



FÊTE SES 20 ANS

## Après 20 ans, quels enseignements sur le stockage de la matière organique et la biologie des sols

*Sabine HOUOT (1), Sébastien PHILIPPE (2), Mickaël HEDDE (3), Sophie BOURGETEAU (4), Nathalie CHEVIRON (1), Florent LEVAVASSEUR (1)*

*(1) INRA ECOSYS, Grignon, (2) CA IdeF, 78 Le Chesnay, (3) INRA Eco & Sol, Montpellier, (4) INRA Agroécologie, Dijon.*



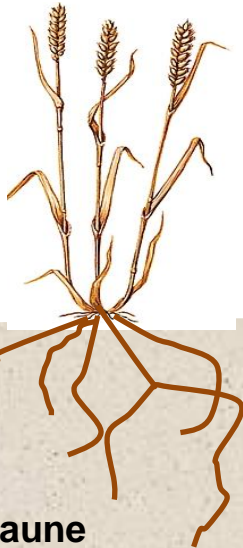
# Apports de composts et fertilité des sols

→ **Fertilité** chimique, physique des sols; **Activité biologique**



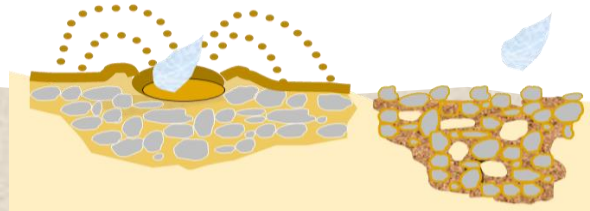
Apports  
composts

Résidus  
de récolte

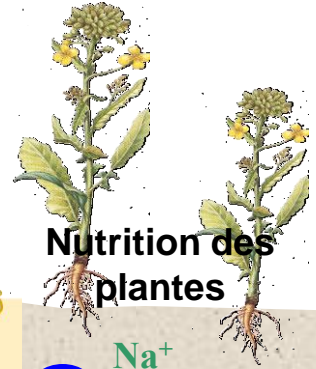


Faune  
Microflore

Stabilisation des agrégats,  
résistance à la battance



Nutrition des  
plantes

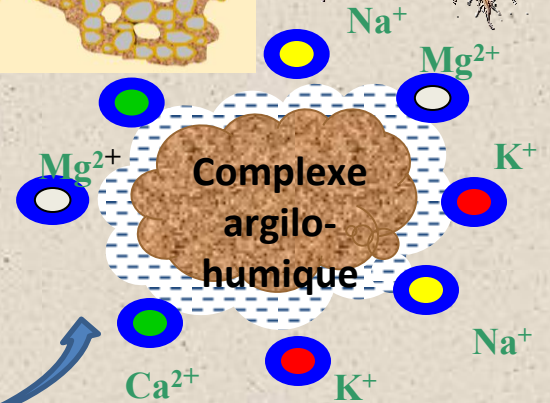


MO labile

MO active

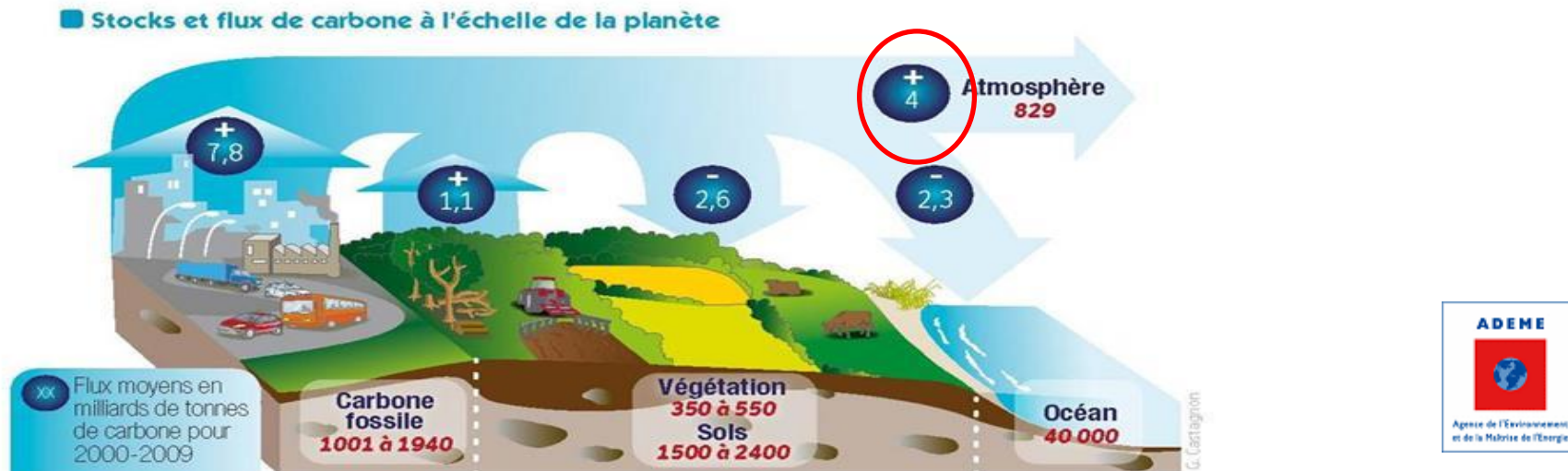
MO stable

N  
P



Stockage C

# Rôle environnemental des sols: « 4 p 1000 »

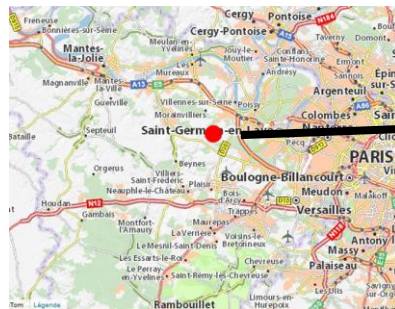


- Stocks de C dans les 30 premiers centimètres de sol: **1000 Gtonnes**
- Augmentation annuelle des stocks pour compenser le bilan de flux de 4 Gtonnes: **4/1000**

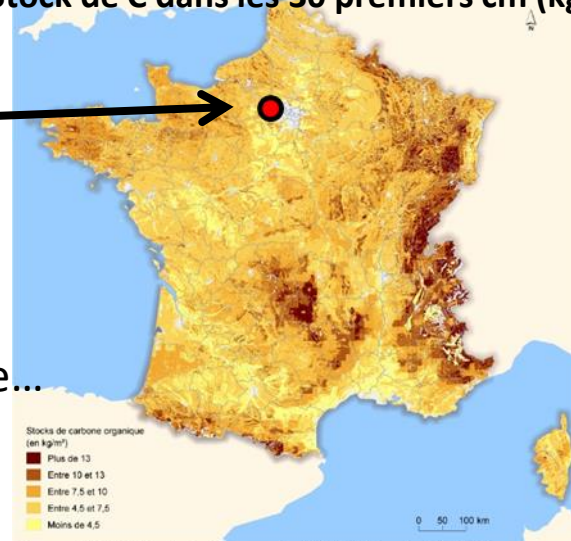


# QualiAgro: état initial

C (%)	MO (%)	C (t/ha)
1.05	1.8	43



Stock de C dans les 30 premiers cm (kg/m<sup>2</sup>)



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

Fragilité des propriétés physiques, faible activité biologique...

Indice de battance: **2.4**  
(très battant)

$$\frac{1.5 \times \text{LF} (\%) + 0.75 \times \text{LG} (\%)}{\text{A} (\%) + 10 \times \text{MO} (\%)}$$

- Objectif 4‰ par an → **+ 0.17 tC/ha.an**
- Passage de **1.05%** à **1.11%** en **10 ans**

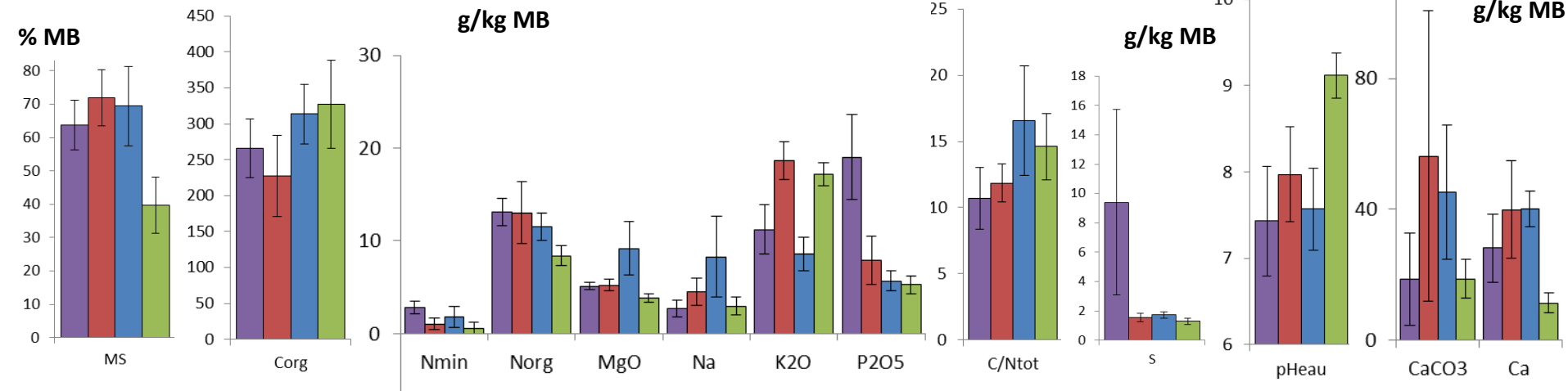
# Questions d'agriculteurs

1. Quelle efficacité des amendements à augmenter la MO des sols?
  2. Vais-je observer un plafonnement du taux de matière organique, ou de ses bénéfices ?
  3. Quels sont les bénéfices d'apports organiques répétés ?
  4. Sont-ils proportionnels au % MO ?
  5. Au bout de combien de temps vais-je commencer à les percevoir ?
  6. Comment choisir un produit plus adapté qu'un autre pour minimiser cette durée ?
- 
1. Si je travaille mon sol, vais-je minimiser l'augmentation du taux de matière organique, ou ses bénéfices ?

