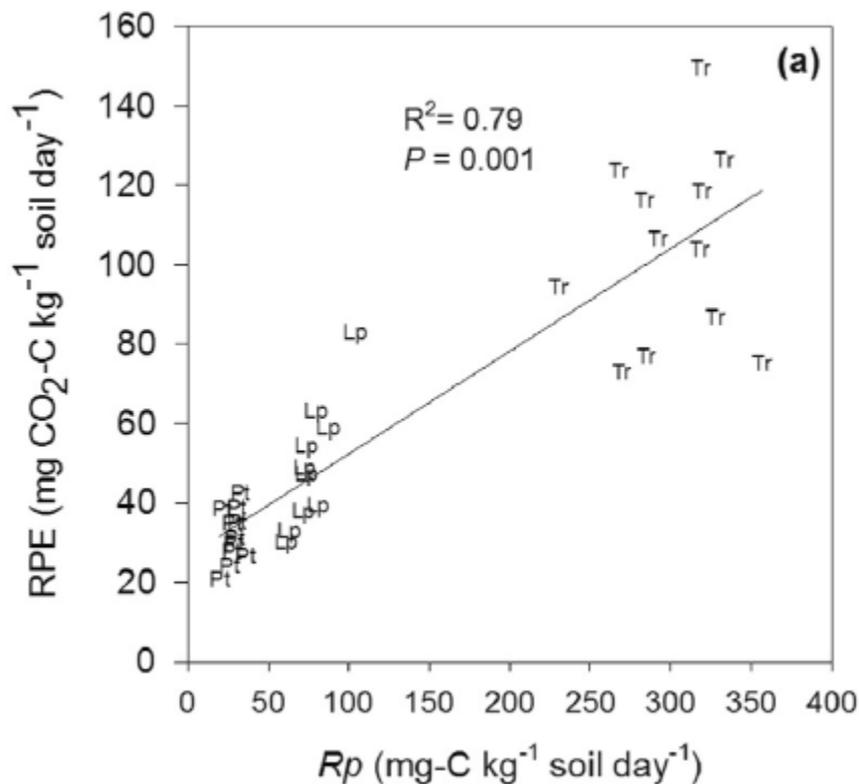
✓ Contribution majeure des exsudats

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

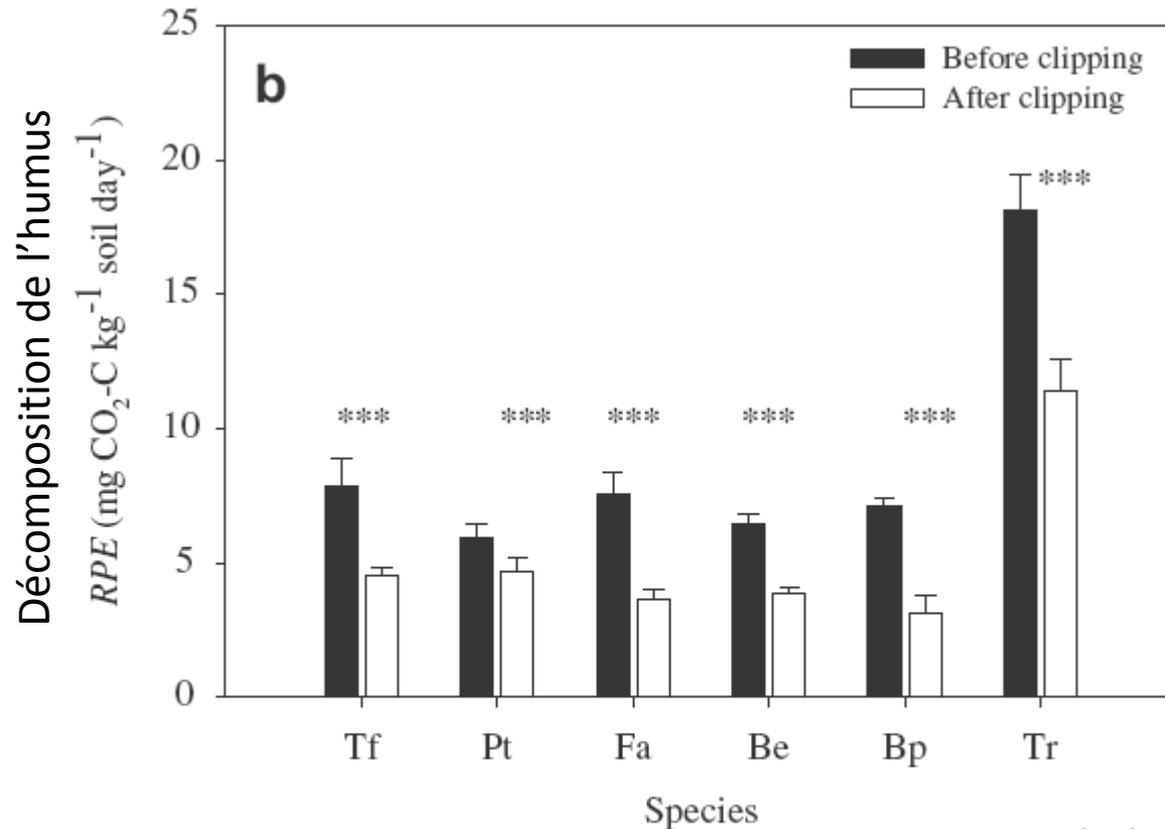
➤ OBJECTIFS

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 $^{13}\text{C-CO}_2$.

