



Avec la participation de l'



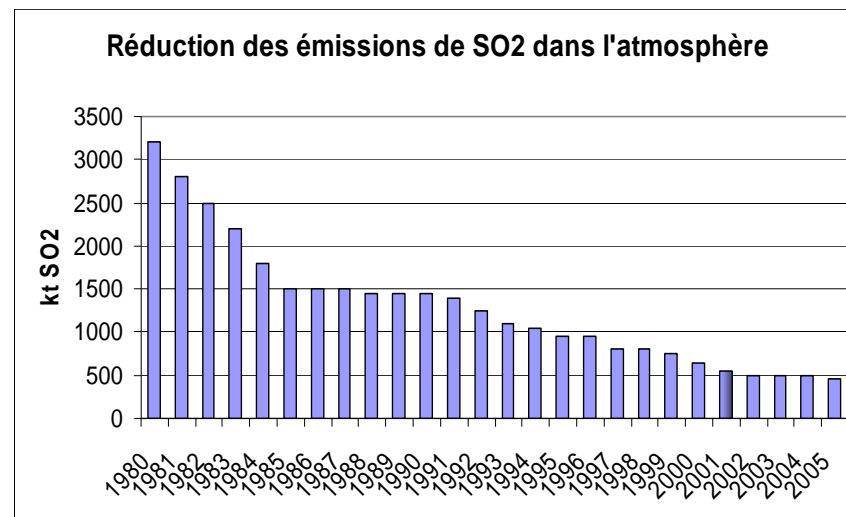
La matière organique des sols, importante source de soufre pour les cultures

Jean-Marie Machet, Sylvie Recous & Hamid Niknahad Gharmakher

INRA, US Agro-Impact Laon & INRA, UMR FARE Reims

Contexte

- Le soufre : **élément essentiel pour les plantes et animaux** (constituant essentiel de certains acides aminés, de la chlorophylle, d'enzymes et de quelques vitamines)
- Diminution des applications d'engrais et de fongicides contenant du soufre
- Augmentation régulière des exportations par les cultures (de 10 à 80 kg de S/ha selon l'espèce) due à l'augmentation des rendements
- Apports de soufre par retombées atmosphériques fortement réduits en France (de 3000 à 500 kt SO₂ /an)

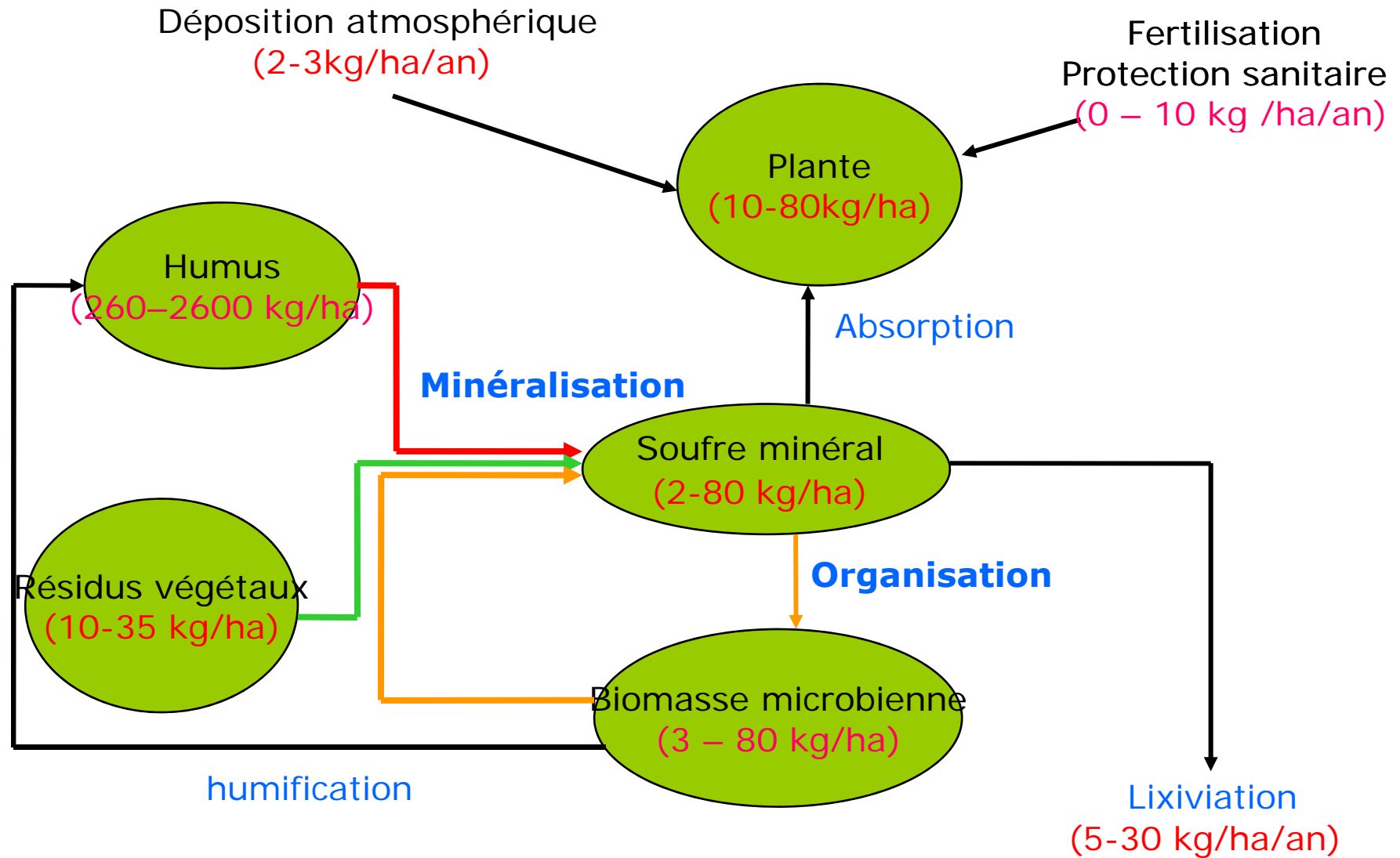


➔ **les disponibilités en soufre ont donc globalement diminué et l'on observe des carences en soufre sur les cultures**

