



## Une nouvelle équation simple et robuste pour estimer la minéralisation en azote de la matière organique des sols français de grandes cultures.

Eric Justes<sup>1</sup>, Hugues Clivot<sup>2</sup>, Matthieu Valé<sup>3</sup>, Jean-Pierre Cohan<sup>4</sup>,  
Luc Champolivier<sup>5</sup>, François Piraux<sup>4</sup>, Daniel Plaza-Bonilla<sup>6</sup>,  
François Laurent<sup>4</sup> et Bruno Mary<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INRA, UMR AGIR, Toulouse (actuellement CIRAD - SYSTEM Montpellier)

<sup>2</sup>INRA, UR AgrolImpact, Barenton-Bugny (Laon)

<sup>3</sup>AUREA, Ardon, <sup>4</sup>ARVALIS, Boigneville & La Jaillière,

<sup>5</sup>TERRES INOVIA Castanet, <sup>6</sup>CSIC-EEAD Saragosse (Espagne)

# Contexte

Une vieille histoire... mais qui est toujours d'actualité !

L'équation dite du k2 est largement utilisée pour prédire la vitesse potentielle de minéralisation en N des MOS ( $V_p$ ) et la minéralisation nette en N en conditions réelles en fonction du climat ( $V_r$ )

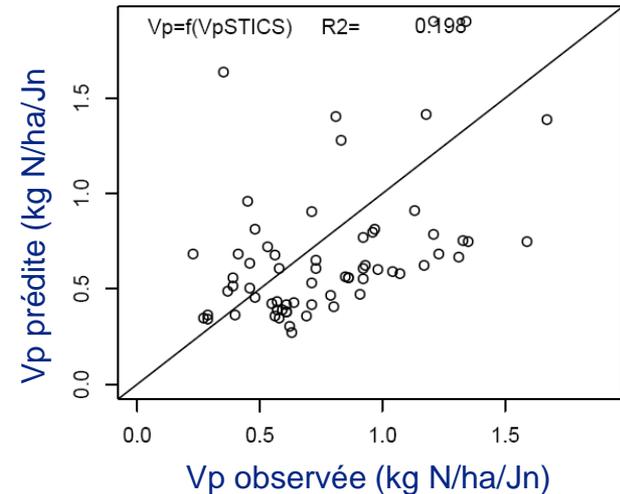
Elle est actuellement implémentée en France dans divers OAD (ex. AzoFert) et modèle de simulation (ex. STICS)

$$V_p = f(\text{Stock } N_{\text{organique}}) \times f(\text{Argile}) \times f(\text{CaCO}_3)$$

$$V_r = V_p \times T_n [f(\text{Humidité}) \times f(\text{Température})]$$

[Temps normalisé ou climat du sol en  $J_n$  à 15°C &  $H_{cc}$ ]

Modèle et paramétrage déterminés par des expé. *in vitro* (1980-1990)



Les ordres de grandeur prédits sont globalement corrects mais les prédictions sont parfois insatisfaisantes dans certains sols (sableux, riches en MO) et systèmes de culture, et donc :

- Un besoin d'amélioration de la prédiction pour avoir plus de robustesse et de précision : important pour gérer la fertilisation azotée et l'évaluation environnementale de la gestion du carbone et de l'azote (diverses pertes N)
- Quid d'autres conditions qui modifient le stock/répartition de MOS et climat du sol ?

# Objectifs

Quantifier et améliorer la prédiction de la minéralisation en N *in situ*

- Caractérisation et quantification de la minéralisation *in situ* de la MO du sol (MOS) sur un réseau expérimental en France en SOL NU
  - Publication de la base de données dans Data\_in\_Brief (Clivot et al., à soumettre)
- Proposer une nouvelle équation de minéralisation en N de la MOS pour les sols et systèmes de culture français **simple et facilement « renseignable »**
  - **Publication dans Soil Biology and Biochemistry (Clivot et al., 2017)**
- Mieux prendre en compte le climat du sol (**effet humidité**) pour les types de sol (argileux, limoneux et sableux) au moyen, si possible, de critères simples
  - Publication en préparation (Plaza-Bonilla et al., soumission prévue à SBB)
- *Implémentation de la fonction dans les modèles de simulation (STICS, AMG, CHN) et évaluation des performances en sol nu et sous cultures (avec analyse des conséquences sur les sorties environnementales)*

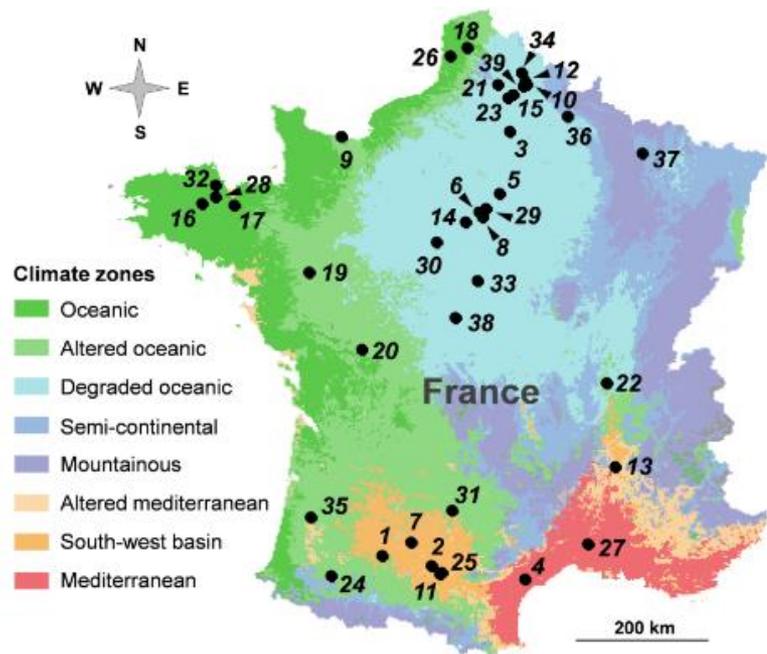
# Matériels et Méthodes

Démarche pour quantifier et modéliser la minéralisation en N *in situ*

Un réseau d'essais constitué pour quantifier la minéralisation de N des MOS *in situ*

Et poursuite des travaux initiés durant la thèse de M. Valé (2006) à INRA Toulouse en collaboration avec INRA Laon, ARVALIS et TERRES INOVIA