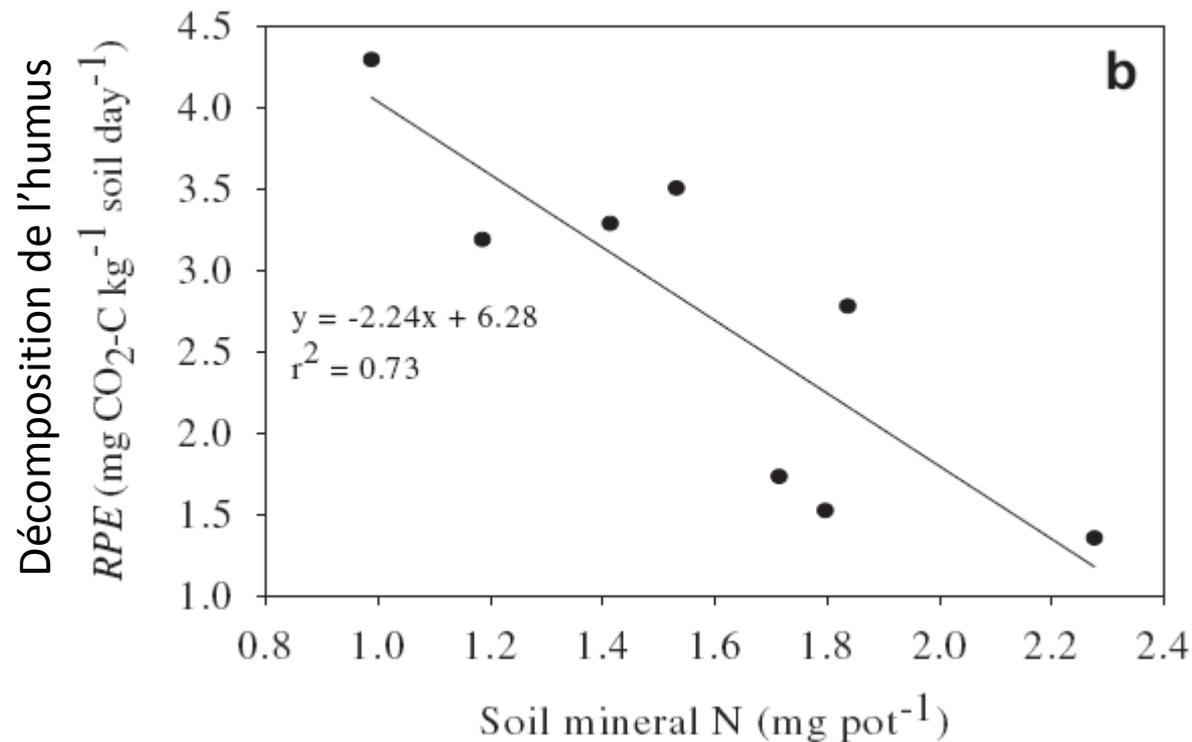
La décomposition de l'humus réduite de moitié en 24h par la coupe des plantes.



Shahzad et al., 2012

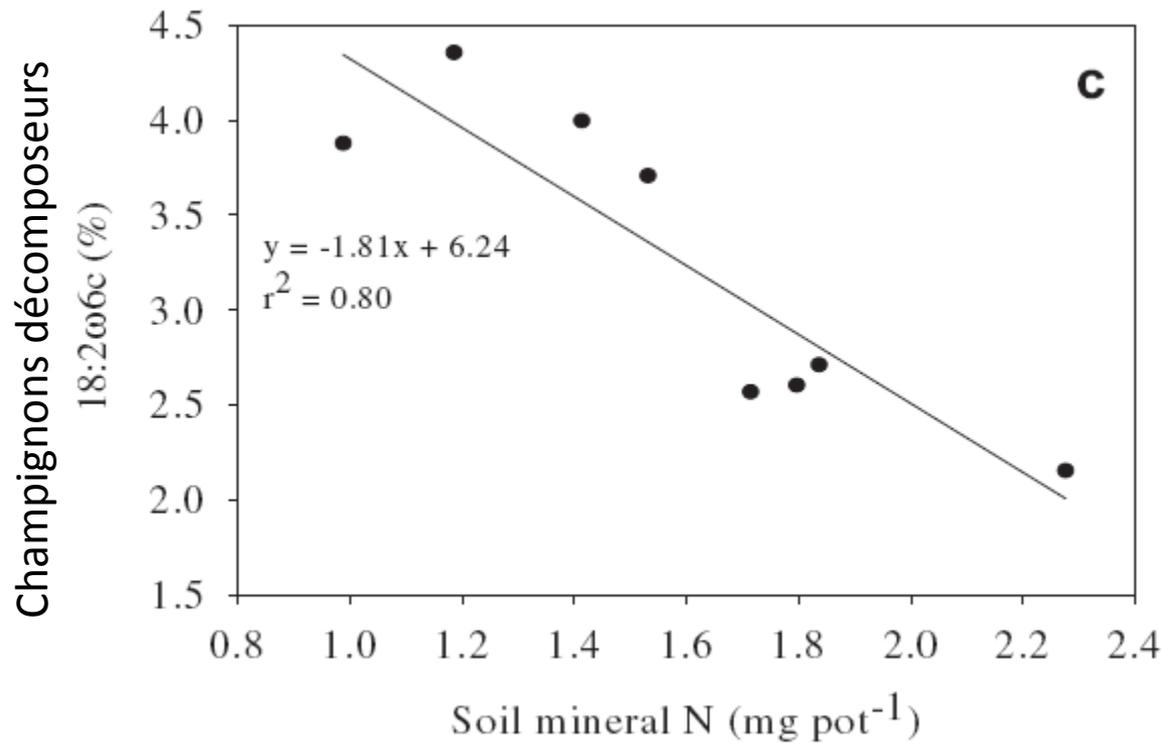
Supporte l'idée d'un ajustement « en ligne » de l'offre du sol à la demande de la plante.

