



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

Eric Justes¹, Hugues Clivot², Matthieu Valé³, Jean-Pierre Cohan⁴,
Luc Champolivier⁵, François Piraux⁴, Daniel Plaza-Bonilla⁶,
François Laurent⁴ et Bruno Mary²

¹INRA, UMR AGIR, Toulouse (actuellement CIRAD - SYSTEM Montpellier)

²INRA, UR AgrolImpact, Barenton-Bugny (Laon)

³AUREA, Ardon, ⁴ARVALIS, Boigneville & La Jaillière,

⁵TERRES INOVIA Castanet, ⁶CSIC-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)

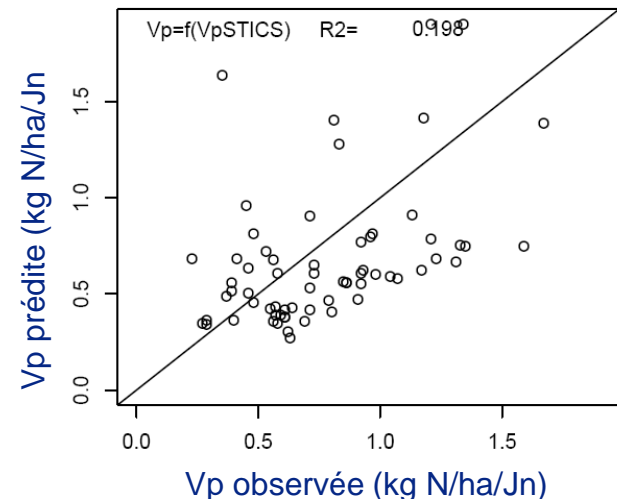
Elle est actuellement implémentée en France dans divers OAD (ex. AzoFert) et modèle de simulation (ex. STICS)

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

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

[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)*

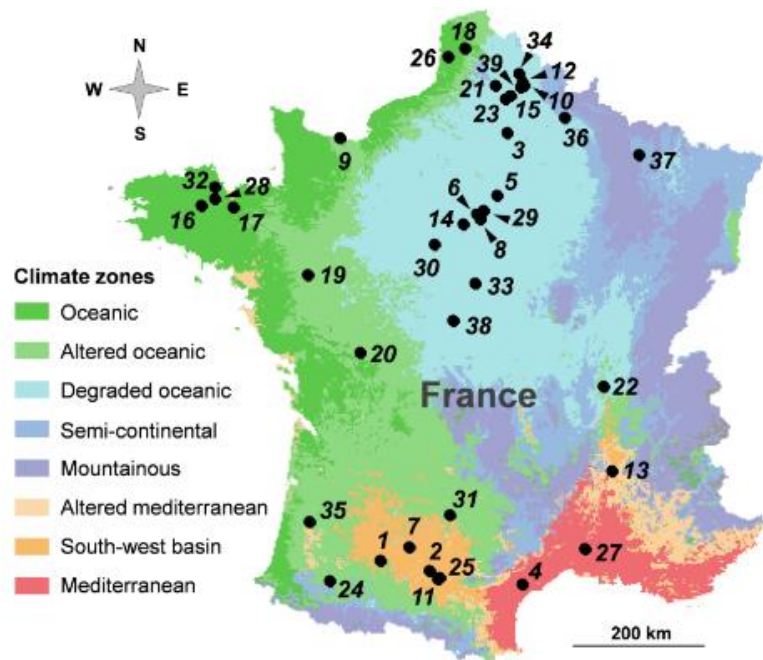
Matériels et Méthodes

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
Soil properties						
Clay	g kg ⁻¹	24	396	191	201	76
Silt	g kg ⁻¹	55	814	539	502	198
Sand	g kg ⁻¹	22	895	184	218	174
CaCO ₃	g kg ⁻¹	0	436	4	64	123
pH		5.7	8.4	7.7	7.5	0.8
SOC	t ha ⁻¹	27.0	147.2	45.8	51.7	24.4
SON	t ha ⁻¹	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