Regain d'intérêt pour les recherches sur le soufre

- **Etudes sur la minéralisation** f(type de sol, présence plante): équipe de Tabatabai et al, Eriksen, 1995, Riffaldi et al., 2006, Li et al., 2001, Pamidi et al., 2001, Ghani et al., 1991, Zhou et al., 1999...
 - **Etudes sur les flux bruts de minéralisation-organisation** avec traçage isotopique ^{35}S : Eriksen (2005), Nziguheba et al., 2005, 2006
 - **Effet de la décomposition des résidus** et amendements organiques: Nziguheba et al., 2006, Eriksen 1995, Wu , Ghani et al., 1992
 - **Mesure de la biomasse microbienne S**, rôle des communautés microbiennes et activités enzymatiques : Chapman (1987, 1997), Wu J et al. (1993, 1995) , Saggar et al., (1981, 1998), Vong, Benizri et al. (2007-en cours)
 - **Réponse des plantes et dynamique S** dans les systèmes fertilisés : Zhao, Mc Grath et al.,
- Manque de conceptualisation et de modèles pour la gestion de S, et adoption de méthodes empiriques en matière de fertilisation soufrée

Cycle simplifié du soufre dans le système sol-plante

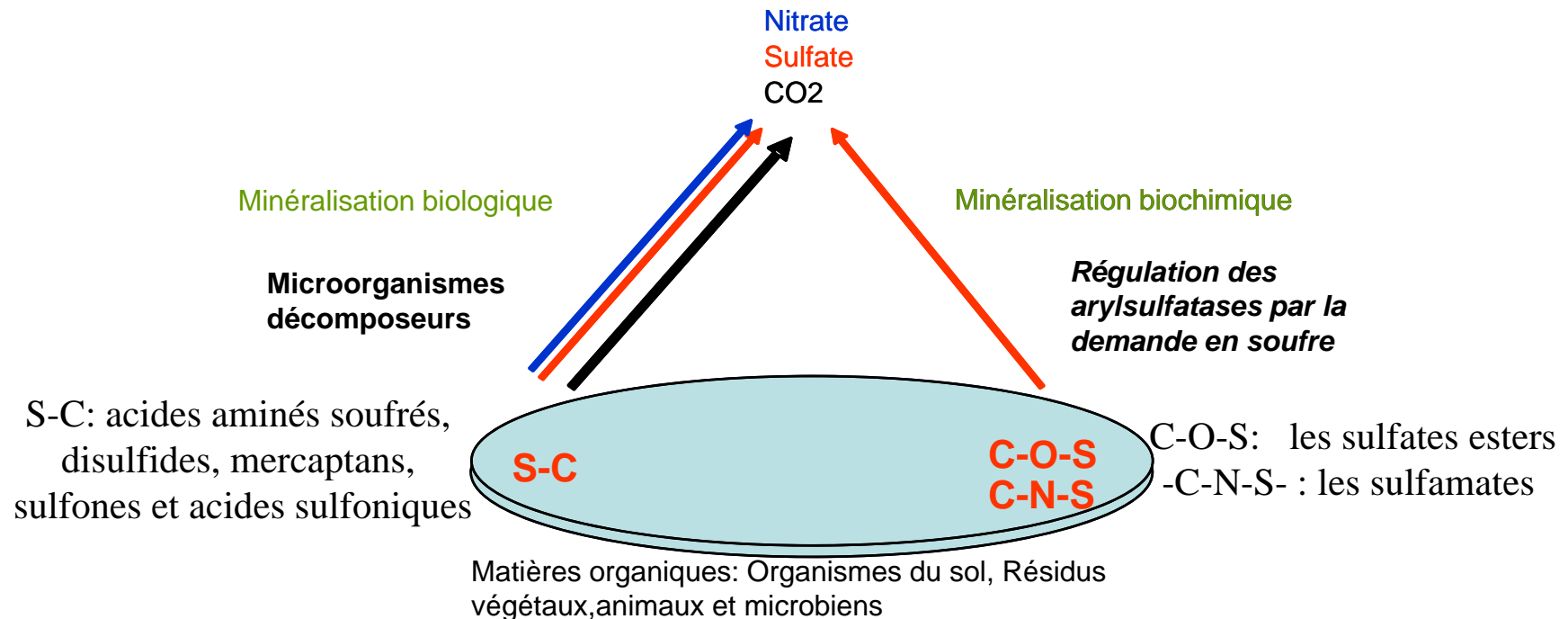


Couplage des cycles C, N et S

Deux voies ont été suggérées pour la minéralisation de S organique (McGill et Cole, 1981) :

La voie biochimique correspond à l'hydrolyse extracellulaire du S organique liée à une catalyse par des enzymes extracellulaires.