65 expérimentations au champ en sol nu réparties sur 39 sites  
(Réseau INRA – ARVALIS – TERRES INOVIA)



Une large gamme de types de sol et de régions en systèmes de grandes cultures

	Units	Min	Max	Median	Mean	SD
<b>Soil properties</b>						
Clay	g kg <sup>-1</sup>	24	396	191	201	76
Silt	g kg <sup>-1</sup>	55	814	539	502	198
Sand	g kg <sup>-1</sup>	22	895	184	218	174
CaCO <sub>3</sub>	g kg <sup>-1</sup>	0	436	4	64	123
pH		5.7	8.4	7.7	7.5	0.8
SOC	t ha <sup>-1</sup>	27.0	147.2	45.8	51.7	24.4
SON	t ha <sup>-1</sup>	2.6	12.6	5.0	5.3	1.9
C/N		7.2	15.3	9.3	9.6	1.5

# Les types de sol

En Crambade (31)  
**terrefort**

Bouillac (82)  
**boulbène**

Montardon  
(64)  
**Touya**

La Jaillière  
(44)  
**limon**

Thizay  
(36)  
**Argilo-  
calciare**

Sabres (40)  
**Sable des  
Landes**

St Hilaire au temple (51)  
**Terre de craie**

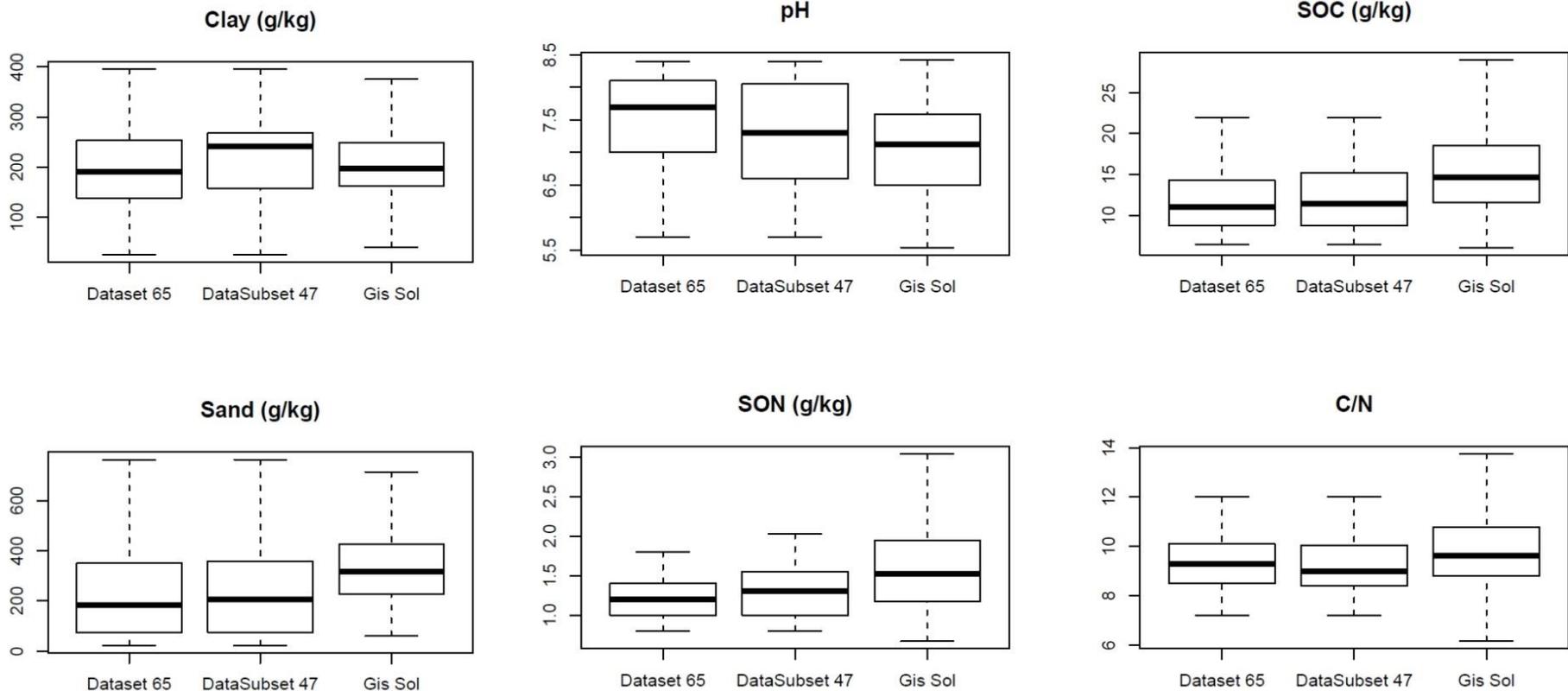
Ouzouer le Marché (45)  
**Limon de Beauce**



# Matériels et Méthodes

Une base de données représentant les sols français (données GIS SOL)