# QualiAgro: caractéristiques des apports

## • 4 amendements organiques :

- Compost d'ordures ménagères résiduelles (**OMR**): Corg, C/N, CaCO<sub>3</sub>
- Compost de biodéchets (**BIO**): N, K<sub>2</sub>O, CaCO<sub>3</sub>
- Compost de boue (**DVB**): N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, S
- Fumier (**FUM**): K<sub>2</sub>O, pH

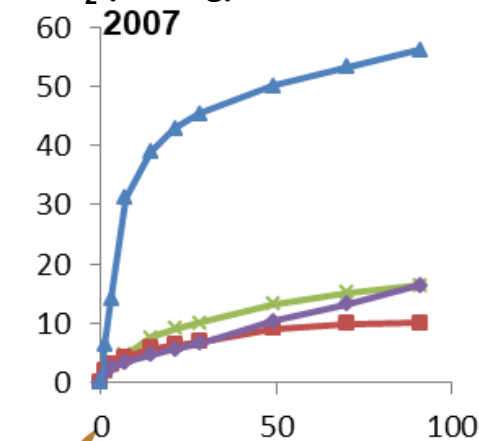


# QualiAgro: caractéristiques des apports et flux de C

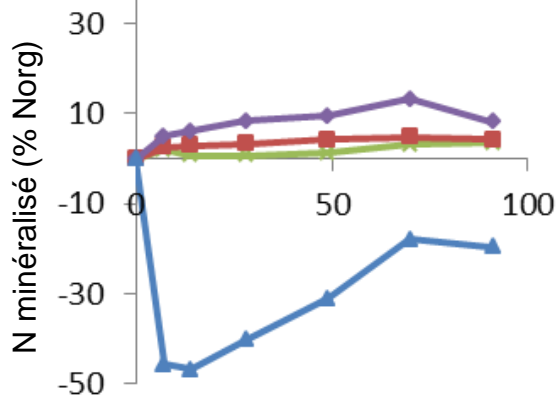
- **4 amendements organiques :**

- Compost d'ordures ménagères résiduelles (**OMR**)
- Compost de biodéchets(**BIO**)
- Compost de boue (**DVB**)
- Fumier (**FUM**)

C-CO<sub>2</sub> (% Corg)



XPU 44-163



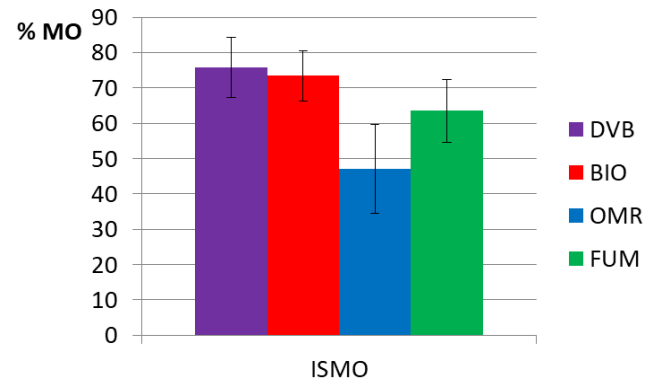
- **Apport tous les 2 ans:**

- 1998-2013: 4 tC/ha
- 2015-2017: 2 tC/ha

- **Bilan en 2017:**

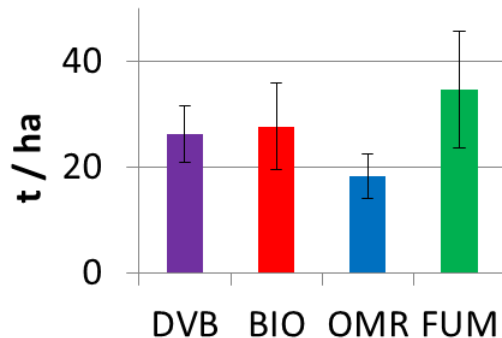
- 40 t C/ha de PRO
- 45 à 48 t C/ha de résidus de culture

XPU 44-162

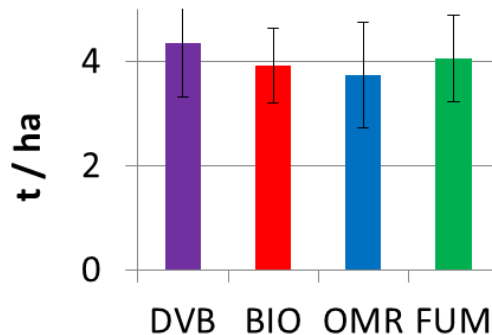


# QualiAgro: Flux d'éléments par épandage

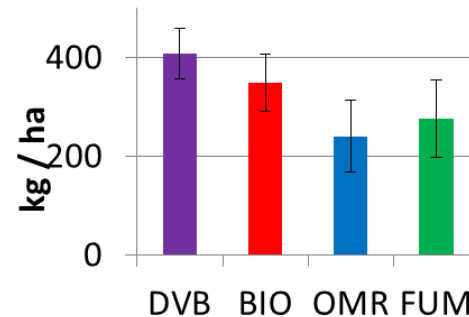
## Matière brute



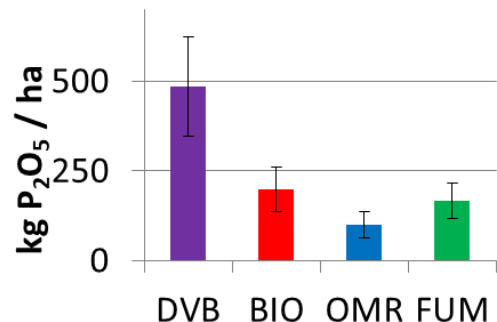
## Carbone organique



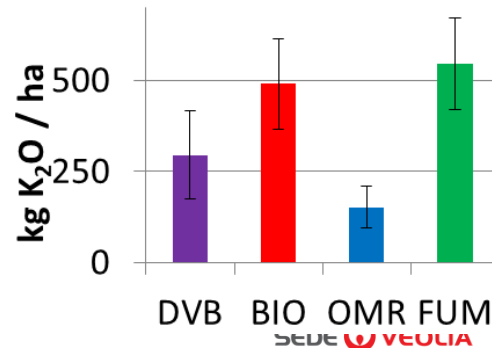
## Azote total



## Phosphore total



## Potassium



## Dose apportée/besoins plantes

	Dose P	Dose K
DVB	4	1.8
BIO	1.5	3
OMR	1	1
FUM	1.5	3



# Resultats

Quali Agro

- Dynamique d'augmentation de la matière organique du sol: variation avec type de PRO
- Effet des doses apportées, risques de saturation
- Bénéfices liés à l'augmentation de la matière organique:
  - Effet sur les rendements (présentation intérêt fertilisant)
  - Effet sur les propriétés physiques
  - Effet sur les activités biologiques
  - Effet sur les propriétés chimiques

# Resultats

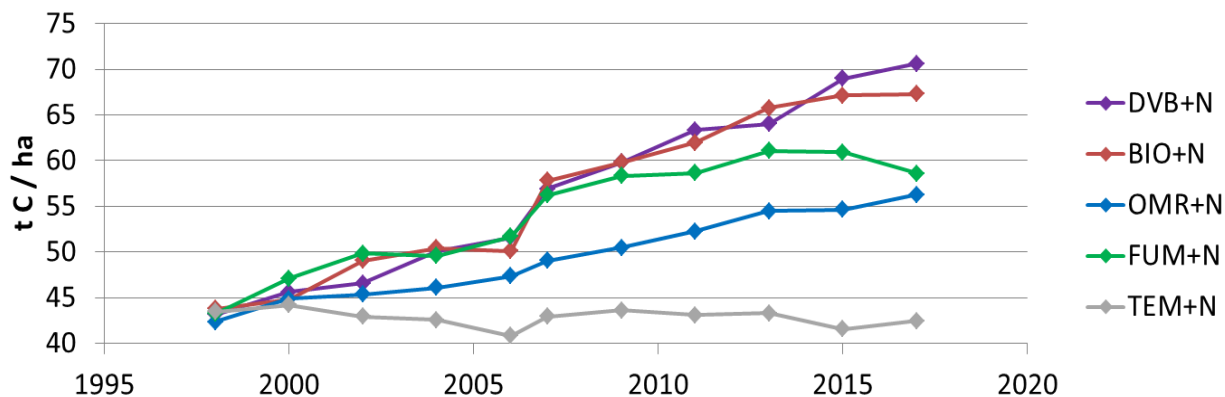
Quali Agro

- Dynamique d'augmentation de la matière organique du sol: variation avec type de PRO
- Effet des doses apportées, risques de saturation
- Bénéfices liés à l'augmentation de la matière organique:
  - Effet sur les rendements (présentation intérêt fertilisant)
  - Effet sur les propriétés physiques
  - Effet sur les activités biologiques
  - Effet sur les propriétés chimiques