La voie biologique correspond à la production de S à partir des composés organiques liée à l'oxydation du carbone par les micro-organismes du sol. Le processus est contrôlé par le besoin en énergie et la disponibilité en carbone.



Minéralisation de S : objectifs et hypothèses

- ✓ Quantifier et modéliser la minéralisation nette du soufre des sols français, couvrant une large gamme de caractéristiques physico-chimiques et d'histoire culturelle (mode d'occupation du sol)
- ✓ Evaluer la minéralisation nette de S associée à la décomposition des résidus végétaux.

⇒ L'objectif est de contribuer à la détermination d'un bilan pour les cultures

- ▣ Les cycles C, N et S sont interdépendants, car ces éléments sont combinés dans la matière organique du sol
- ▣ La minéralisation du soufre est principalement pilotée par la décomposition de la matière organique et par conséquent fortement reliée à la minéralisation de C et N

Minéralisation du S du sol

Choix d'une base de 22 sols de différentes régions,
variant par leurs caractéristiques physico-chimiques et
l'histoire culturelle (mode d'occupation du sol)

14 sols de cultures
3 sols de prairies , 3 sols de jachères
2 sols de forêt

Sols tamisés à 2 mm, incubation de 175 jours à 20°C, 80% Hcc

Argile → 52 - 234 g/kg

Limons → 79 - 683 g/kg

Sable → 6 - 763 g/kg

CaCO₃ → 0 - 804 g/kg

Org C → 7.90 - 38.6 g/kg

Total N → 0.73 - 3.88 g/kg

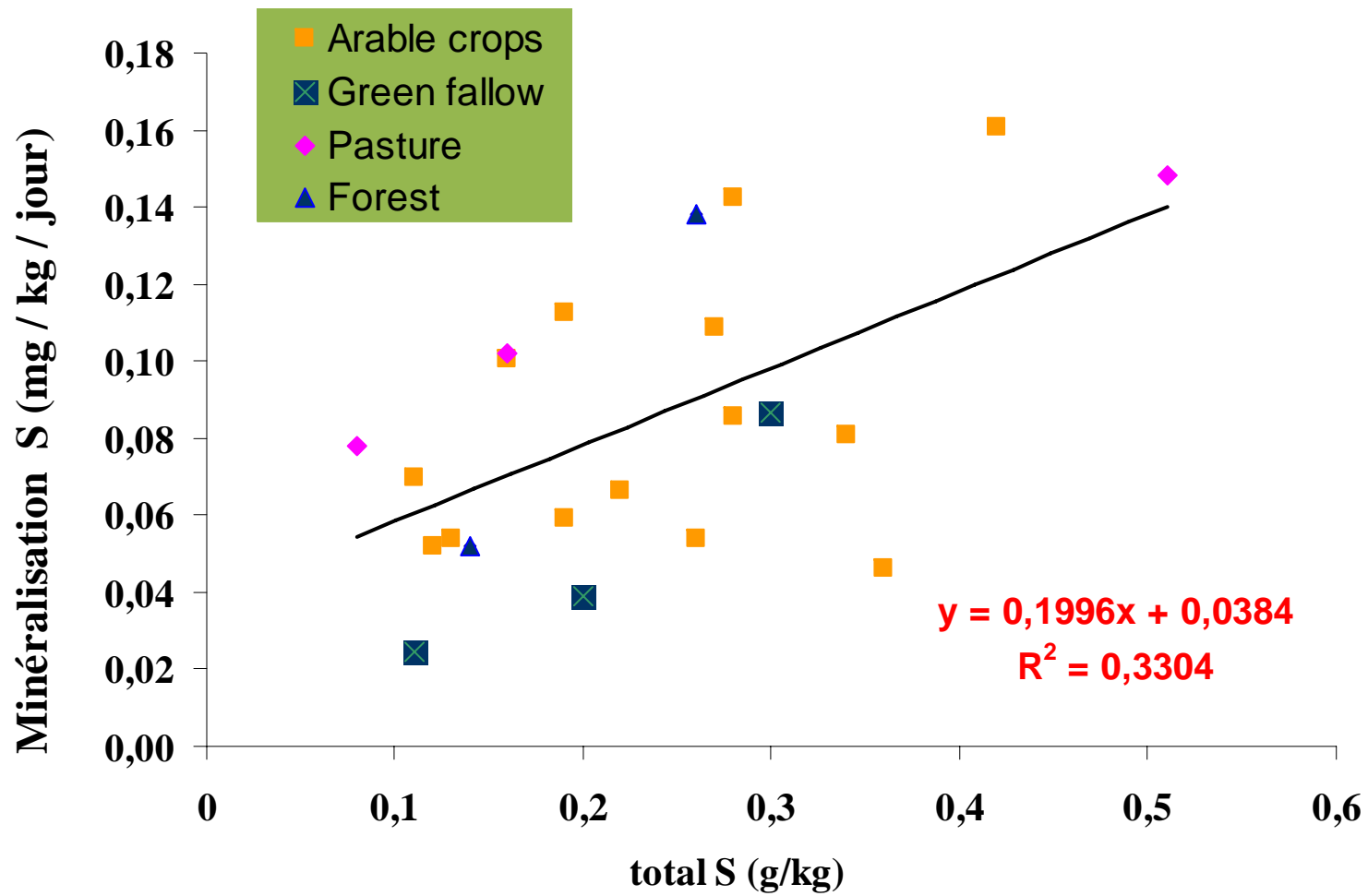
Total S → 0.04 - 0.51 g/kg

C : N → 9.2 - 10.9

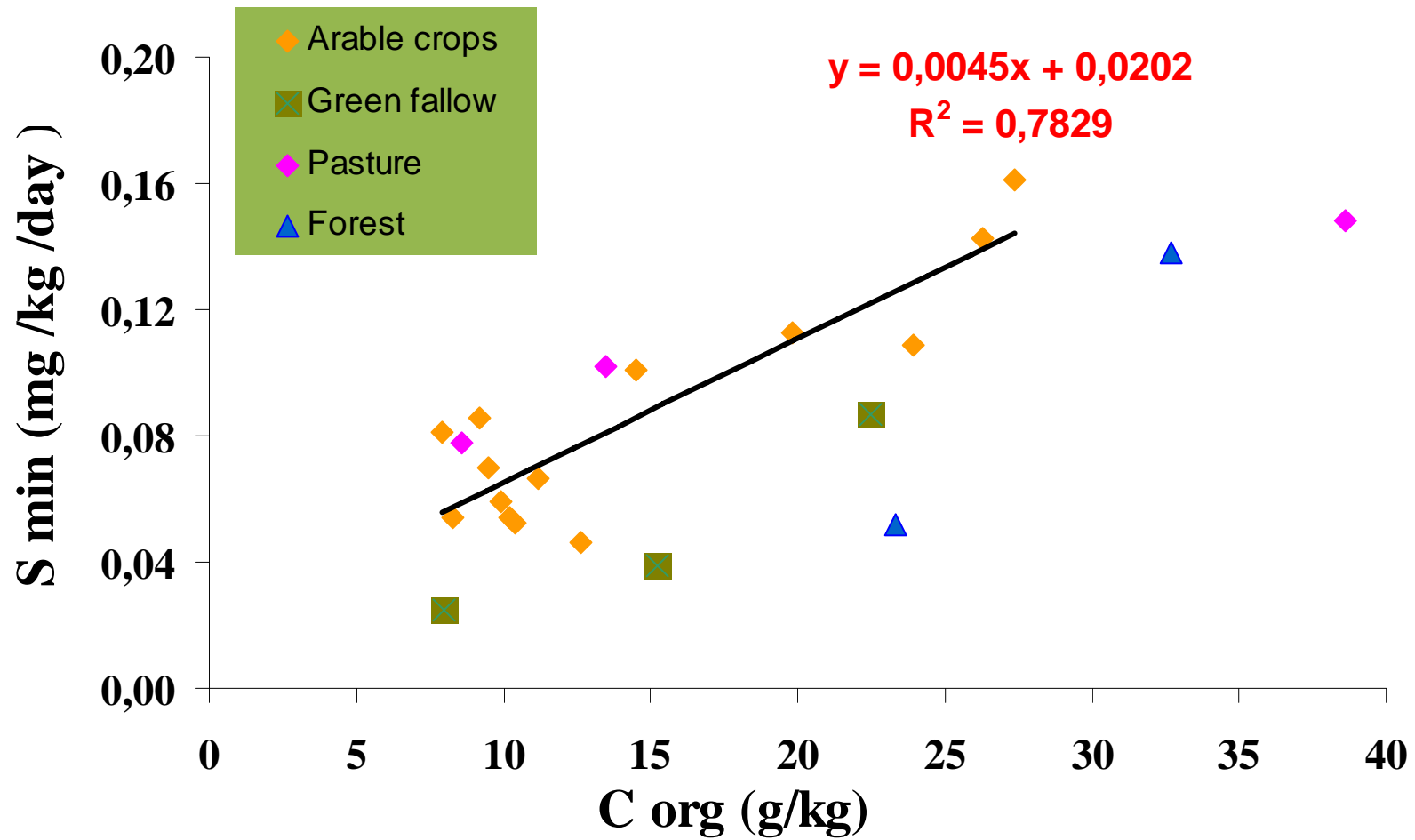
C : S → 23.2 - 90.6

N : S → 2.4 - 9.3

Minéralisation de S : relation avec teneur en S du sol



Minéralisation de S : relation avec la teneur en C org du sol

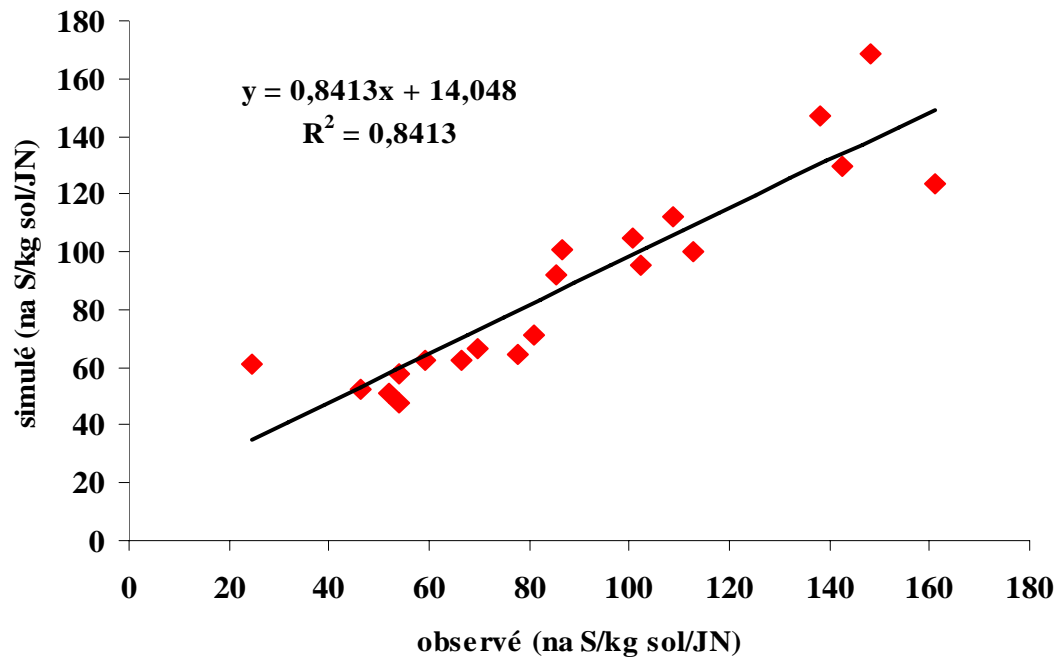


Prédiction de la minéralisation de S du sol

$$S \text{ min} = 3.72 * C \text{ org} - 14.58 * \text{pH} + 0.57 * \text{initial S-SO}_4 - 0.08 * \text{arg} + 146.6$$