Une base de données représentant correctement la gamme de sols français



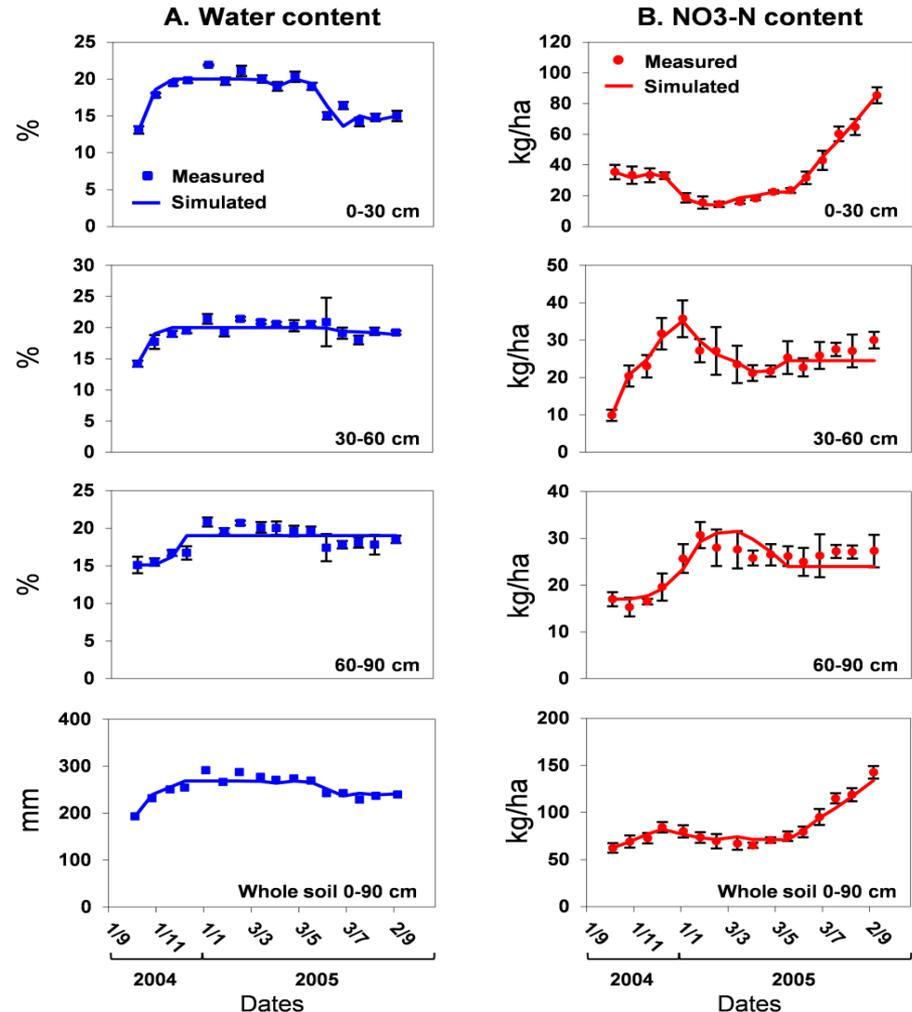
# Matériels et Méthodes

## Calcul de la vitesse potentielle de minéralisation en N de la MOS

Situations avec résidus de culture exportés en « sol nu »

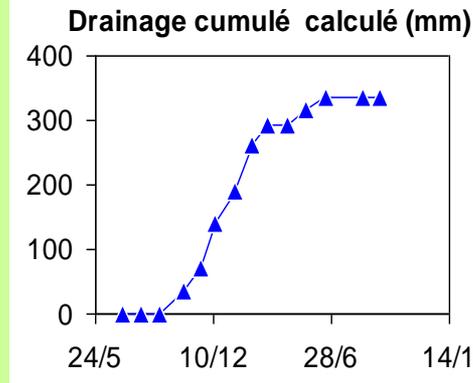
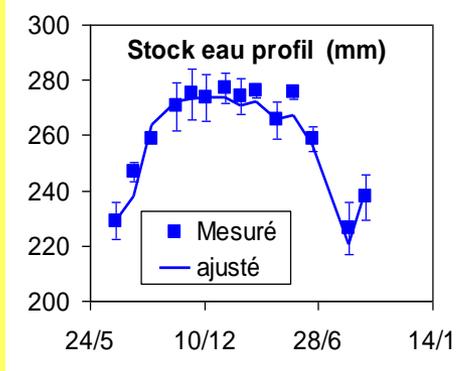
Mesures régulières des profils d'eau et de N minéral du sol durant plusieurs mois (6 à 14 mois)

Calcul avec le modèle LIXIM (Mary *et al.*, 1999)

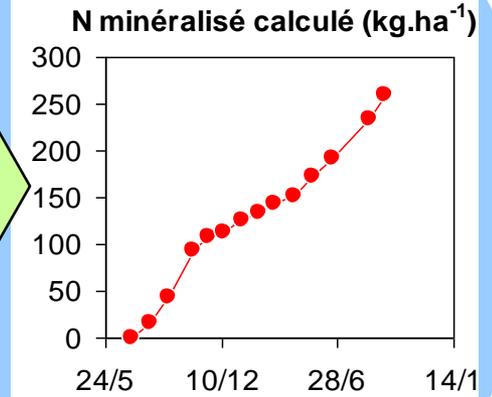


# Matériels et Méthodes

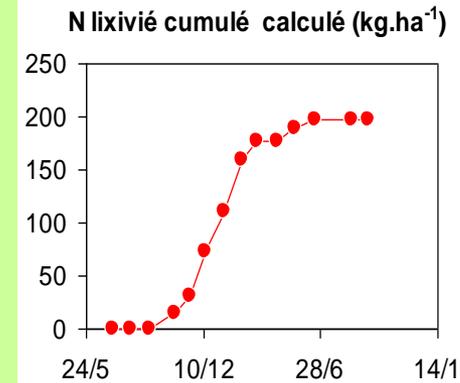
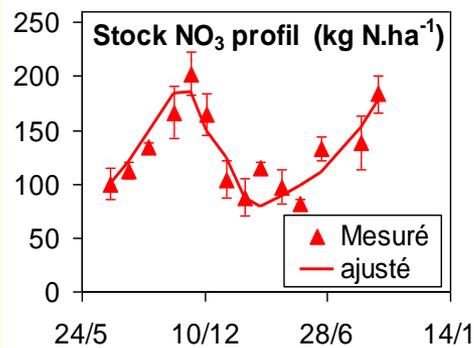
## Calcul de la vitesse potentielle de minéralisation en N de la MOS



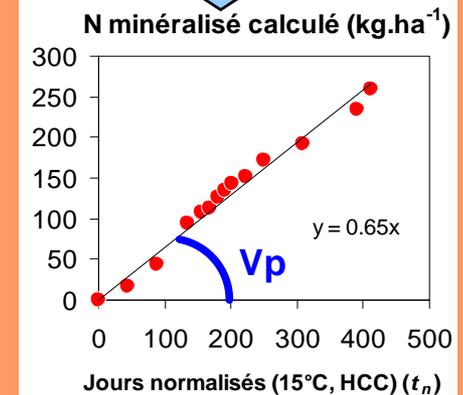
Calcul dynamique par défaut de bilan N



Calcul dynamique par optimisation numérique



Calcul du temps normalisé (effet température et humidité)