# Evolution des stocks de carbone du sol

- Forte augmentation des stocks de C avec PRO
- Différences entre PRO liées à la stabilité de la MO apportée (BIO, DVB > FUM > OMR)
- Dynamique linéaire jusqu'en 2013 , puis ralentissement du stockage (sauf DVB) → équilibre, saturation + diminution des apports → **Calcul de rendement en C des apports**

*Evolution des stocks de C à masse équivalente de sol sur l'essai N+*



	Stockage C tC/ha.an	Rdt C tC/tC ap.	ISMO gC/gC
<b>DVB</b>	<b>1.50</b>	<b>0.69</b>	<b>0.76</b>
<b>BIO</b>	<b>1.43</b>	<b>0.73</b>	<b>0.73</b>
<b>OMR</b>	<b>0.73</b>	<b>0.39</b>	<b>0.47</b>
<b>FUM</b>	<b>1.15</b>	<b>0.56</b>	<b>0.64</b>

**>> aux objectifs 4 ‰**

# Bilan de stockage de carbone



Prendre en compte les émissions de  $N_2O$  au champ dans le bilan C de la pratique

Prendre en compte les émissions de  $N_2O$  pendant le compostage dans le bilan C de la pratique...

	Stockage C T C/ha.an	$N_2O$ gN/ha 2 ans	$N_2O$ T Eq $CO_2$ 2 ans	Bilan C T Eq $CO_2$ 2 ans
<b>DVB</b>	<b>1.43</b>	<b>3385</b>	<b>3.17</b>	<b>+ 7.4</b>
<b>TEM</b>	<b>-0.06</b>	<b>1111</b>	<b>1.04</b>	<b>-1.5</b>



# Evolution des stocks de carbone du sol: saturation?

Capacité de protection en C ( $g\ kg^{-1}$ ) =  $4.09 + 0.37 (A + LF)$  (%)

(Hassink, 1997)

Déficit de saturation en C ( $g\ kg^{-1}$ ) = Capacité de protection – C non particulaire ( $g\ kg^{-1}$ )

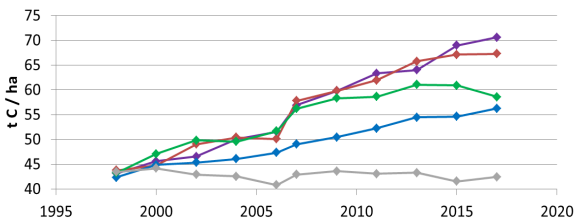
Degré de saturation (%) =  $\left(1 - \frac{\text{déficit de saturation } (g\ kg^{-1})}{\text{capacité de protection } (g\ kg^{-1})}\right) * 100$

2017	C (g/kg)	Capacité de protection (g/kg)	Degré de saturation (%)
DVB	17.36	19.6	62
BIO	16.46	19.6	59
OMR	13.51	19.6	48
FUM	14.13	19.6	50
TEM	10.10	19.6	36

- Equilibre pas encore atteint
- Degré de saturation de 50 à 60% dans les traitements PRO

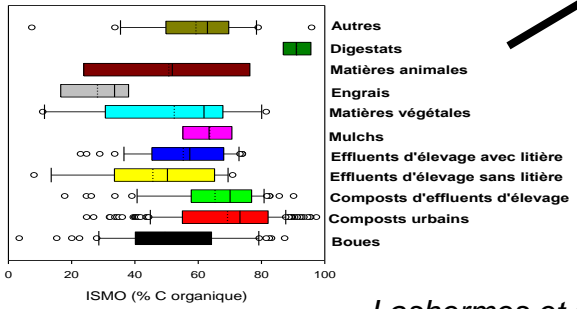
# Prédiction du stockage de C dans les sols

## mesures



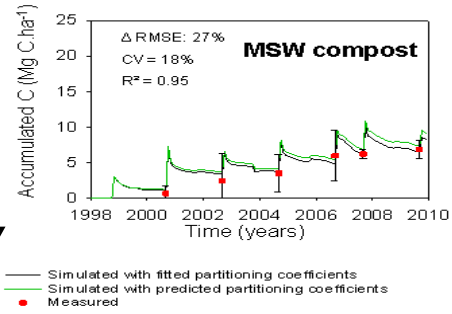
## Indicateur ISMO

440 MOE



Lashermes et al., 2009

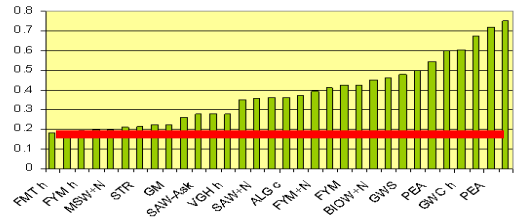
## Modèle Roth C



## Scenarios

T C. ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (20 ans)  
dose 1 T C. ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>

## Potentiel de Stockage de C

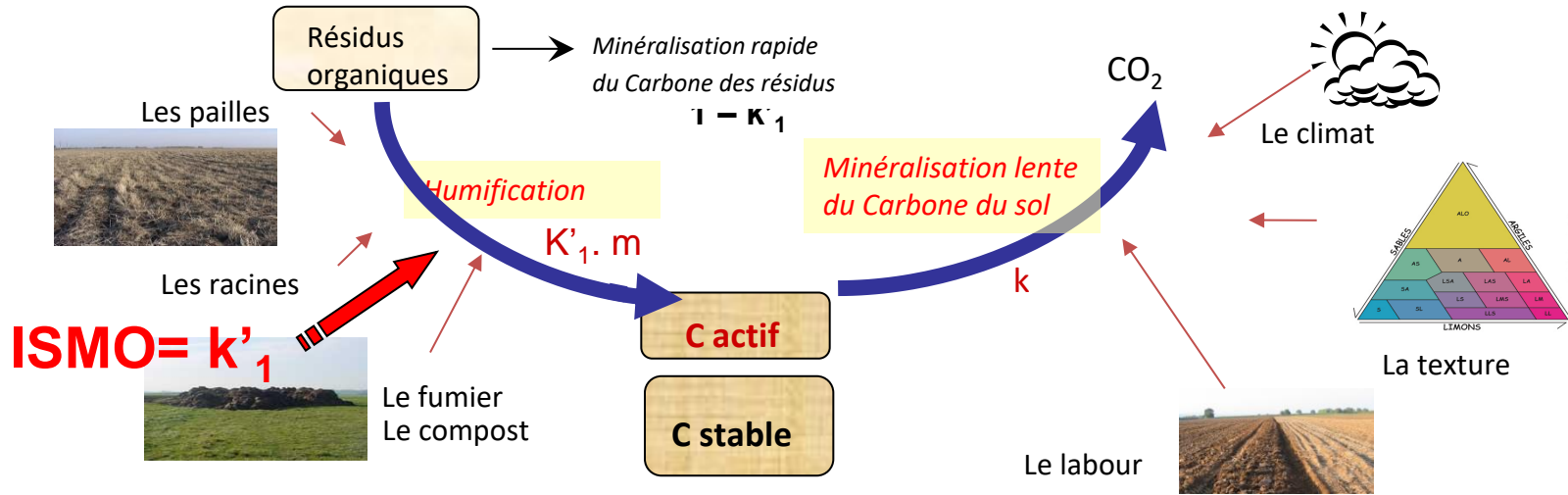


0.17 tC/ha.an : « 4 per 1000 »

Peltre et al., 2012

# Un modèle simple de calcul de bilan humique à la parcelle : AMG\*

\*AMG, du nom de ses auteurs: Andriulo, Mary, Guérif - INRA de LAON



Les principes du calcul:  $C_a = 33\% C_{org}$   $dC/dt = k_1 \cdot m - k \cdot C_a$

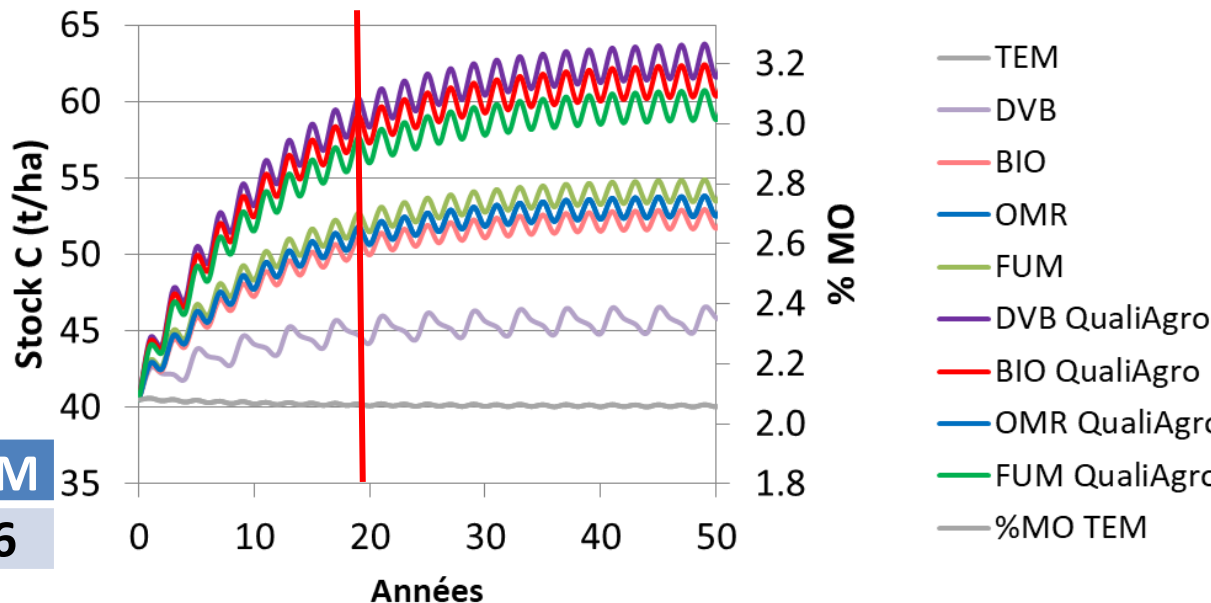
$k = 0.02$  à  $0.06$  fonction teneur argile, calcaire, travail du sol