(20 sols, $r^2=0.84$)

Comparaison des vitesses simulées et observées



Contribution des résidus de cultures

Objectif : quantifier la minéralisation de S en relation avec la décomposition des résidus de cultures

Type de sol : Sol de limon

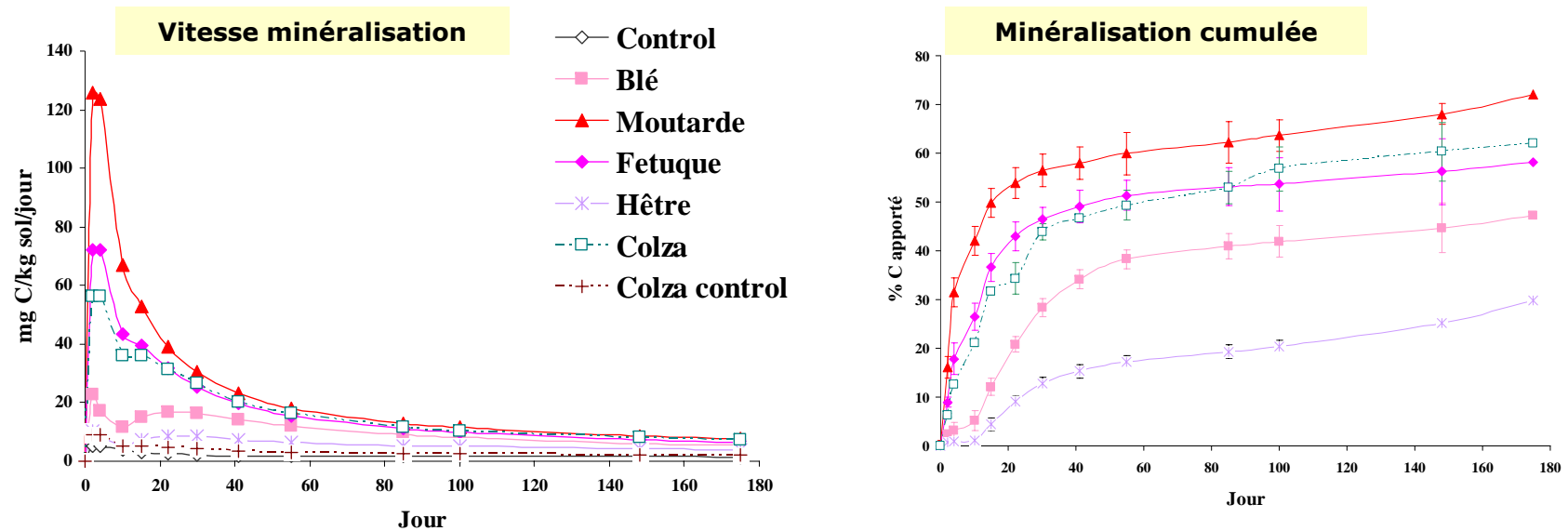
Résidus végétaux : Choix de 5 résidus couvrant une large gamme de teneurs en soufre et différentes compositions biochimiques

Incubation : S et N, en conditions non limitantes

Caractéristiques chimiques		Paille blé	Moutarde	Feuilles hêtre	Fétuque	Paille colza
C	%	42.7	43.6	50.9	43.8	43.0
N	%	0.46	6.00	0.78	2.72	1.40
S	%	0.088	0.728	0.075	0.282	0.136
C/N		92.8	7.2	65.2	16.1	30.0
C/S		486	60	672	155	316
N-NO ₃	%	0.004	0.045	0.002	0.019	0.002
S-SO ₄	%	0.023	0.427	0.012	0.147	0.065
Fractions biochimiques						
Soluble	%	15.9	68.1	28.1	27.6	33.1
Hemicellulose	%	30.8	12.1	11.1	38.6	17.3
Cellulose	%	43.4	8.5	32.3	27.9	36.5
Lignin-like	%	9.9	11.0	28.5	5.2	13.1