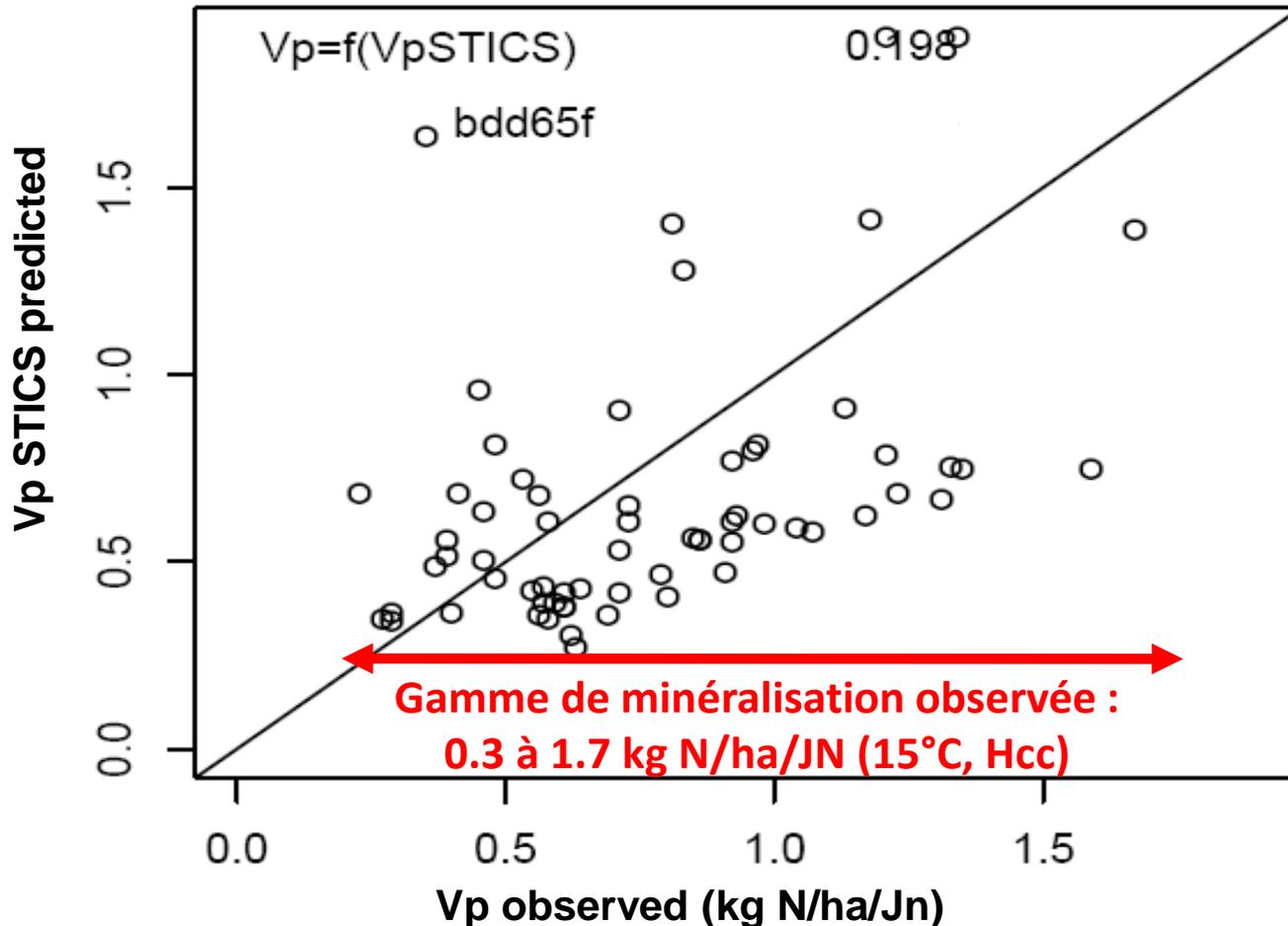


# Résultats

Evaluation de l'équation « k2 » diffusée par COMIFER

$$K_2 pot = \frac{65}{(110 + Arg)(600 + CaCO_3)}$$

EF = 0.25 ; R<sup>2</sup> = 0.198  
RMSE= 0.376



# Résultats

## Développement d'un nouveau modèle (non linéaire)

### ➤ Modélisation de la Vitesse potentielle de minéralisation $V_p$ en fonction des propriétés physico-chimiques

Modeling step	Dataset	Introduced variable	Generic model	<i>EF</i>	<i>Bias</i>	<i>RMSEP</i>
<i>i</i>	<i>n</i>	$V_i$	$\hat{V}_p(i) = f_1(V_1) \cdot f_2(V_2) \cdots f_i(V_i)$			kg N ha <sup>-1</sup> nday <sup>-1</sup>
<b><u>Soil model</u></b>						
1	65	SON	$\hat{V}_p(1) = f_1(SON)$	0.18	0.03	0.29
2	65	Argile	$\hat{V}_p(2) = \hat{V}_p(1) \cdot f_2(Clay)$	0.22	0.03	0.29
3	65	pH	$\hat{V}_p(3) = \hat{V}_p(2) \cdot f_3(pH)$	0.43	0.00	0.26
4	65	C/N	$\hat{V}_p(4) = \hat{V}_p(3) \cdot f_4(C/N)$	0.56	0.00	0.23
5	65	CaCO <sub>3</sub> (Ca)	$\hat{V}_p(5) = \hat{V}_p(4) \cdot f_5(Ca)$	<b>0.61</b>	<b>0.00</b>	<b>0.22</b>