# Evolution des stocks avec des doses d'apports équilibrées

- Doses fortes par rapport à l'équilibre de la fertilisation P
- Scénarios avec (C-B-M-B):
  - **Doses QualiAgro ou**
  - **4 fois moins pour DVB**
  - **1.5 fois moins BIO et FUM**
  - **Id pour OMR**

Stocks C atteint (% stocks mesurés)

DVB	BIO	OMR	FUM	TEM
65	78	95	92	96



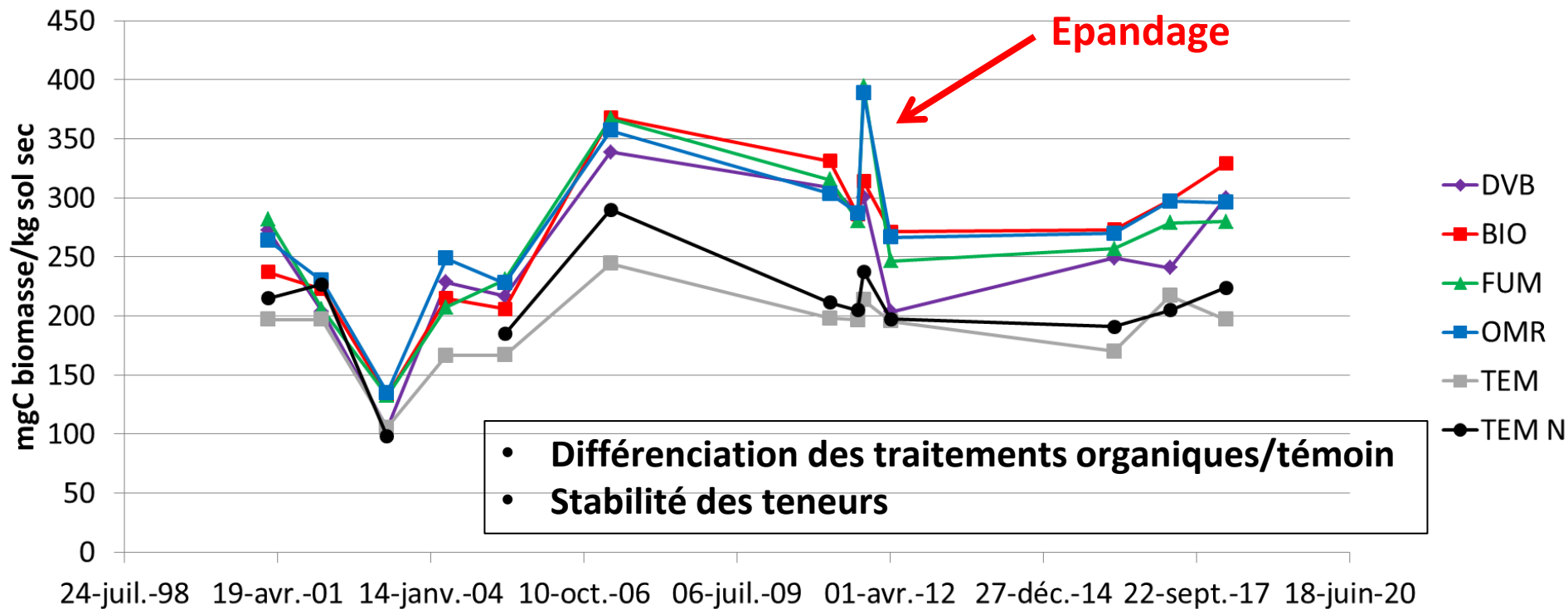


# Resultats

Quali Agro

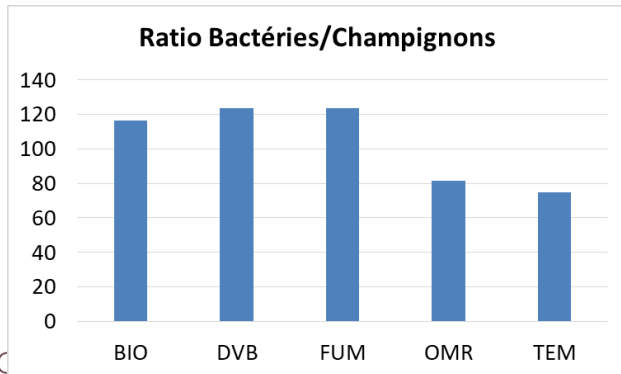
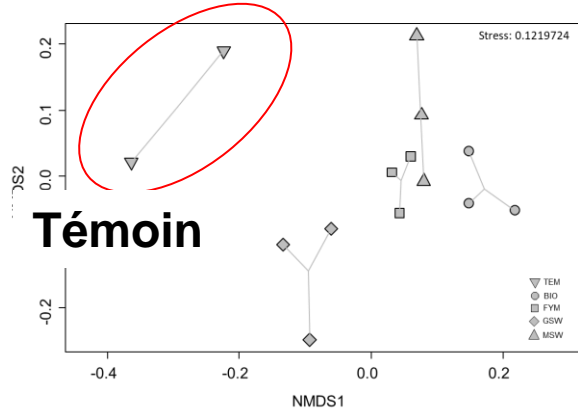
- Dynamique d'augmentation de la matière organique du sol: variation avec type de PRO
- Effet des doses apportées, risques de saturation
- Bénéfices liés à l'augmentation de la matière organique:
  - Effet sur les rendements (présentation intérêt fertilisant)
  - Effet sur les activités biologiques
  - Effet sur les propriétés physiques
  - Effet sur les propriétés chimiques

# Augmentation de la biomasse microbienne

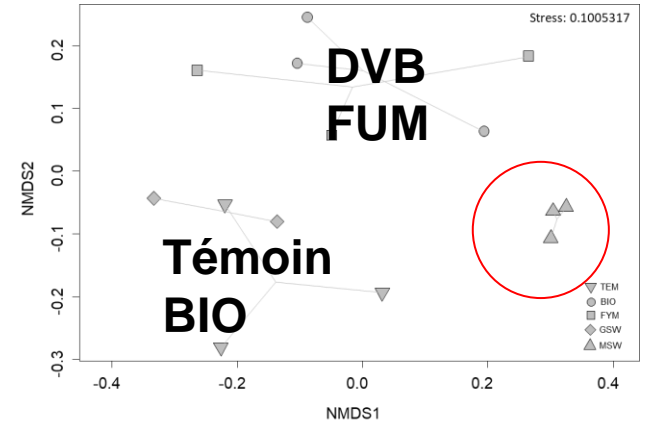


# Modification des structures des communautés microbiennes

## Structure des communautés de procaryotes

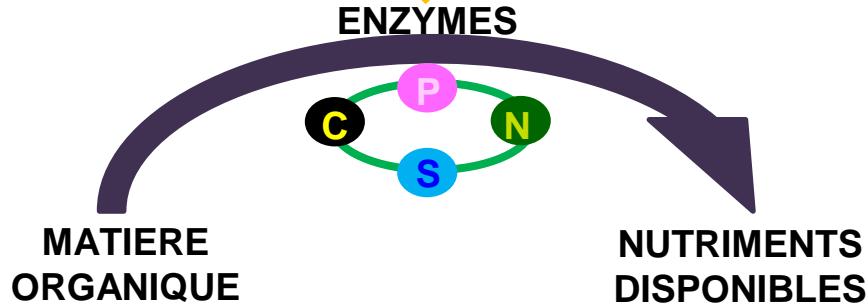


## Structure des communautés fongiques



# Indicateurs microbiologiques de suivi du fonctionnement des sols

## RELATION MICROORGANISMES ET FERTILITE DES SOLS



### Enzymes suivies 2012-2018

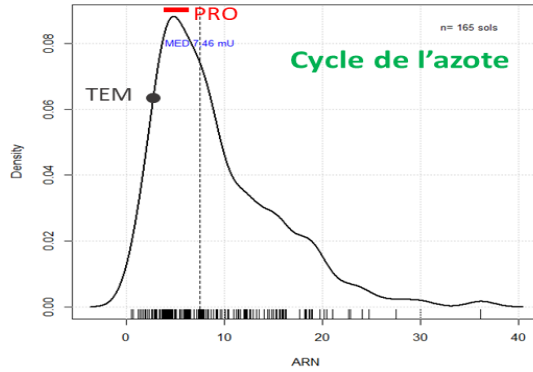
*$\beta$ -Glucosidase*  
*Phosphatase*  
*Arylamidase*  
*Uréase*  
*Arylsulfatase*