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

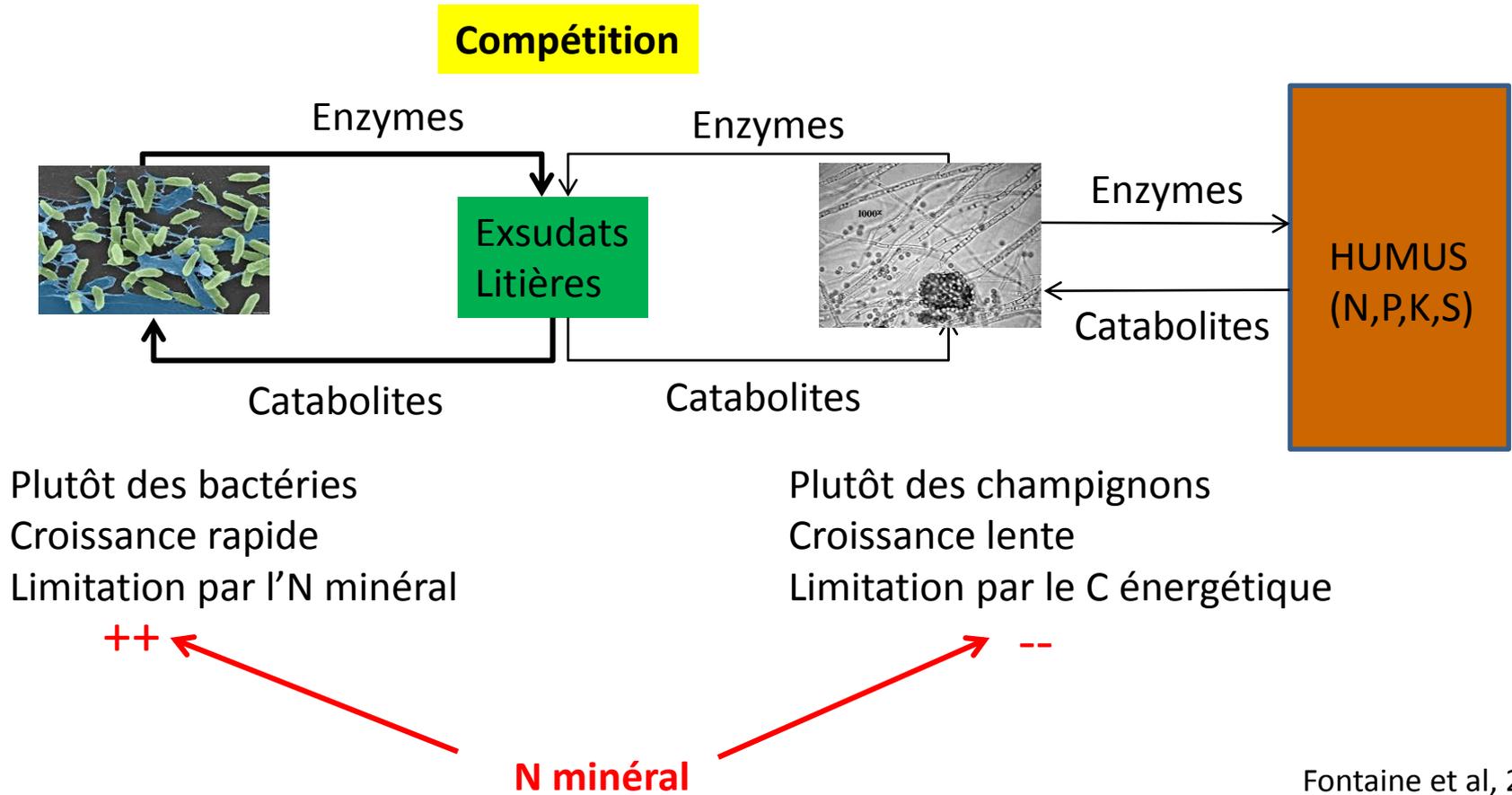


Shahzad et al., 2012

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

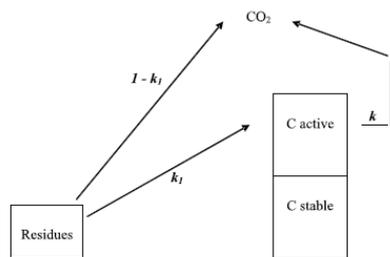
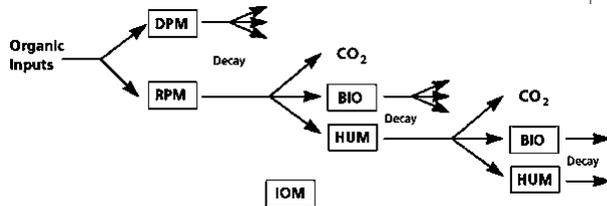
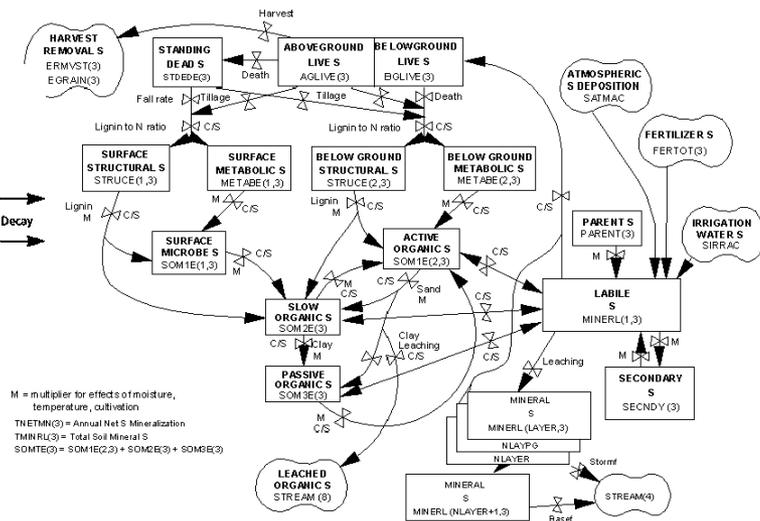


Figure 1 - Diagram of the three-compartment model of soil C evolution. k_1 = crop residues humification coefficient. k = annual coefficient of mineralization of active SOM.



Roth C



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