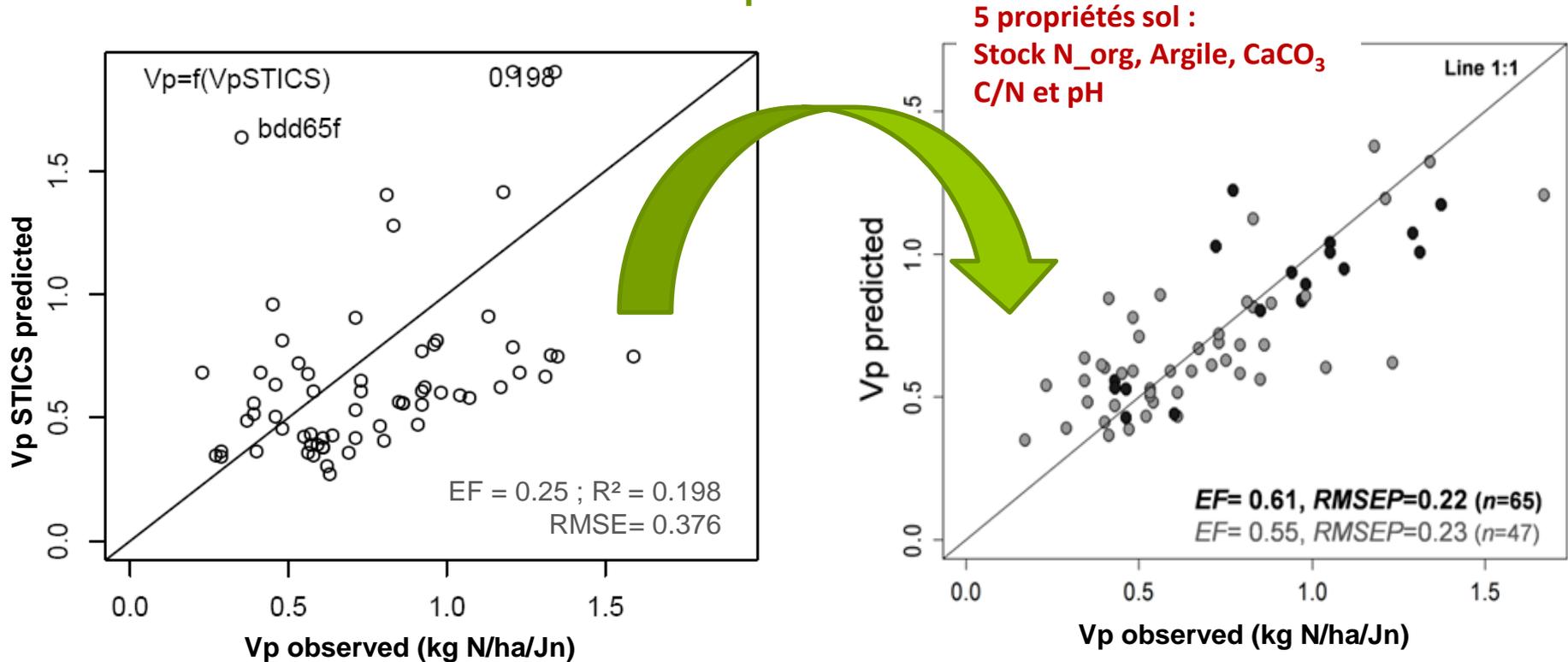
### Modèle empirique non linéaire à structure multiplicative

Modèle avec +15% de variance expliquée par rapport à des modèles linéaires additifs (RLM, PLS)

# Résultats

## Validation du nouveau modèle basé sur des caractéristiques simples

### ➤ Evaluation de la nouvelle fonction de prédiction

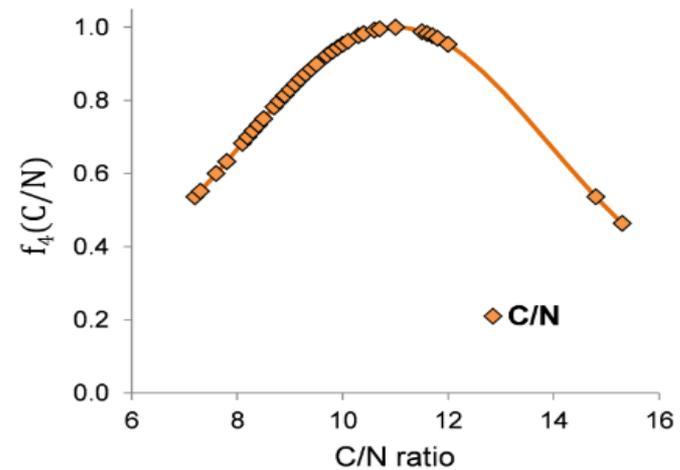
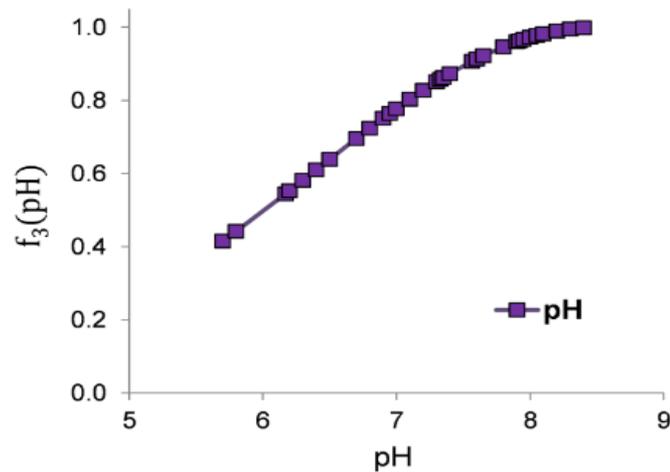
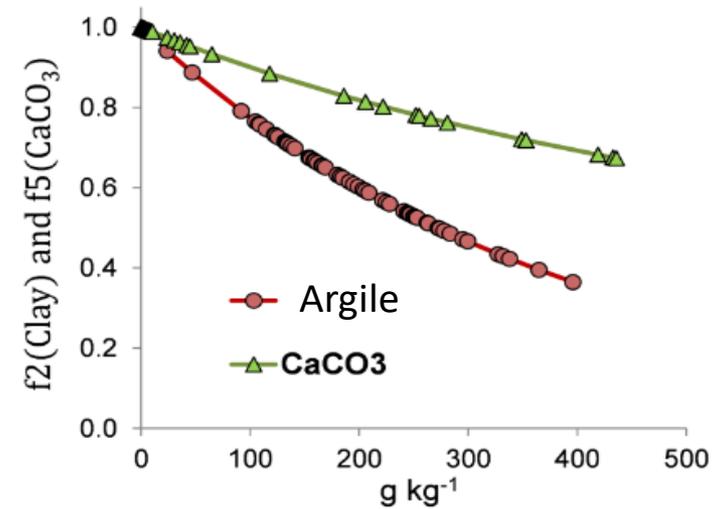
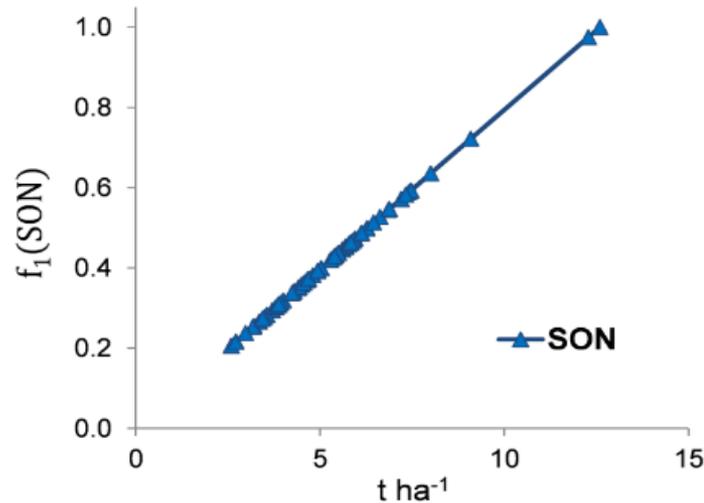