Résultats

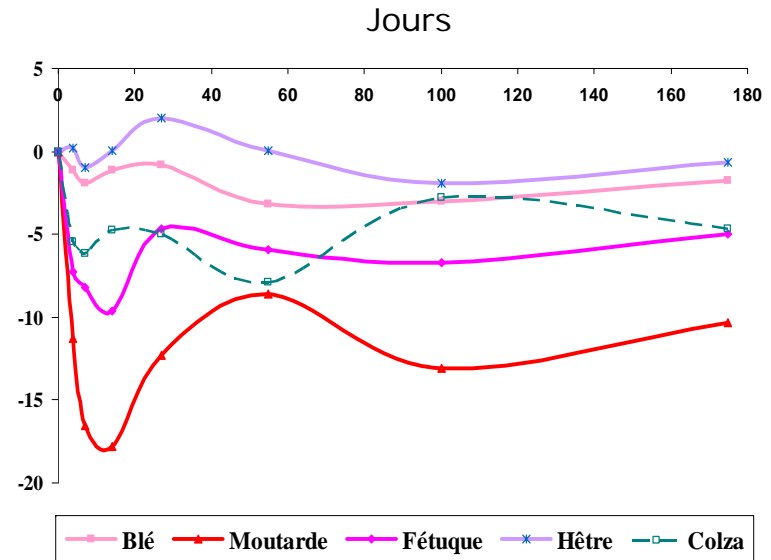
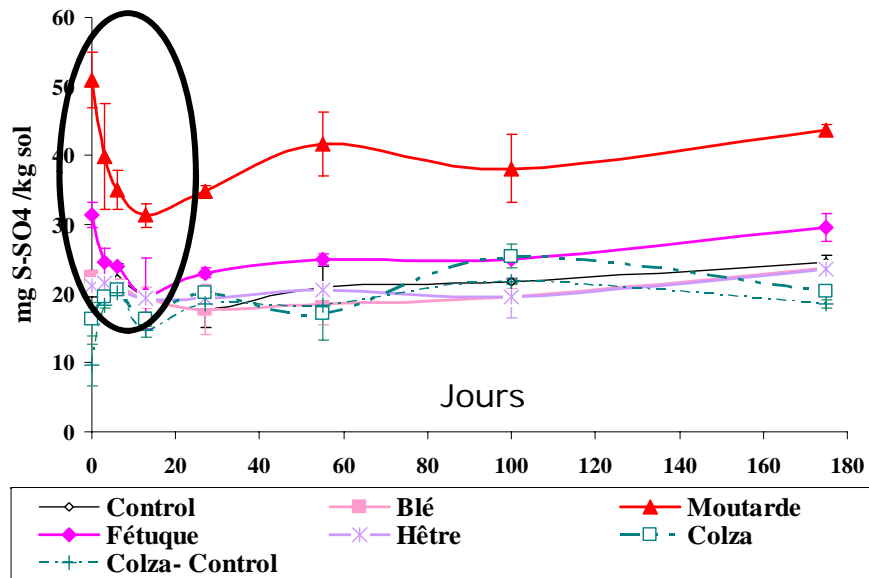
Cinétiques de minéralisation du carbone



→ La vitesse de minéralisation du C pendant l'incubation varie considérablement entre traitements. Les vitesses sont maximales dès le jour 2. La moutarde, la fétuque et le colza montrent des tendances assez similaires, le blé et le hêtre se décomposent plus lentement.