Century

Hélin Dupuis

Cantis

DNDC

VVV

ITE

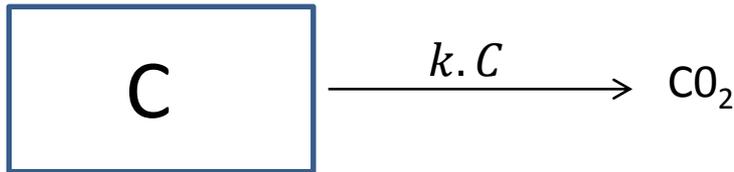
Daisy

Jenny

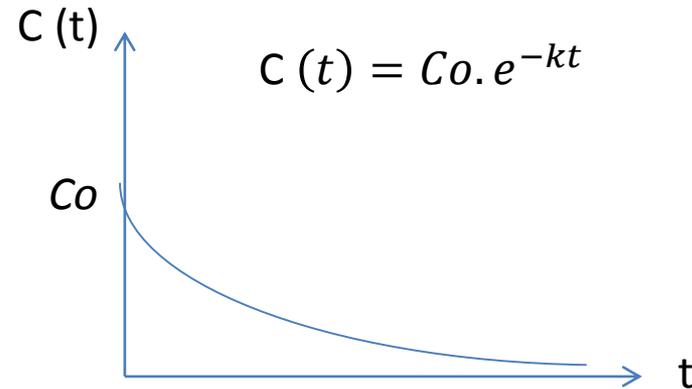
SOMM

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

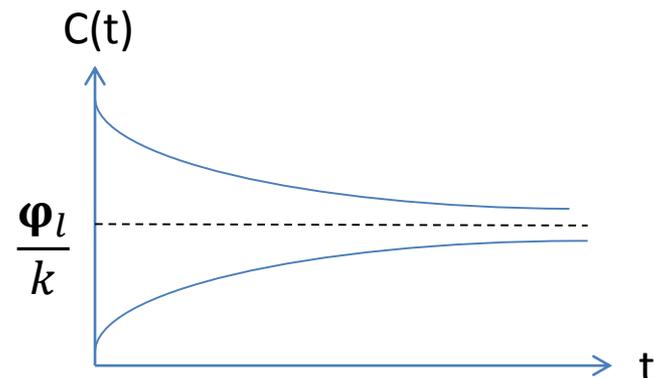


$$C(t) = \frac{\Phi_l}{k} + (C_0 - \frac{\Phi_l}{k})e^{-kt}$$

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

✓ 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.

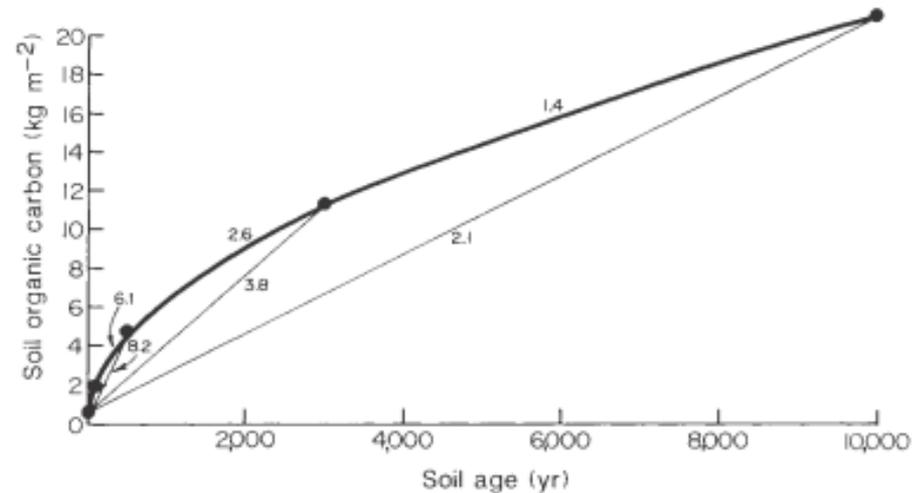
Ces modèles sont-ils pertinents?