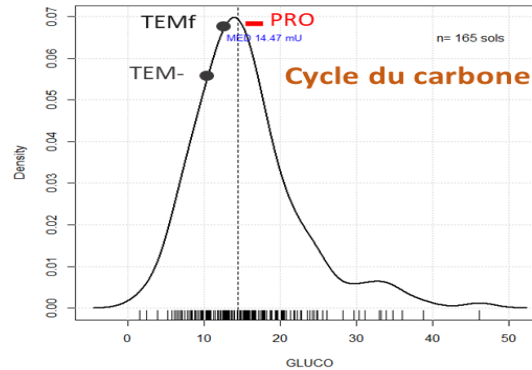


# Positionnement des sols de Qualiagro par rapport au référentiel des sols de cultures françaises

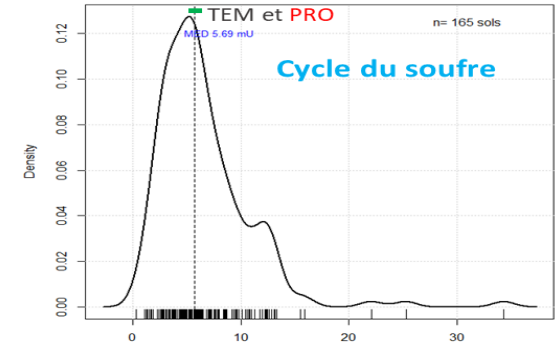
activité Arylamidase dans les parcelles agricoles françaises



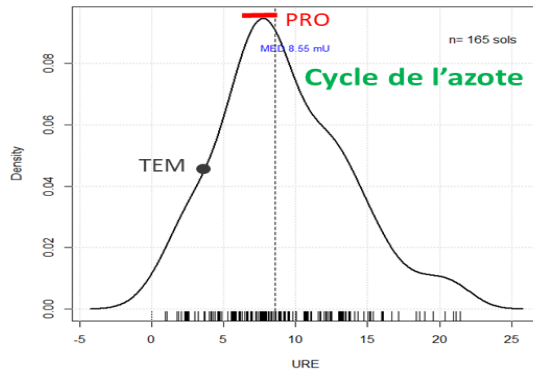
activité Glucosidase dans les parcelles agricoles françaises



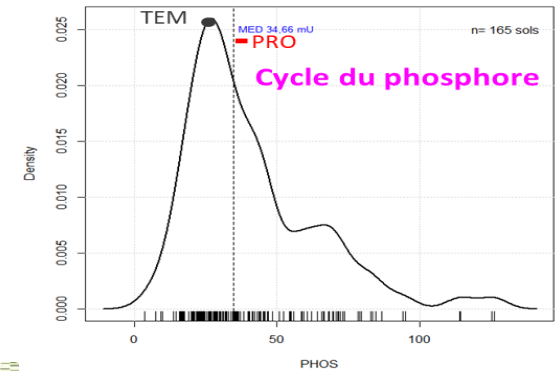
activité Arylsulfatase dans les parcelles agricoles françaises



activité Uréase dans les parcelles agricoles françaises



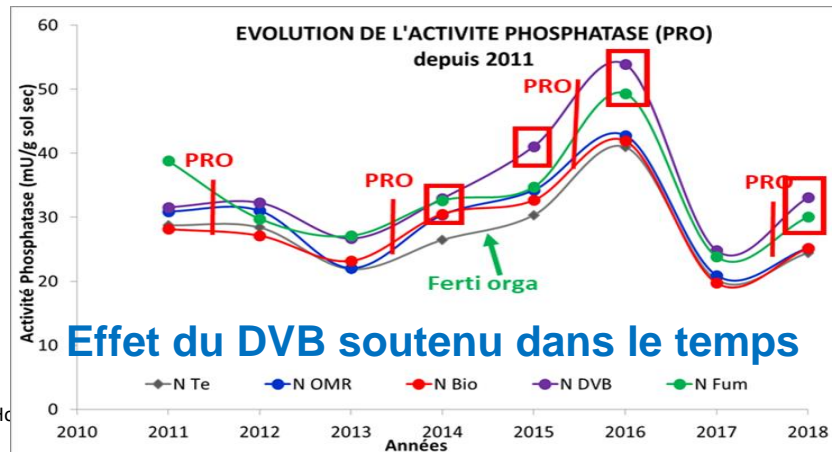
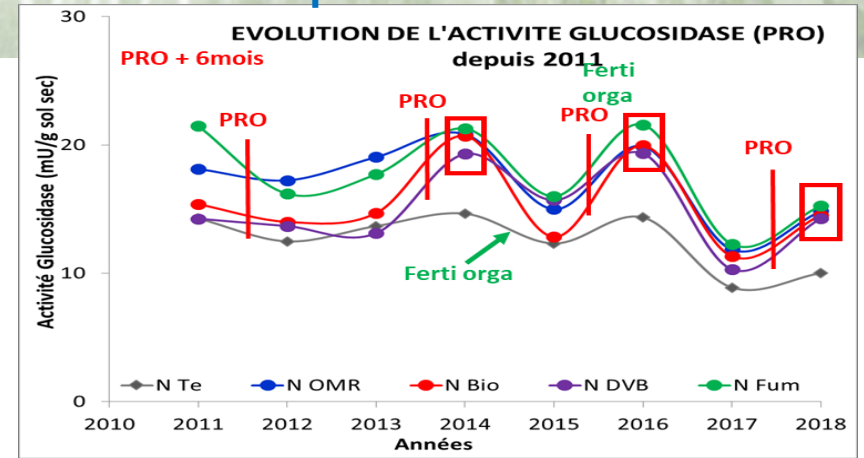
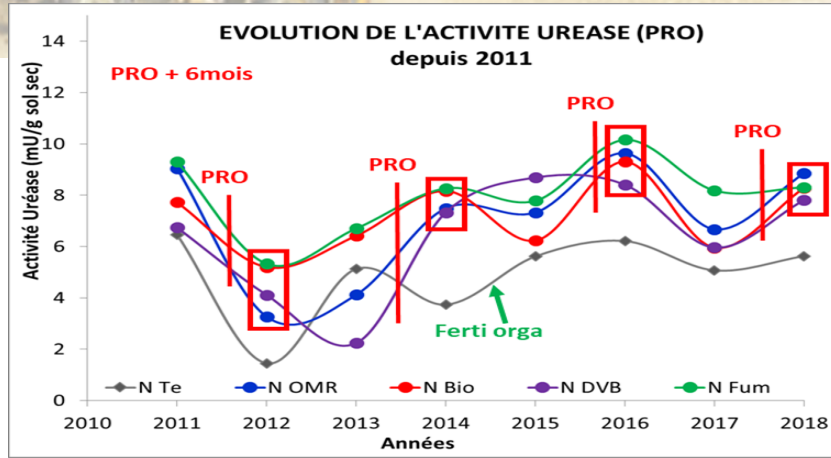
activité Phosphatase dans les parcelles agricoles françaises



Les apports de PRO augmentent les activités enzymatiques

# Suivi temporel de l'effet PRO

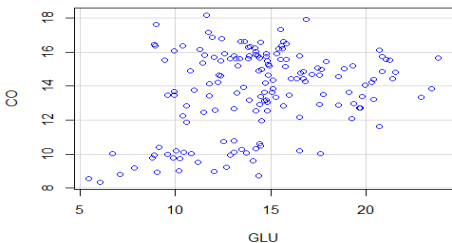
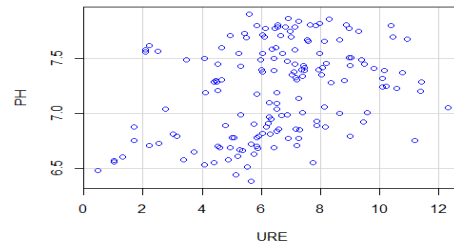
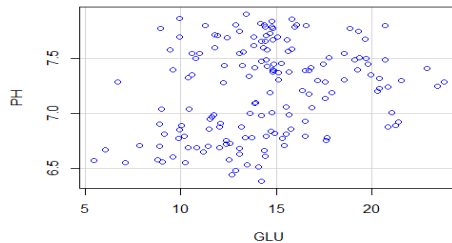
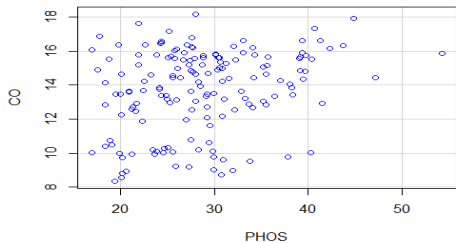
## Effet des PRO soutenu dans le temps