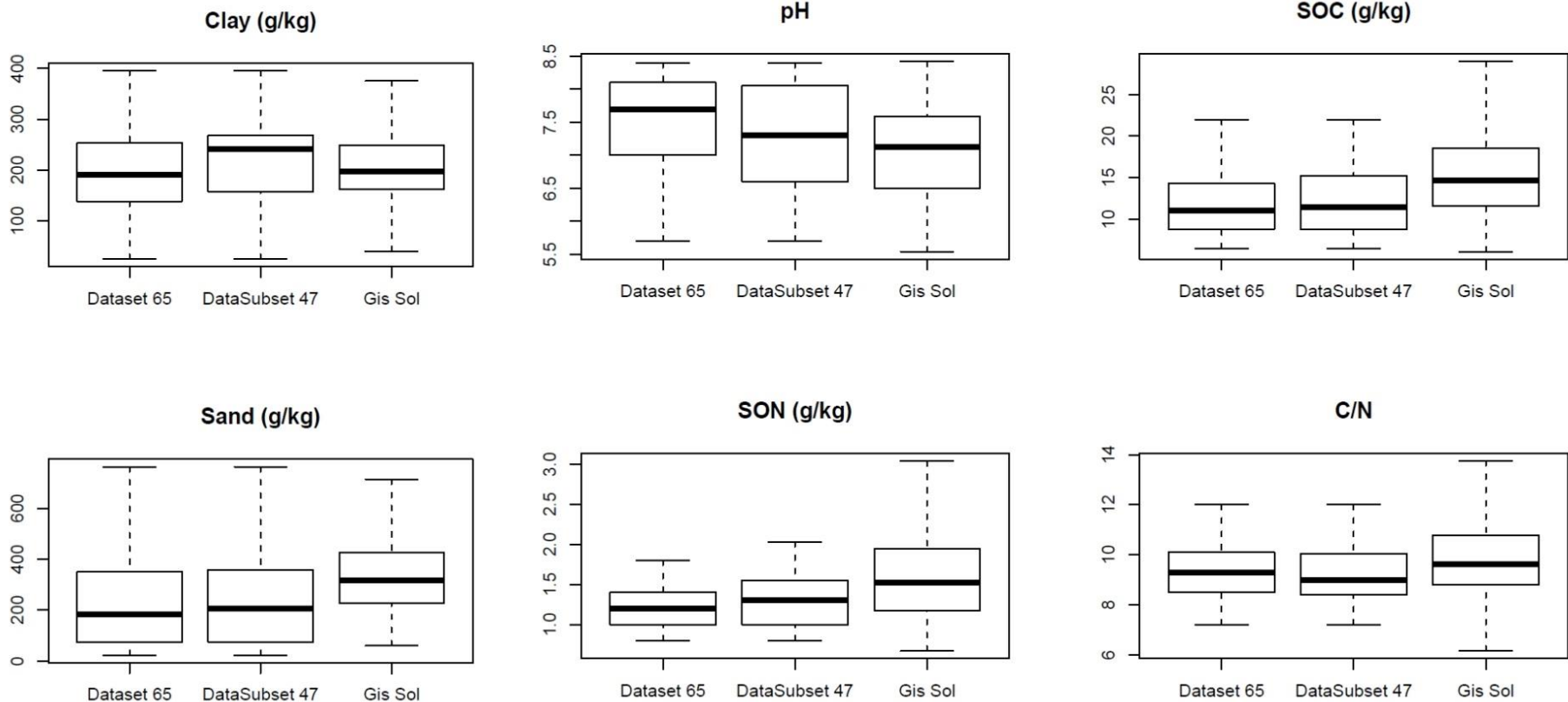
Ouzouer le Marché (45)
Limon de Beauce



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



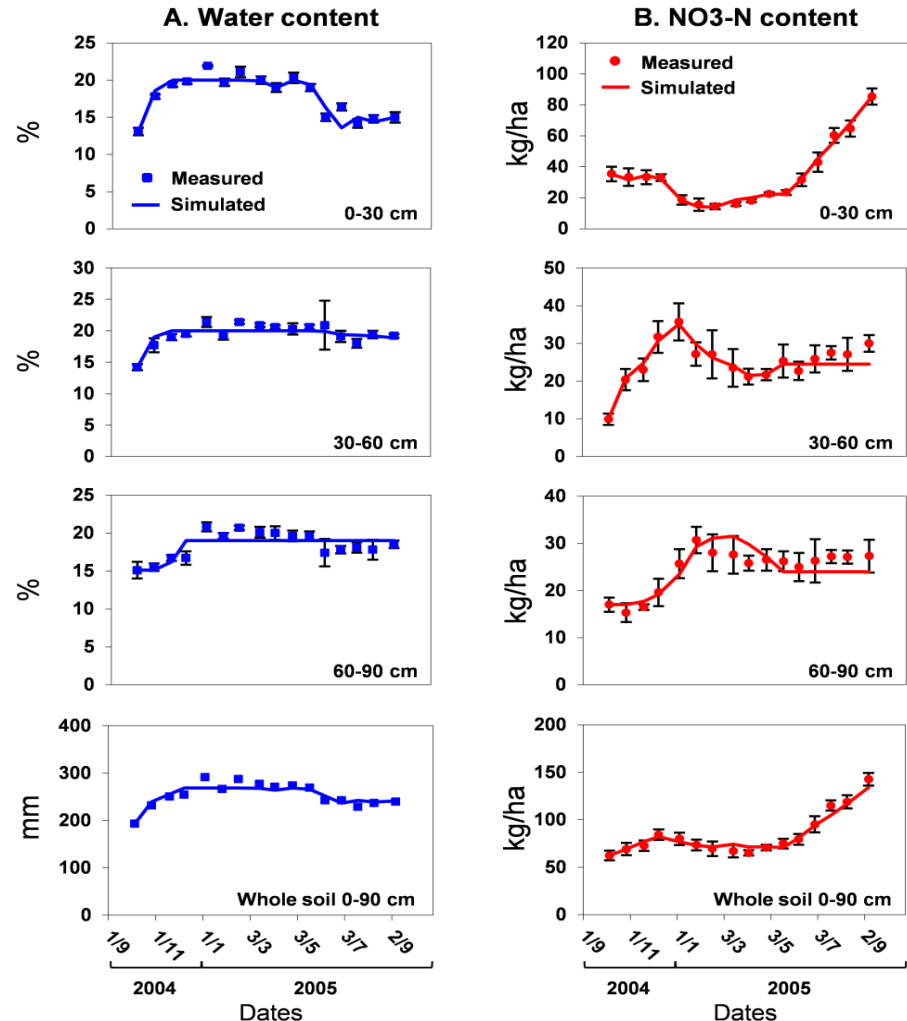
Matériels et Méthodes

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

Situations avec résidus de culture exportés en « sol nu »

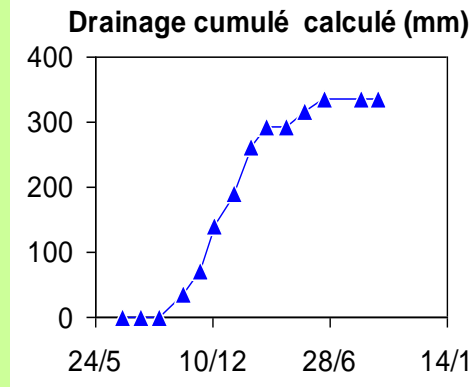
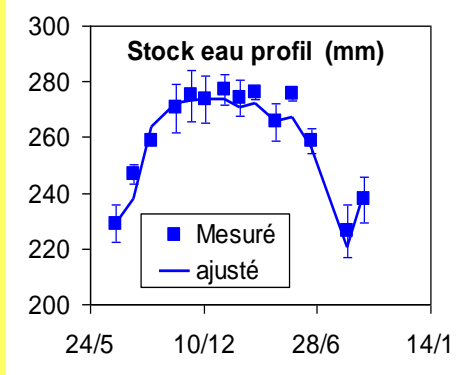
Mesures régulières des profils d'eau et de N minéral du sol durant plusieurs mois (6 à 14 mois)