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}C (pMC)	^{14}C (yr BP)
239	0 to 10	103.9 ± 0.8	--
--	10 to 20	--	--
--	20 to 30	--	--
--	30 to 40	--	--
237	40 to 50	84.1 ± 0.7	1440 ± 70
--	50 to 60	--	--
--	60 to 70	--	--
236	70 to 80	70.8 ± 0.7	2790 ± 80
--	80 to 90	--	--
233	90 to 100	63.5 ± 0.7	3640 ± 90
--	100 to 110	--	--
232	110 to 120	55.0 ± 0.6	4800 ± 80

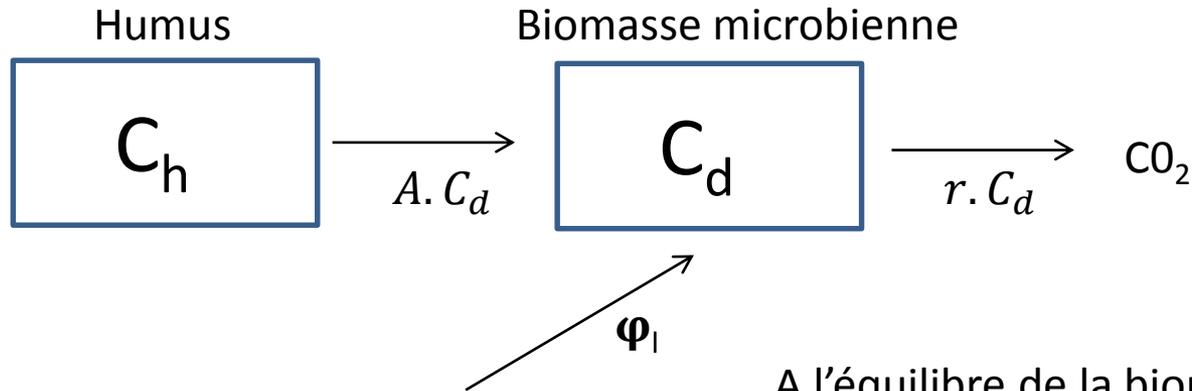


La décomposition peut « s'arrêter »

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}C et ^{14}C

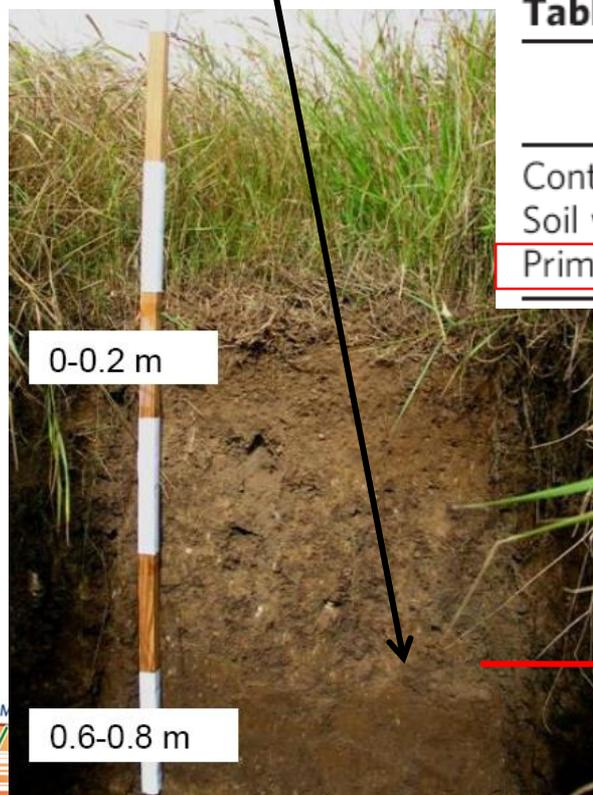
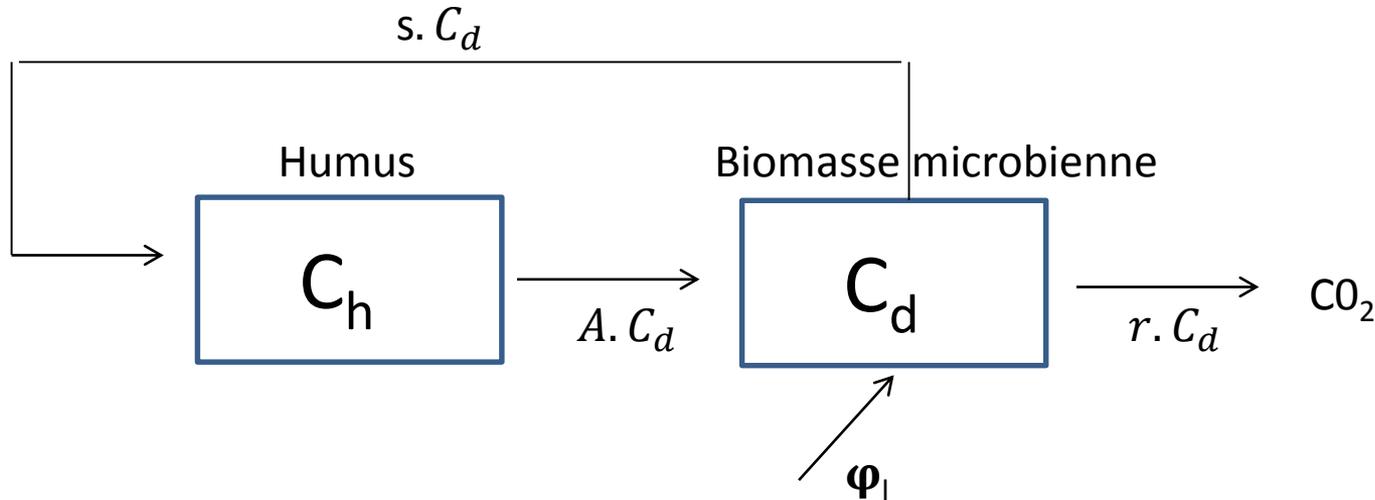