### ➤ Meilleure prédiction (plus précise et plus robuste) avec le nouveau modèle (fonction)

➔ Fonction implémentée dans modèles de simulation (STICS v9 & CHN ; AMG v2)

# Résultats

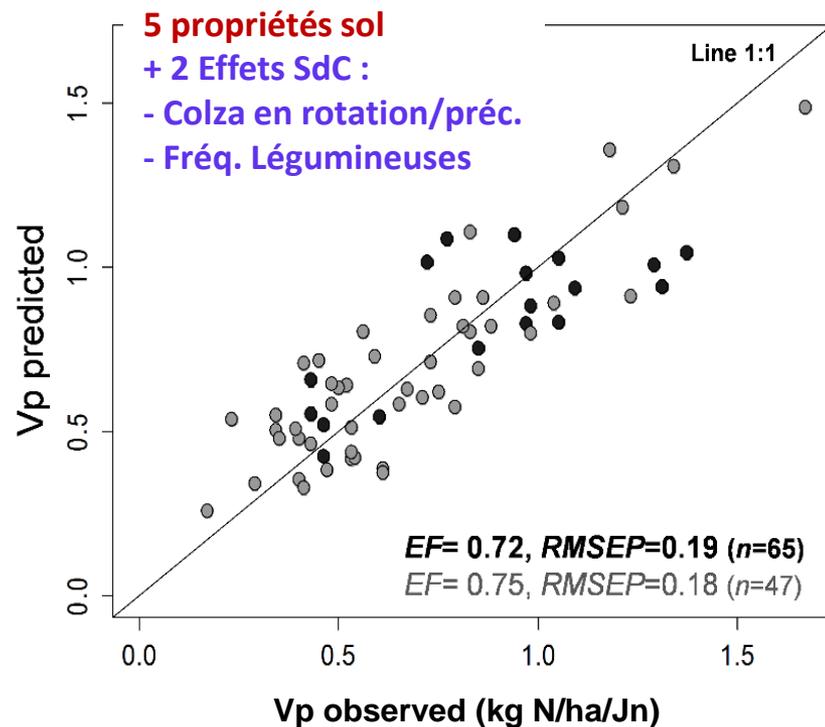
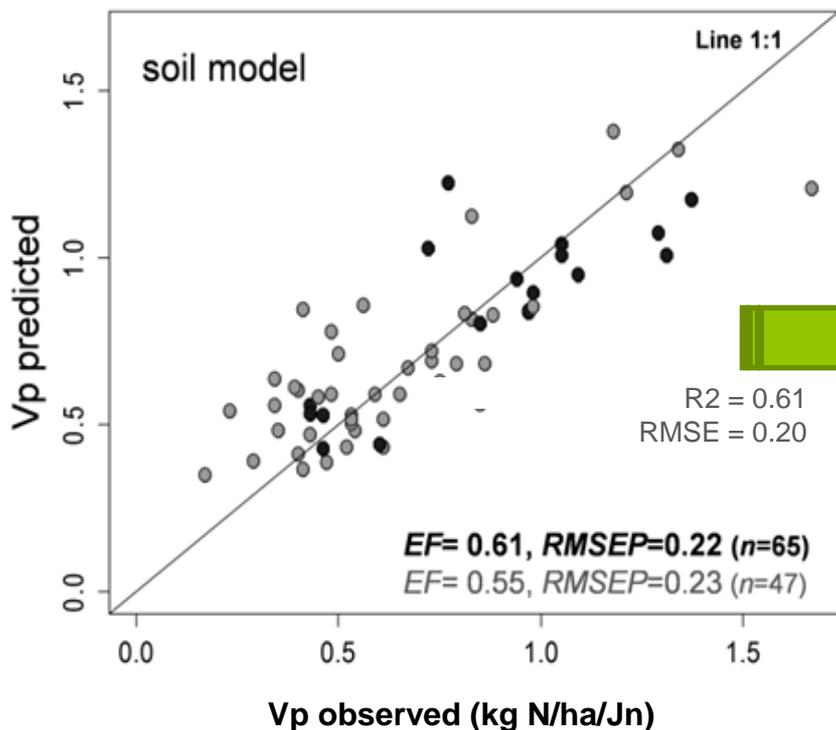
La forme des fonctions (effets) dans le nouveau modèle