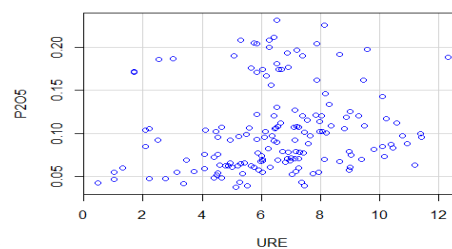
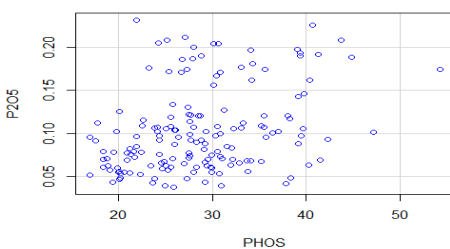
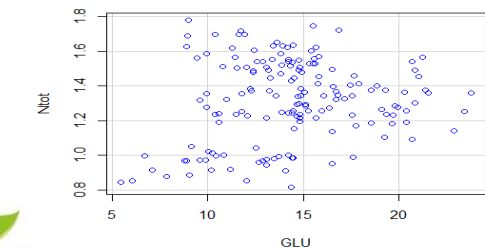
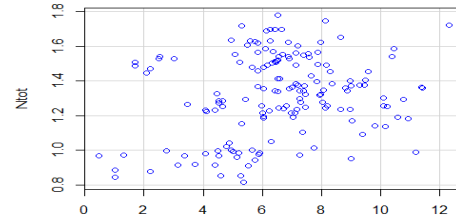
## Effet du DVB soutenu dans le temps

Effet toujours plus important 6 mois après l'apport

# Effets liés aux paramètres des sols?



**AUCUNE CORRELATION AVEC LES PARAMETRES GLOBAUX (C orga, N total, pH, P Olsen)**



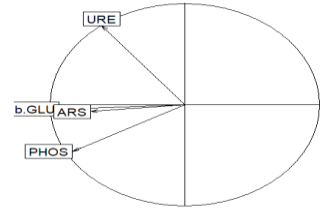
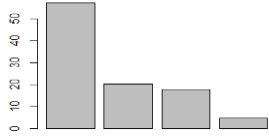
# Effets des paramètres qualitatifs des PRO dans les sols?

	ISMO	Azote des grains	Azote restitué au sol	Apport CO PRO	Apport NH4 PRO	Apport azote miné PRO	Apport azote orga PRO
Arylsulfatase (Cycle S)		✓		✓			✓
$\beta$ -Glucosidase (Cycle C)							
Phosphatase (Cycle P)		✓		✓			✓
Uréase (Cycle N)		✓		✓	✓	✓	✓

- Lien du fonctionnement biologique des sols avec des paramètres qualitatifs et non quantitatifs (forme de l'azote, disponibilité)

# Effets de la mise en place de légumineuses

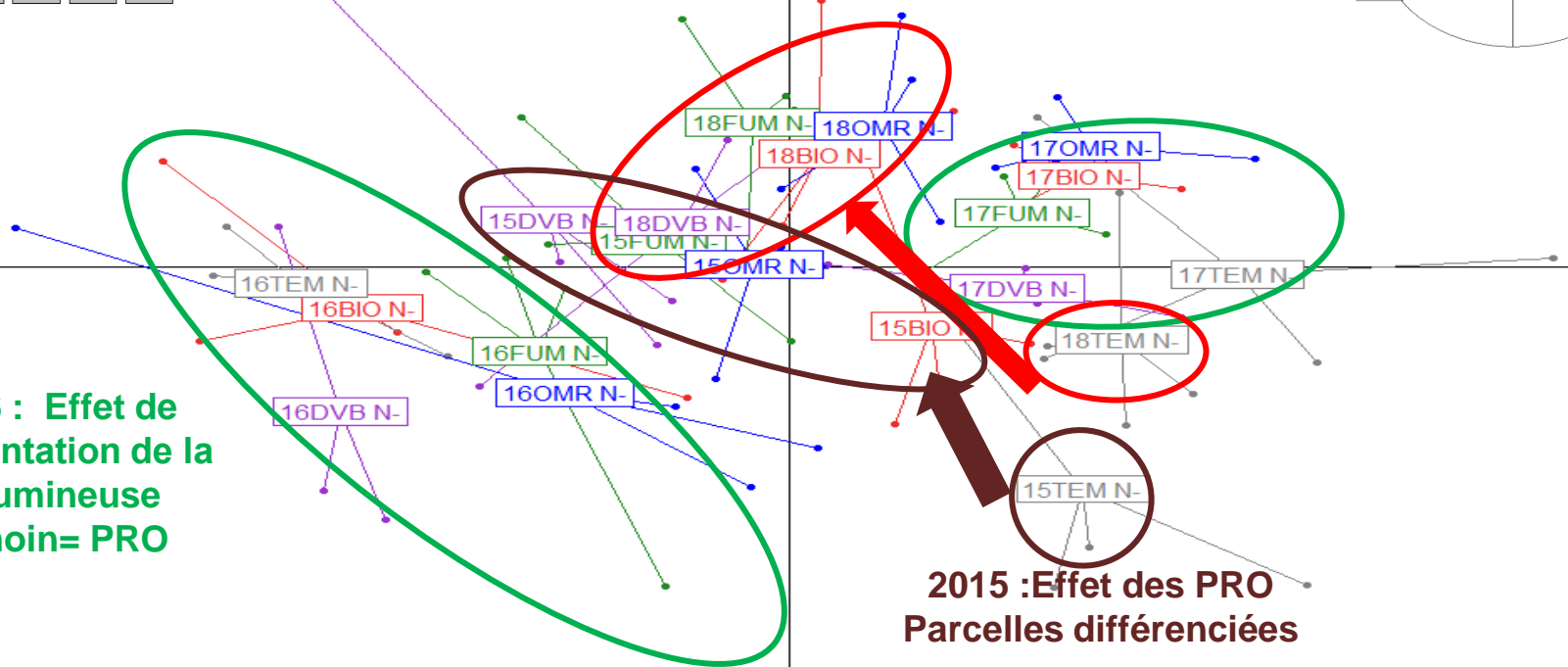
## Parcelles témoins et parcelles PRO



**2018 : Effet de l'élimination de la légumineuse**  
**Témoin ≠ PRO: résilience**

**2016 : Effet de l'implantation de la légumineuse**  
**Témoin= PRO**

**2015 : Effet des PRO**  
**Parcelles différenciées**





# Augmentation des populations d'auxiliaires



**CARABIDAE => auxiliaires permettant le biocontrôle**

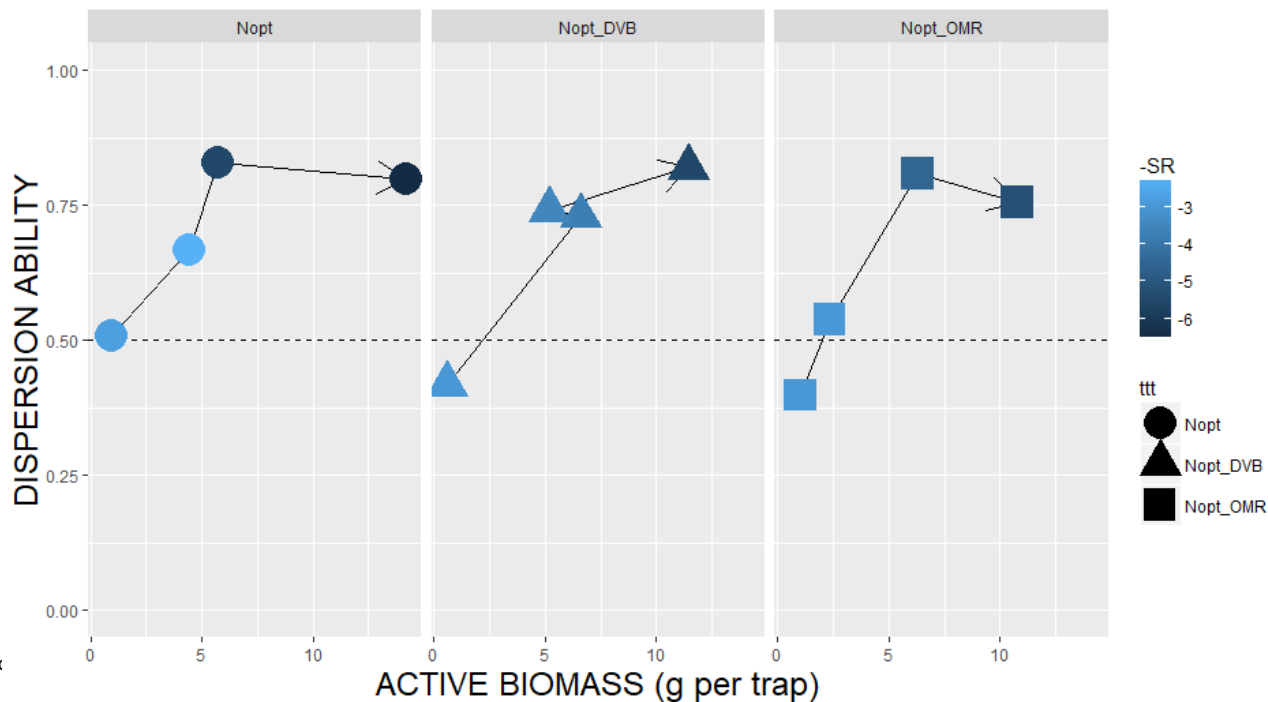
Suivi temporel 2012-2018: utiliser les traits, la diversité  $\alpha$