Table 2 | Properties of unlabelled soil C released during incubation

	Quantity (mg C kg ⁻¹)	¹⁴ C activity (MC%)	¹⁴ 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



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

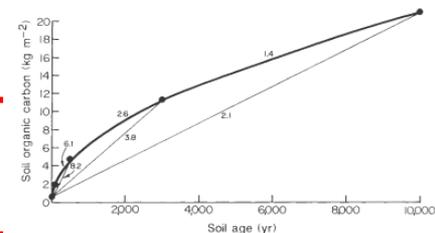
$$\frac{dC_d}{dt} = (A - s - r)C_d + \phi_l$$

A l'équilibre de la biomasse microbienne:

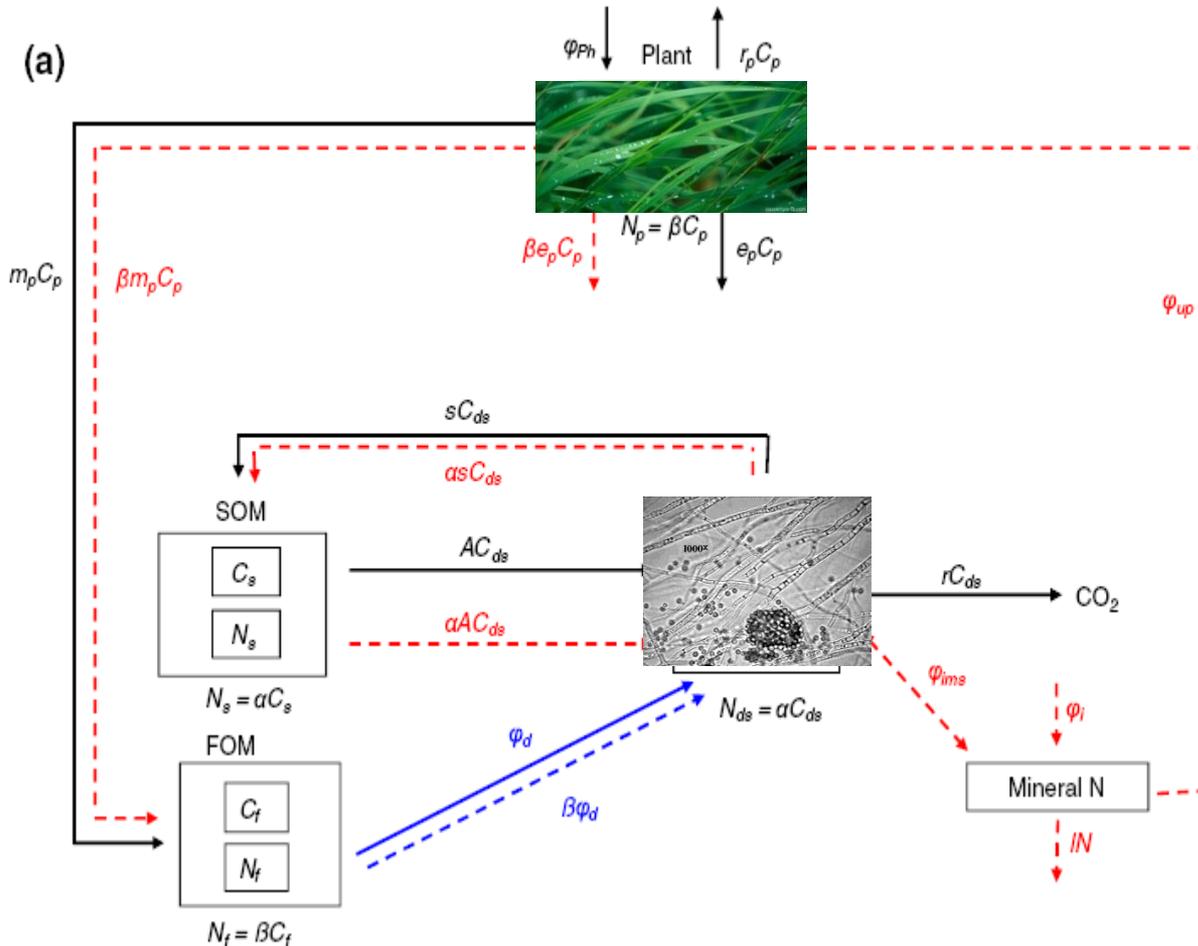
$$\left(\frac{dC_h}{dt}\right) = (s - A)C_d^*$$