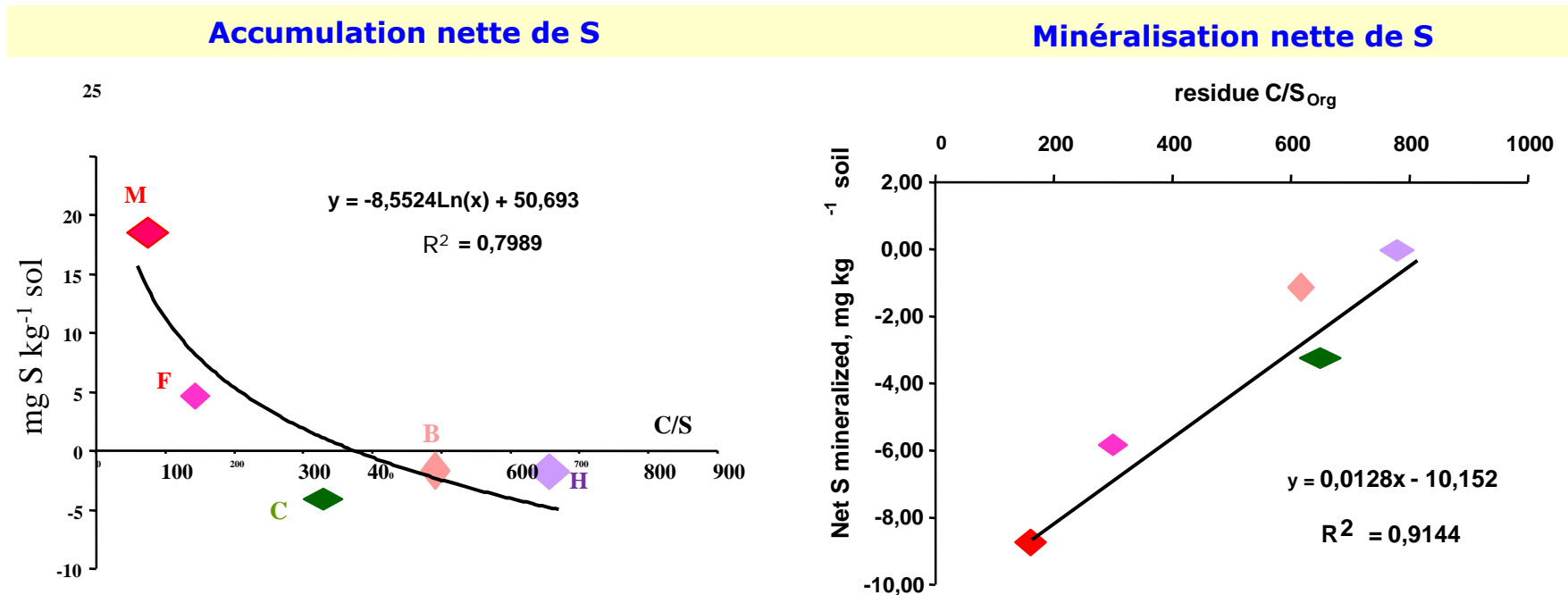
Résultats

Dynamique de S minéral et minéralisation nette de S



- Observation d'une forte augmentation de S minéral au jour 0 pour la moutarde, fétuque et colza, en raison de leur contenu élevé en sulfate soluble.
- Décroissance rapide et importante du S minéral pour ces résidus, suggérant une organisation de S importante, d'autant plus importante que le résidu est riche en S ?
- Peu ou pas d'organisation nette pour les résidus de blé et hêtre

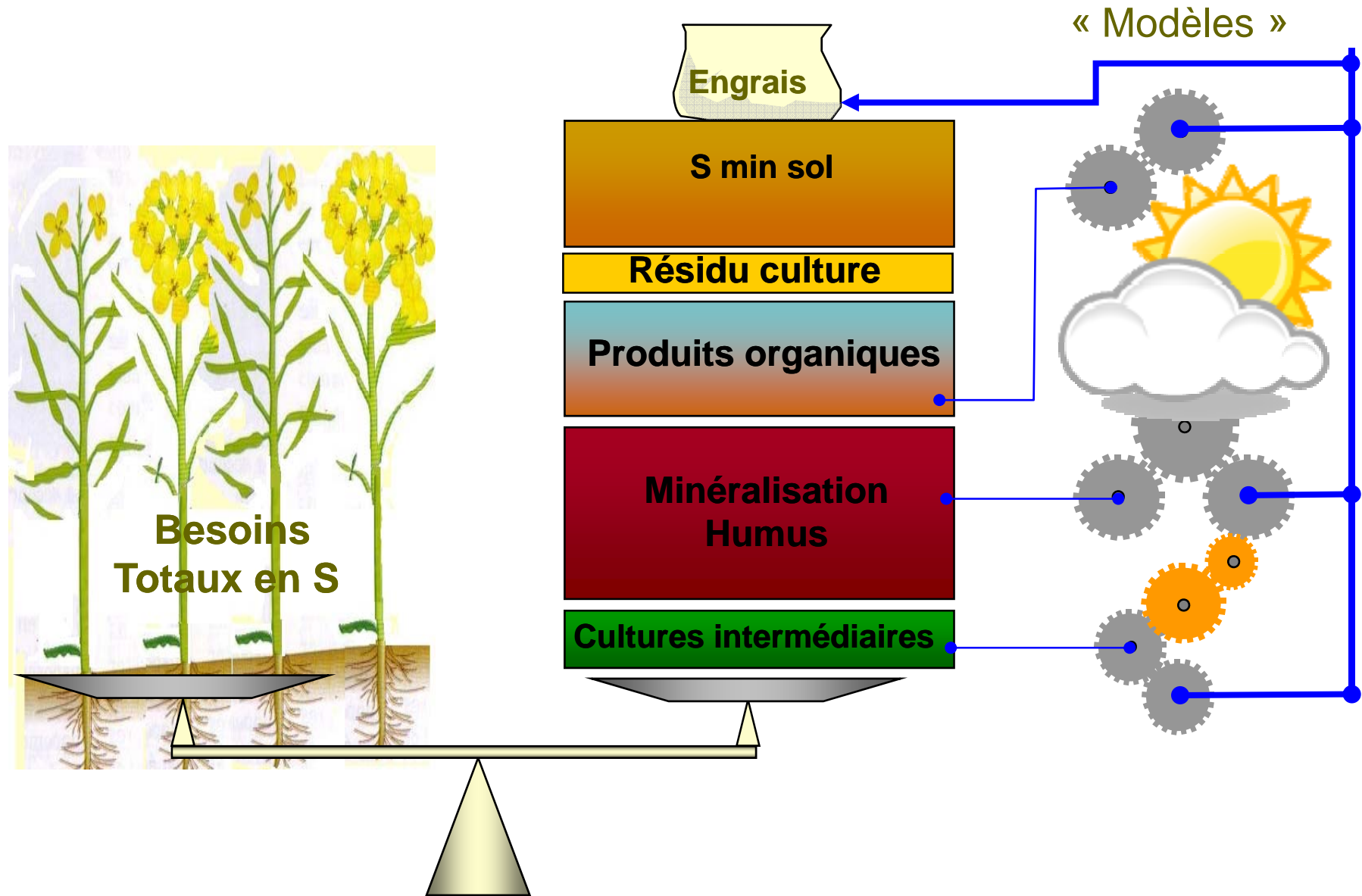
Relations entre C/S du résidu et minéralisation nette de S



→ L'accumulation nette de sulfate due à l'apport de résidus dans le sol est inversement reliée au rapport C/S des résidus, pour des **C/S < ~ 300** ($r^2 = 0.80$). Quand le **C/S** des résidus est **≥ 300** il y a une faible organisation de S.