$\alpha$  diversité augmente au cours du temps

**Pool d'espèces à fortes capacités de dispersion**

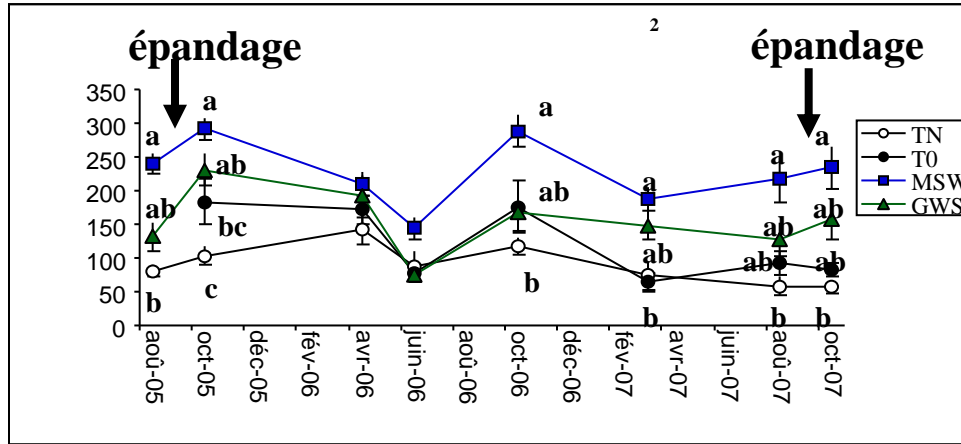
Reflète un puits à l'échelle paysagère

**Capacité d'accueil en augmentation (la biomasse piégée au cours du temps) et donc le potentiel de biocontrôle**

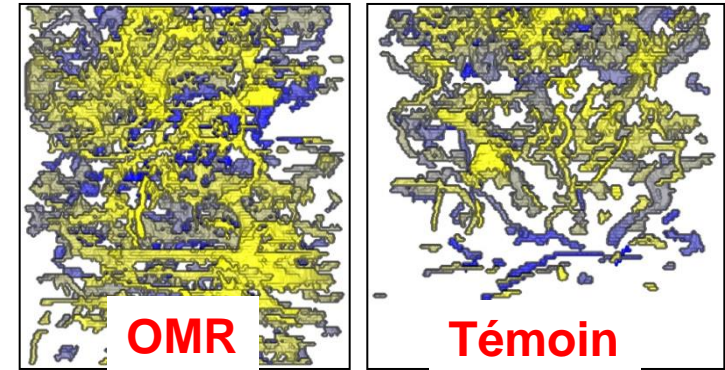


# Augmentation des vers de terre

## Augmentation de la densité de vers (nombre/m<sup>2</sup>)



## Augmentation de la porosité



(Capowiez et al., 2009)

# Resultats

Quali Agro

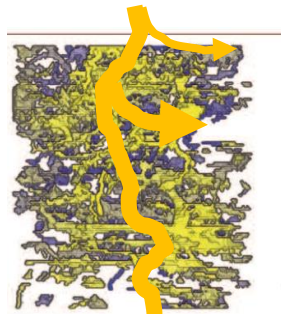
- Dynamique d'augmentation de la matière organique du sol: variation avec type de PRO
- Effet des doses apportées, risques de saturation
- Bénéfices liés à l'augmentation de la matière organique:
  - Effet sur les rendements (présentation intérêt fertilisant)
  - Effet sur les activités biologiques
  - **Effet sur les propriétés physiques**
  - Effet sur les propriétés chimiques

# Amélioration des propriétés physiques



- PRO

+ PRO



EAU

**PRO → augmentation MO**

↗ porosité, ↗ stabilité de la structure

Infiltration de l'eau  
Ressuyage



**traficabilité des sols  
Résistance au tassement**

Rétention d'eau



**eau disponible**

Flux et qualité des  
eaux



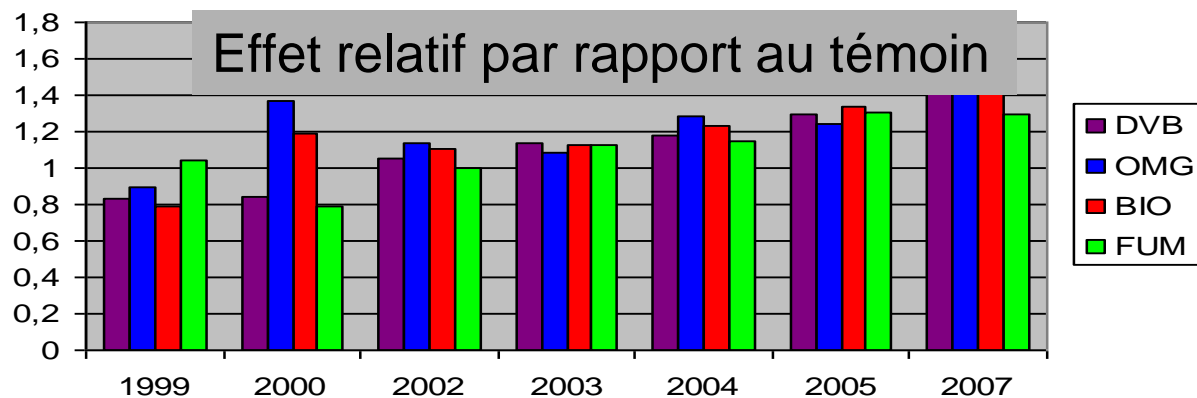
**Qualité des eaux  
souterraines et  
superficielles**

(Capowiez, 2009)

# Amélioration des propriétés physiques

## Stabilité de la structure → Résistance à l'érosion

- ✓ Effet positif des composts sur la stabilité des agrégats
- ✓ Effet relatif croissant
- ✓ Efficacité variable des composts entre les années
- ✓ Indice de battance:  
**2.4 → 1.76 (assez battant)**

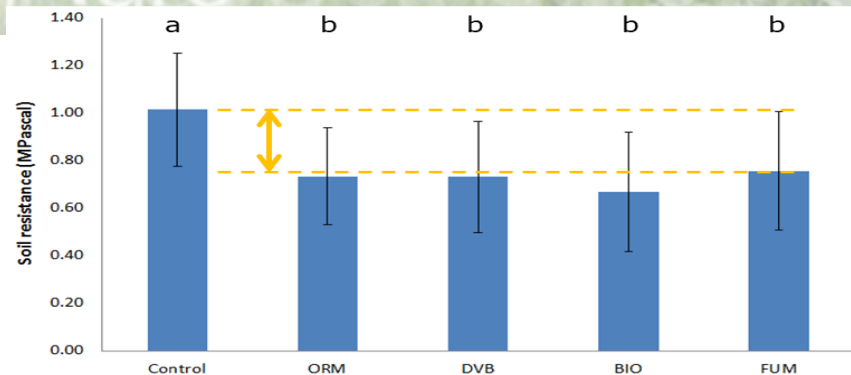


(Annabi et al., 2011)

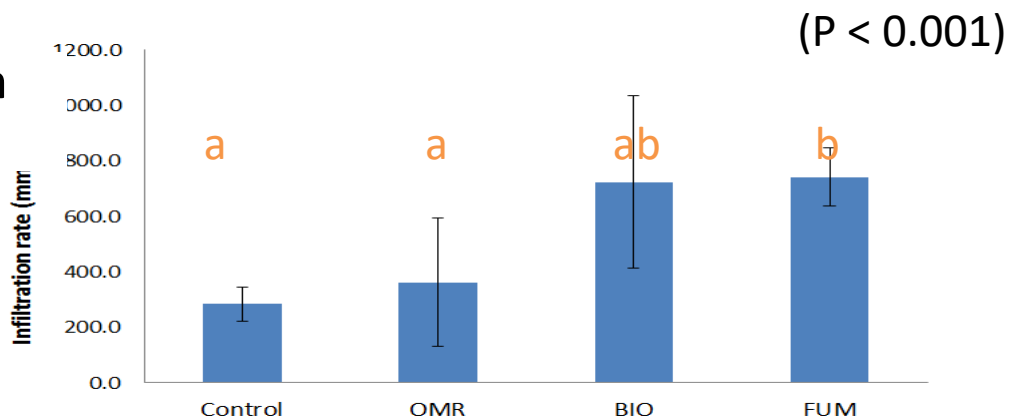


# Amélioration des propriétés physiques

Diminution de la résistance à la pénétration

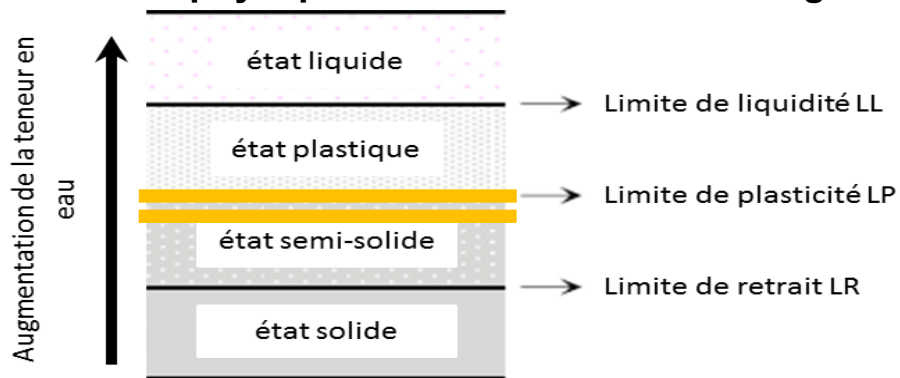


Augmentation de la vitesse Infiltration



# Amélioration des propriétés physiques

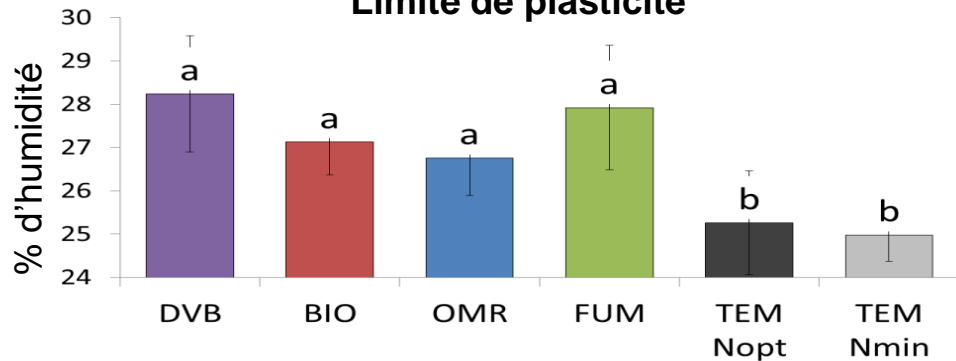
## Etat physique du sol : Limite d'Atterberg