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

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



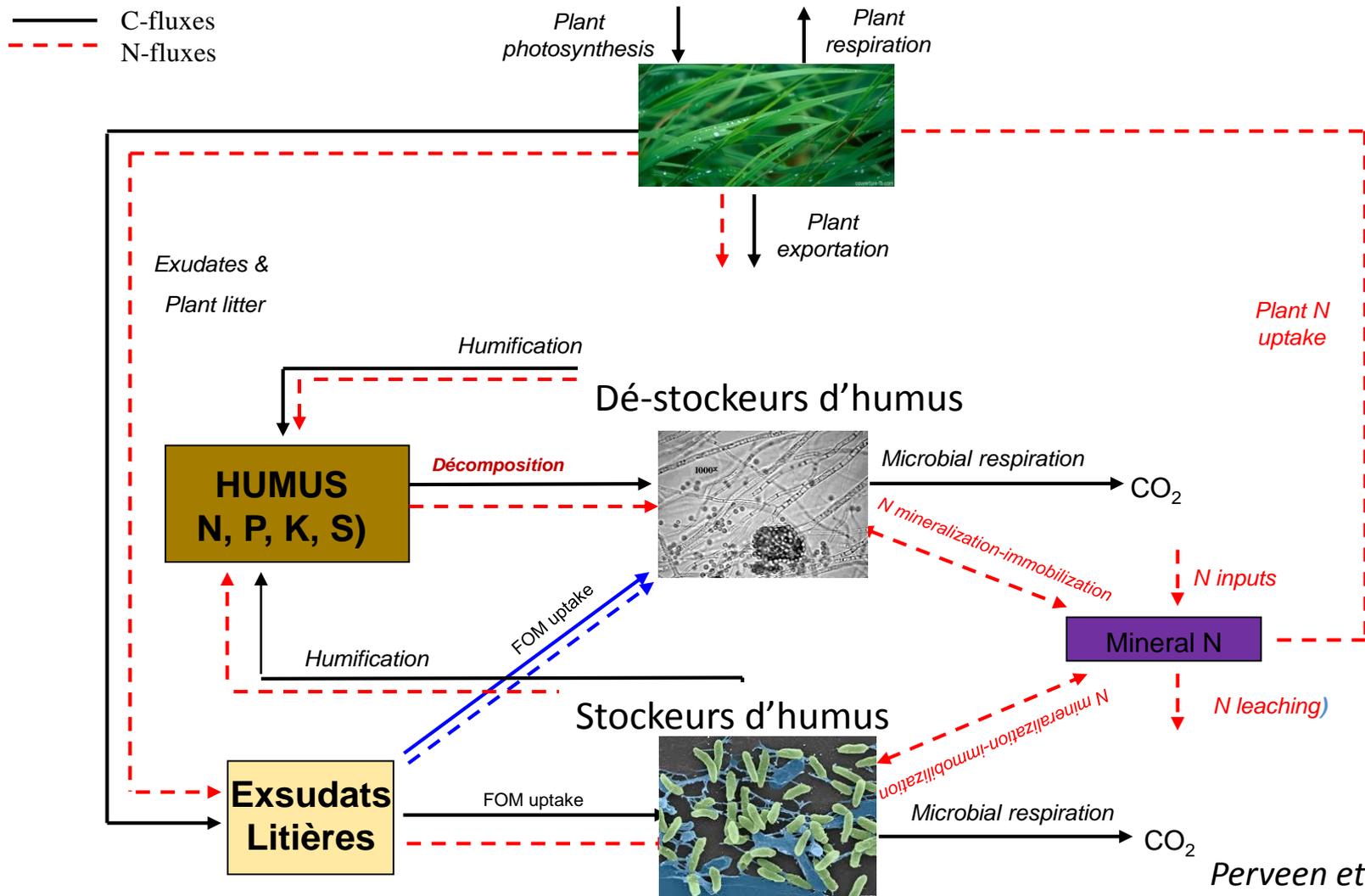
Un peu plus compliqué...