→ La minéralisation de S due à la décomposition des résidus est liée linéairement et positivement au **C /S_{Org}** des résidus ($r^2 = 0.91$)

Vers un bilan soufré à l'échelle du cycle cultural



Besoins en S de quelques cultures

Espèces	Organes	Teneur en S		Rendement	Quantité absorbée
		% MS		t / ha	kg S / ha
Blé	Grain	0.20 (0.13-0.23)		9.0	18.0
	Paille	0.12 (0.08-0.18)		9.0	10.8
Orge	Grain	0.18 (0.13-0.23)		8.0	14.8
	Paille	0.10 (0.08-0.15)		8.0	8.0
Seigle	Grain	0.15 (0.10-0.18)		7.0	10.5
	Paille	0.10 (0.08-0.15)		7.0	7.0
Avoine	Grain	0.18 (0.13-0.20)		6.5	11.7
	Paille	0.12 (0.10-0.18)		6.5	7.8
Mais Grain	Grain	0.16 (0.12-0.18)		9.0	14.4
	Paille	0.12 (0.10-0.15)		8.2	9.8
Mais ensilage		0.14 (0.12-0.16)		16.0	22.4
Colza	Grain	0.40		3.5	14.0
	Paille	0.90		6.0	56.0
Tournesol	Grain	0.40		4.5	18.0
	Paille	0.60		5.0	30.0
Betteraves à sucre	Racines	0.15 (0.10-0.25)		70.0	21.0
	Feuilles	0.40 (0.30-0.60)		40.0	16.0
Pomme de terre	Tubercules	0.17 (0.10-0.30)		60.0	20.4
	Fanes	0.40 (0.30-0.60)		40.0	12.0
Plantes fourragères					
Luzerne		0.30 (0.20-0.45)		13.0	39.0
Trèfle		0.25 (0.15-0.30)		8.0	20.0
Fétuque		0.28 (0.20-0.30)		17.0	47.6
Dactyle		0.20 (0.15-0.22)		10.0	20.0

Application à la gestion de la fertilisation soufrée

Objectifs

Peut-on adapter l'équation du bilan, développée dans les années 70-80 pour l'azote, pour raisonner la fertilisation soufrée dans toute situation ?

$$\text{Equation : } X = (Pf - Pi) - (Mn + Si + Re_a - L - Sf)$$

(Pf - Pi): les besoins du peuplement végétal,

(Mn + Si + Re_a - L - Sf): fourniture nette en soufre

Situation simulée	Type de sol	Minéralisation annuelle humus (kg S/ha)	Contribution minéralisation Mh (kg S/ha)	Précédent cultural	Quantité Résidu (t MS /ha)	C/S résidu	Contribution résidu Mr (kg S/ha)
Blé hiver	Limon Mons	24	12	Colza hiver	5	316	+ 1
Colza hiver	Limon Mons	24	12	Blé hiver	9	486	- 1
Betterave à sucre	Limon Mons	24	20	Blé hiver Moutarde	9 3.6	486 60	- 1 + 16
Prairie temporaire	Limon Lusignan	33	33	Fétuque	1	155	+ 2

Calcul du bilan S sous cultures

Calcul de la dose à appliquer en utilisant l'équation de bilan

❑ Blé d'hiver (après colza)

$$X = (26 - 4) - (12 + 1 + 20 + 4 - 5 - 10), \quad X = 0 \text{ kg S/ha}$$

❑ Colza d'hiver (après blé d'hiver)

$$X = (70 - 10) - (12 - 1 + 30 + 4 - 5 - 10), \quad X = 30 \text{ kg S/ha}$$

❑ Betterave (après blé d'hiver et CI)

$$X = 37 - (20 - 1 + 16 + 30 + 4 - 5 - 10), \quad X = 0 \text{ kg S/ha}$$

Bilan excédentaire (+17 kg) dû à la minéralisation de la C.I.

❑ Prairie temporaire (composée de fétuque)

$$X = 40 - (33 + 2 + 5 + 4 - 2 - 5), \quad X = 3 \text{ kg S/ha}$$

➔ L'utilisation d'une équation du bilan S pour la fertilisation soufrée des cultures est possible, et permet de bien discriminer les situations potentiellement carencées ou excédentaires

Conclusions (1)

- ❑ l'hypothèse que la disponibilité de S est principalement associée à la dynamique des matières organiques est confirmée, par nos données conjointes de C, N et S
- ❑ les flux nets de S sont faibles et donc il est difficile de quantifier les effets en utilisant des bilans (différences) sur le sol ; l'ordre de grandeur des flux nets entre l'azote et le soufre est de 10.
- ❑ Cependant il est possible que les flux bruts de S soient beaucoup plus élevés, en raison d'un turnover rapide du S microbien (suggéré par les études avec ^{35}S et par les fluctuations rapides du sulfate observées dans nos données)

Conclusions (2)

- ❑ Une équation de prédiction de la minéralisation de S des sols a été proposée. Elle devra être testée et améliorée dans une plus large gamme de sol :
 - ✓ texture (notamment sols argileux)
 - ✓ pH (sols plus acides),
 - ✓ mode d'occupation des sols: sols forestiers et prairiaux.

- ❑ Les résultats obtenus peuvent contribuer à bâtir et paramétrer un outil de diagnostic pour évaluer si une parcelle agricole présente ou non un risque de déficience en S

- ❑ Les incubations de laboratoire sont des approches expérimentales appropriées pour évaluer les termes de minéralisation d'un bilan de S minéral prévisionnel



Avec la participation de l'



Merci de votre attention

Et peut-être ... un ThioFert !!!

Rencontres de Blois: les 25 et 26 novembre 2009
« Fertilisation raisonnée et analyse de terre: Quoi de neuf en 2009? »