Travail du sol sans risque de dégradation de la structure: **entre 0.8 LP et**



## Limite de plasticité



↗ de la limite de plasticité dans les parcelles amendées



Travail du sol possible à un % d'humidité plus élevé

↗ du nombre de jours disponibles pour aller sur les parcelles

# Amélioration des propriétés physiques

## Réserve utile (différenciation horizon de surface)

Temoin	DVB	FUM	OMR	BIO
54 ± 1 mm	59 ± 4 mm	53 ± 3 mm	56 ± 4 mm	56 ± 3 mm

## Diminution des besoins en irrigation (modèle BUDGET\*)

~4 mm d'eau économisés entre témoin

et DVB  $N_{opt} \rightarrow 4 \text{ l/m}^2$

\* Raes, D. 2005: BUDGET - A soil water and salt balance model.- <http://www.irrisoft.org/>



# Resultats

Quali Agro

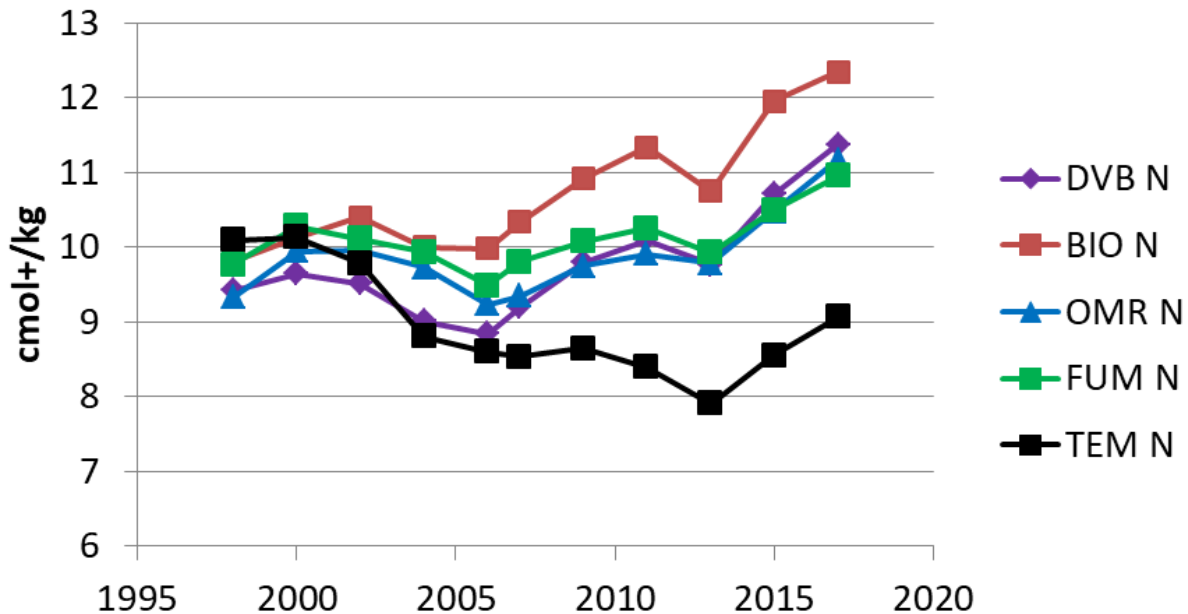
- Dynamique d'augmentation de la matière organique du sol: variation avec type de PRO
- Effet des doses apportées, risques de saturation
- Bénéfices liés à l'augmentation de la matière organique:
  - Effet sur les rendements (présentation intérêt fertilisant)
  - Effet sur les activités biologiques
  - Effet sur les propriétés physiques
  - **Effet sur les propriétés chimiques**

# Augmentation de la CEC

La CEC augmente avec la matière organique

La charge en cations échangeables et la disponibilité des éléments nutritifs varie avec les produits :

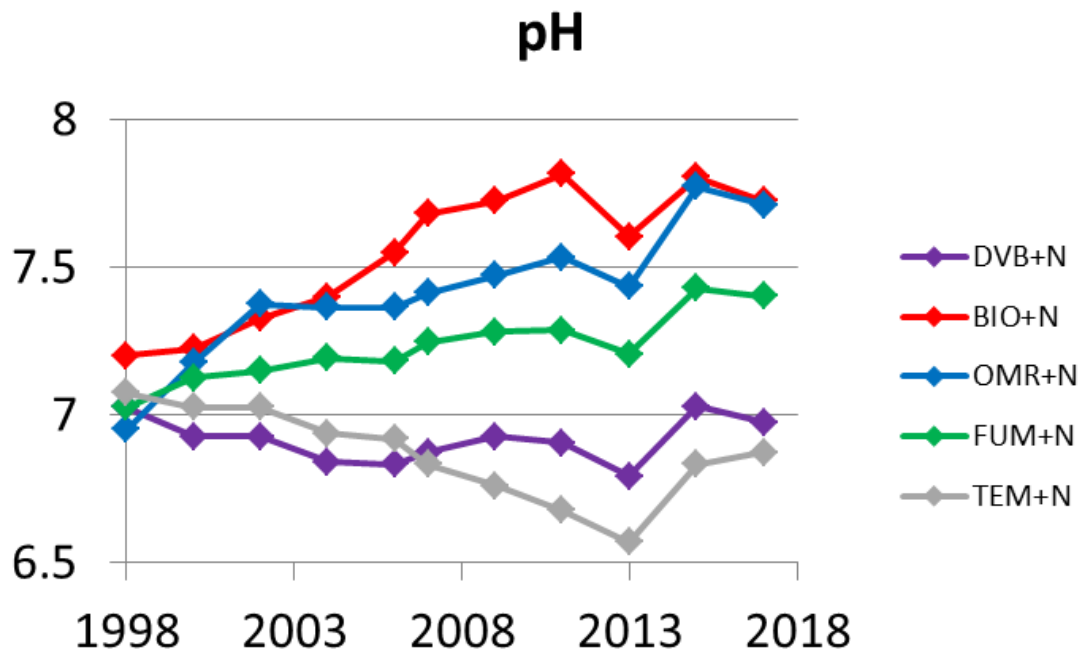
- $K_2O$  et  $MgO$  : FUM
- $P_2O_5$  : DVB





# Augmentation du pH

Certains composts (**BIO**, **OMR**) ont un pouvoir chaulant → Amendement basique



# Conclusion (1/3)

Quali Agro

- Quelle efficacité des amendements à augmenter la MO des sols?

**Efficacité réelle, dépend des caractéristiques de la MO des amendements mais aussi du raisonnement des doses pour équilibrer la fertilisation**

- Vais-je observer un plafonnement du taux de matière organique, ou de ses bénéfices ?

**Oui plafonnement lié au niveau d'équilibre correspondant aux flux de C entrant et aussi à la capacité de stockage des sols.**

**Evolution des bénéfices (services) : dépend de la « fonction » qui relie le service aux évolutions des taux de MO; services peuvent être liés à d'autres effets des apports de MO (pH, éléments nutritifs...)**

# Conclusion (2/3)

- Quels sont les bénéfices d'apports organiques répétés ? Sont-ils proportionnels au % MO ?

**Augmentation fourniture en éléments nutritifs, amélioration des propriétés physiques, biologiques.**

**Lien avec teneur en MO existe mais pas uniquement: fonction de pédotransfert avec biomasse microbienne, stabilité de la structure, rétention d'eau....**

- Au bout de combien de temps vais-je commencer à les percevoir ?

**Effets fertilisants peuvent être immédiats (dépend des PRO)**

**Autres effets dépendent de l'évolution des stocks et donc des doses et fréquences d'apport.**

# Conclusion (3/3)



- Comment choisir un produit plus adapté qu'un autre pour minimiser cette durée ?

**Prendre en compte la stabilité de la MO mais aussi les équilibres entre éléments nutritifs. Prévoir d'utiliser des produits complémentaires (fertilisants et amendants: compost et digestat)**

- Si je travaille mon sol, vais-je minimiser l'augmentation du taux de matière organique, ou ses bénéfices ?

**Le travail simplifié ou non labour modifie la distribution du C dans le profil, par forcément les stocks totaux. Les stocks dépendent des entrées de C et donc de la couverture du sol, des quantités de PRO apportées....**

**Prendre en compte l'ensemble des contraintes et bénéfices. Ne pas raisonner que sur les taux de MO.**





Merci de votre attention  
Merci à tous ceux qui contribuent.....