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

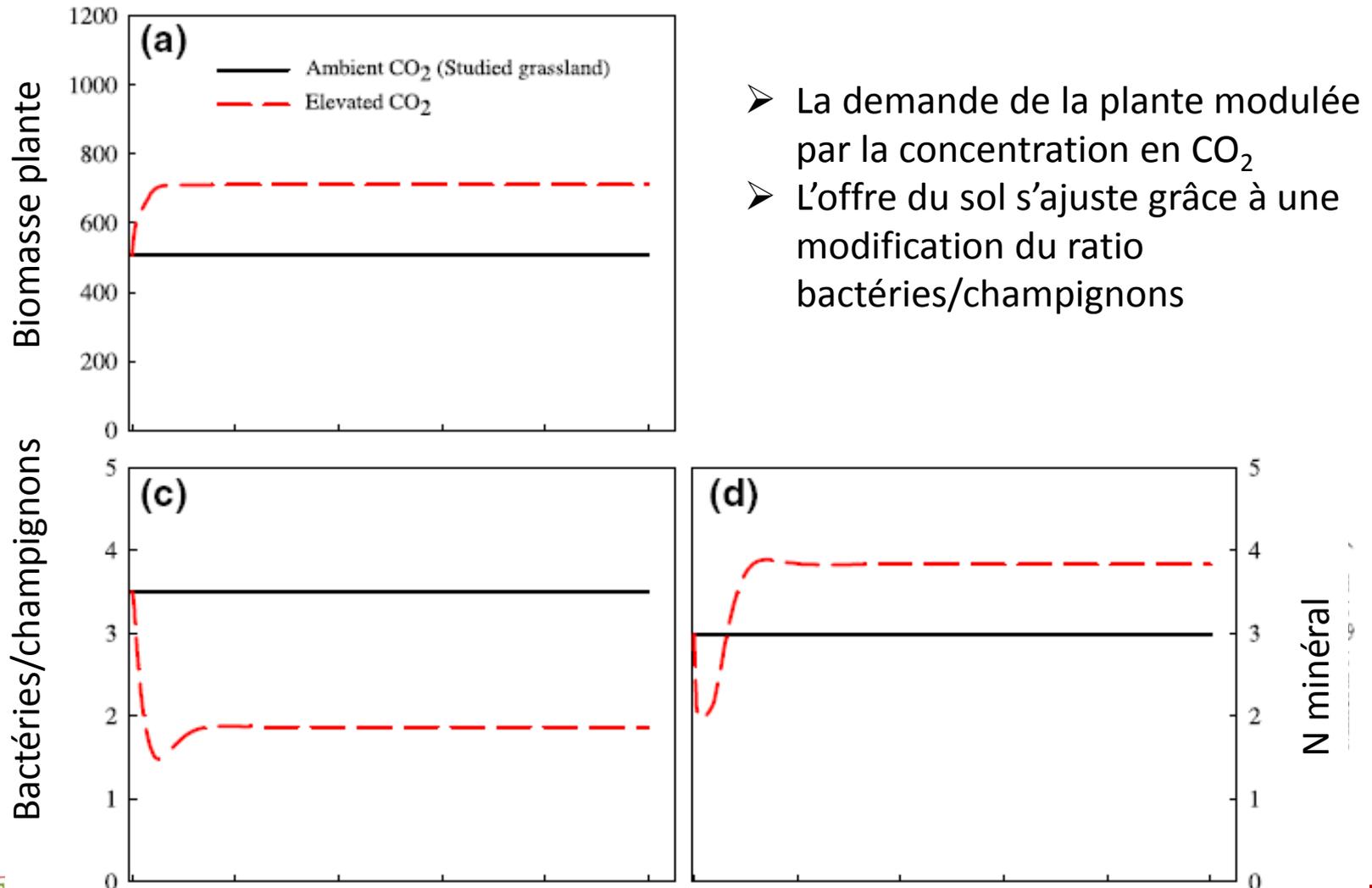
Perveen et al. 2014

Modèle Symphony



Perveen et al. 2014

Symphony simule la synchronisation offre/demande



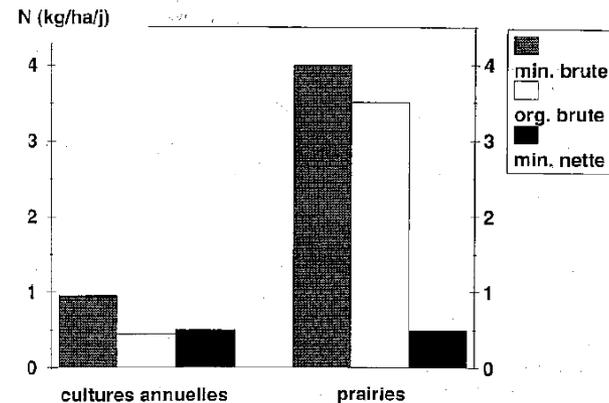
- *Quels enseignements à tirer pour la construction de nouveaux systèmes de culture?*

La rhizosphère des plantes pérennes hébergent une diversité de régulations microbiennes

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



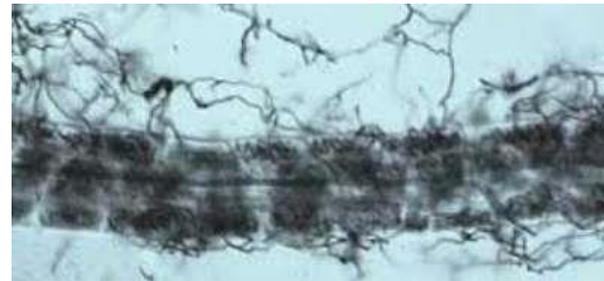
- Et la constitution des réserves organiques des sols
- Les flux d'immobilisation/minéralisation d'N pilotés par ces décomposeurs sont 4 fois plus grands sous plantes pérennes comparées à des annuelles.



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 N₂ 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 m² 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 N₂.

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).