# Résultats

L'effet « système de culture » améliore la prédiction

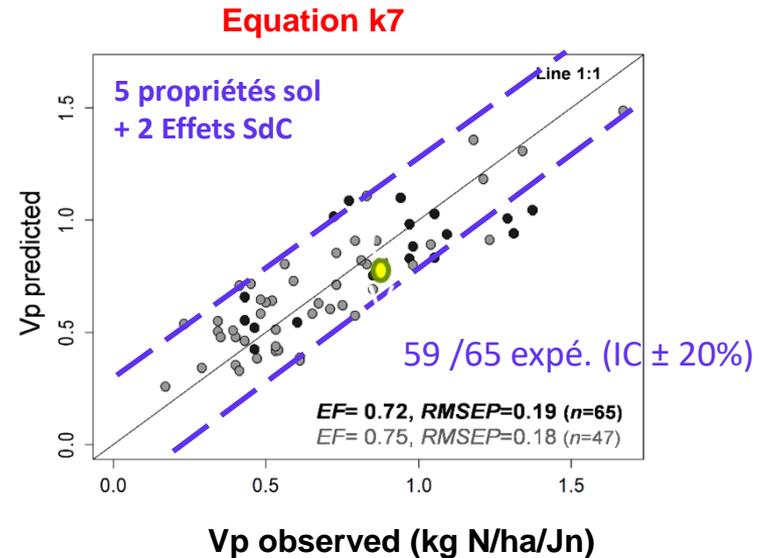
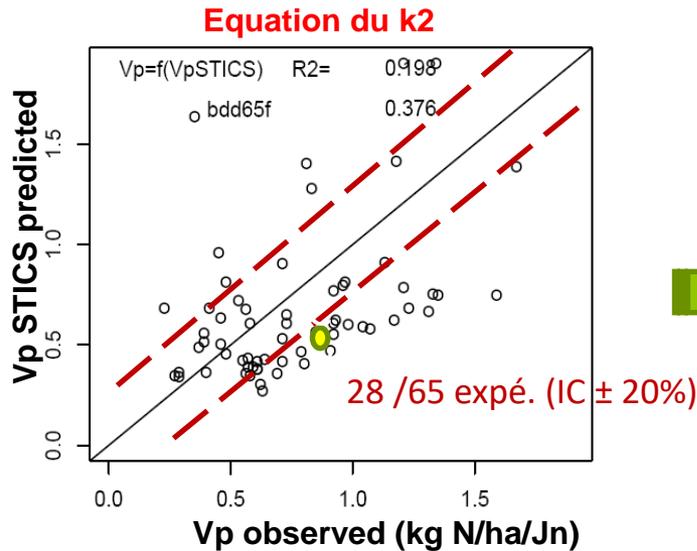
- **Evaluation de la nouvelle fonction de prédiction avec les effets « système de culture »** rotation sans colza (valeur 0), rotation avec colza (valeur 0.5) et précédent colza (valeur 1)



- **Le meilleur modèle (plus précis et plus robuste) avec des caractéristiques simples**  
→ **Fonction implémentable dans OAD (Ferti N) si le précédent/anté-préc. sont renseignés**

# Résultats

Que gagne-t-on en robustesse et précision avec ce nouveau modèle ?



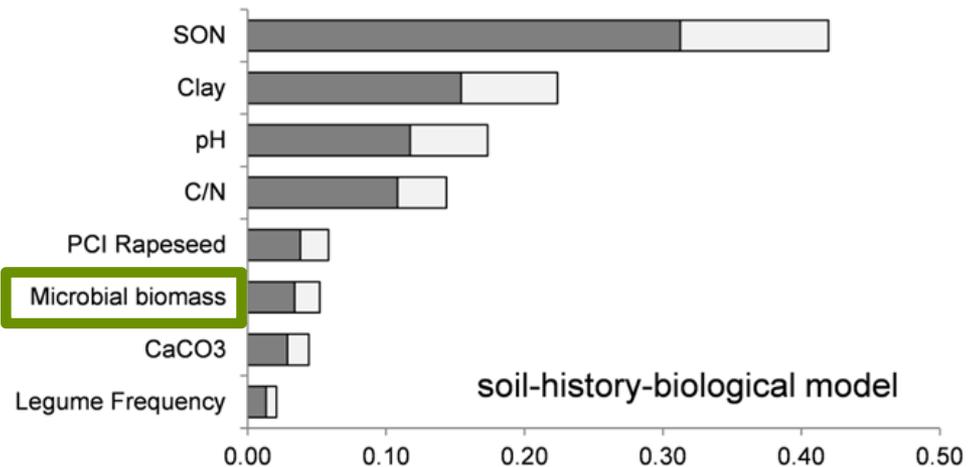
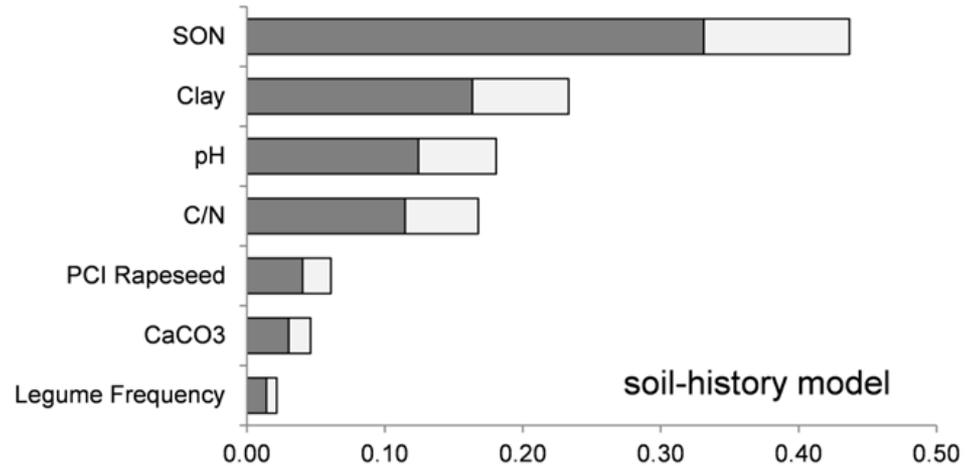
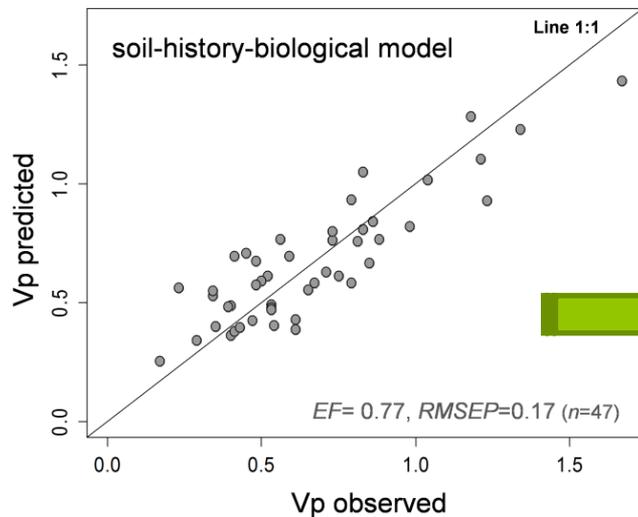
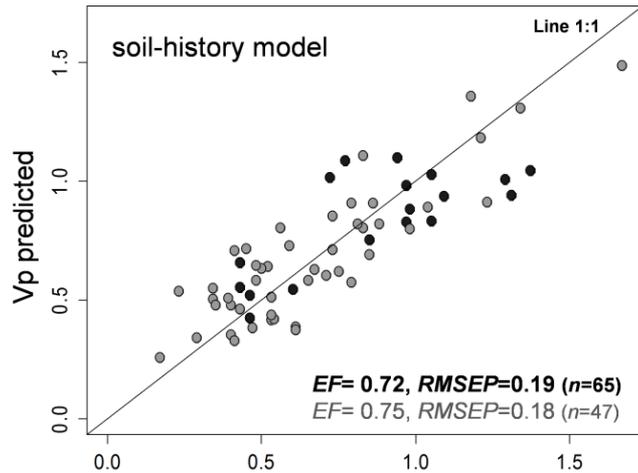
Période de prédiction	Modèle utilisé	Vp moyen (kg N/ha/Jn)	
		0.5	1.3
Ferti N céréale Fév.. à Juil. (100 Jn)	k2	50 $\pm$ 19	130 $\pm$ 49
	k7	$\pm$ 9	$\pm$ 23
Année calendaire (320 Jn)	k2	160 $\pm$ 61	416 $\pm$ 158
	k7	$\pm$ 29	$\pm$ 75

## Cas réel de la base de données (100 Jn)

Observé	Prédit
Vp = 0.91	Vp k2 = 0.55 $\rightarrow$ 55 $\pm$ 21 kg N/ha
$\rightarrow$ 91 $\pm$ 18 kg N/ha	Vp k7 = 0.86 $\rightarrow$ 86 $\pm$ 15 kg N/ha

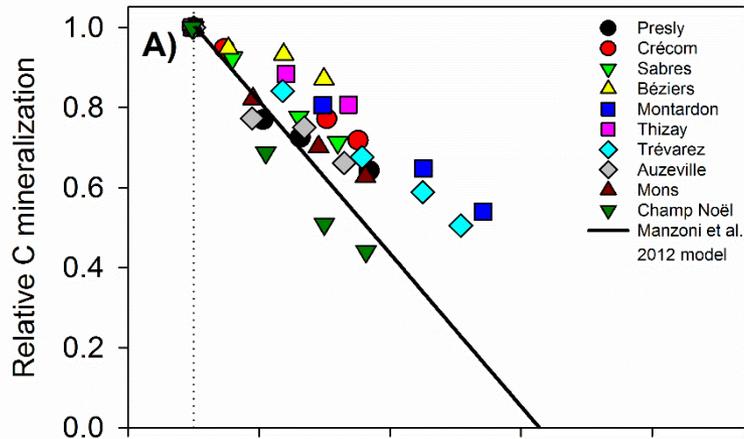
# Résultats

Quel intérêt à prendre en compte les caractéristiques « biologiques » ?



# Résultats

L'effet de la teneur en eau sur la minéralisation peut être mieux simulé



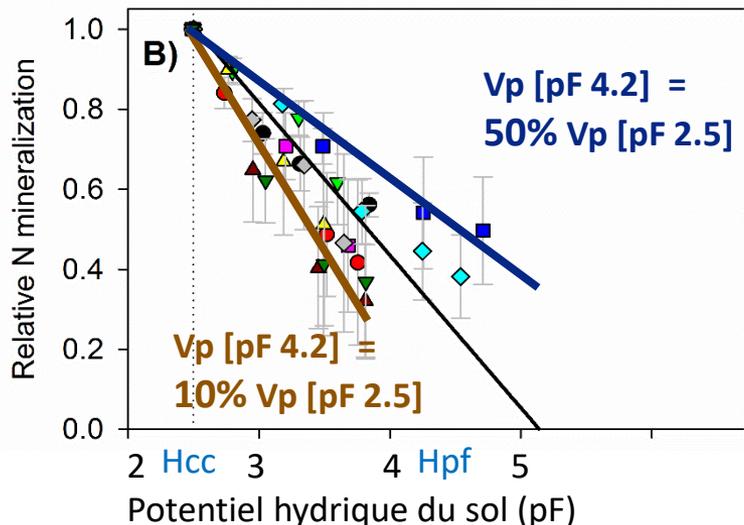
➤ **Un effet variable de l'humidité sur la minéralisation de C et N de la MOS**

- effet sol (sable/limon, C\_organique, pH)

- effet localisation (climat et sécheresse = bilan P-ETP)

➔ Hypothèse d'adaptation de la microflore du sol aux périodes de stress hydriques dans des sols sableux et du Sud de la France

➔ **Résultats à consolider et à valider / publier avant d'intégrer dans OAD (si prise en compte climat) et modèles de simulation (travail en cours)**



# En guise de Conclusion et de Perspectives

- **Pari tenu ! on passe du k2 au k5/k7 avec des variables renseignables !**
  - 5 propriétés de sol analysées en routine (N\_organique, Argile, CaCO<sub>3</sub>, C/N, pH) + 2 critères de système de culture (fréquence colza et légumineuses)
- **Pas d'amélioration importante avec les variables biologiques testées...**
- **Et en sols de craie ?** Modèle difficile à tester en raison des erreurs de mesure du C organique en sols calcaires, exposé de B. Mary), sauf Fagnières (travail en cours)
- **Et les sols bretons ?** A voir avec Thierry Morvan (INRA Rennes-Quimper) pour tester le nouveau modèle sur la base de données acquises récemment
- **Et en « Non travail du sol » ou semis direct (ACS) ?** Pas de raison que ce nouveau modèle ne soit pas valide puisque le taux de minéralisation en N n'est pas foncièrement modifié (Dimassi, 2014 ; Mary et al, 2014 ; Autret et al., 2017), ce qui est différent de la disponibilité temporelle en N minéral...
- **Et pour finir cette histoire...** écriture d'une publication **en français** pour que les ingénieurs et techniciens français puissent lire et avoir la référence accessible (à soumettre à Etude et Gestion des Sols en début 2018)

# Merci de votre attention

- Merci aux équipes techniques ! (des milliers d'heures de travail et des centaines milliers d'euros...)
- Merci aux financeurs de ces travaux !



- *Merci de votre patience... 15 ans depuis le début de la thèse de MV ! Il a fallu mûrir...*