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

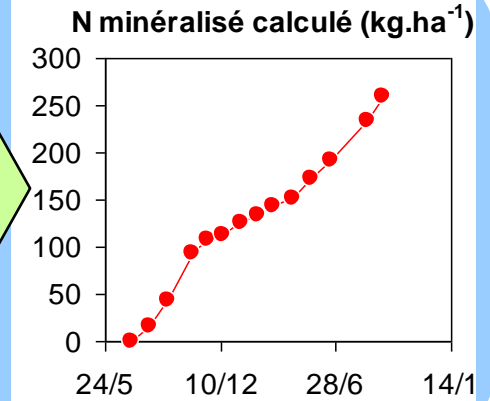


Matériels et Méthodes

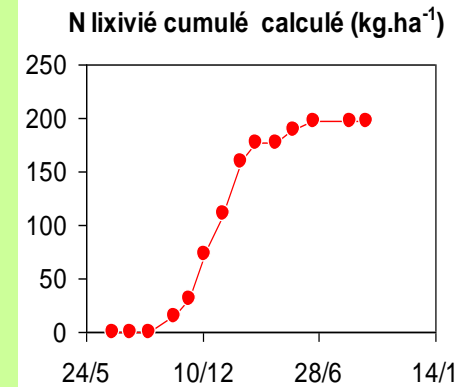
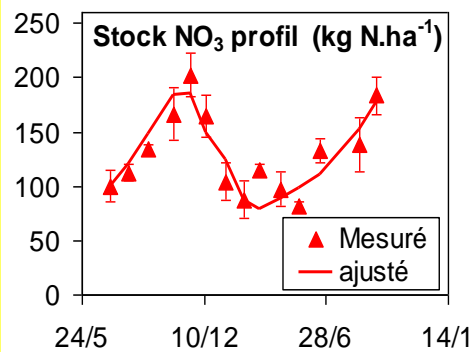
Calcul de la vitesse potentielle de minéralisation en N de la MOS



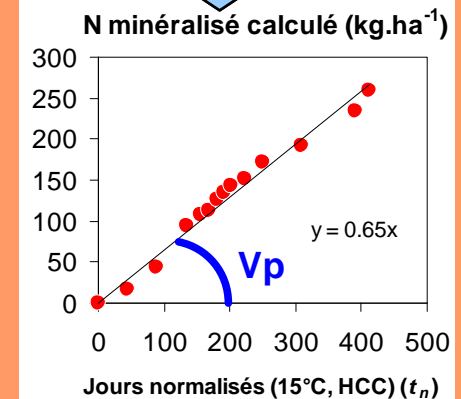
Calcul dynamique par défaut de bilan N



Calcul dynamique par optimisation numérique



Calcul du temps normalisé (effet température et humidité)

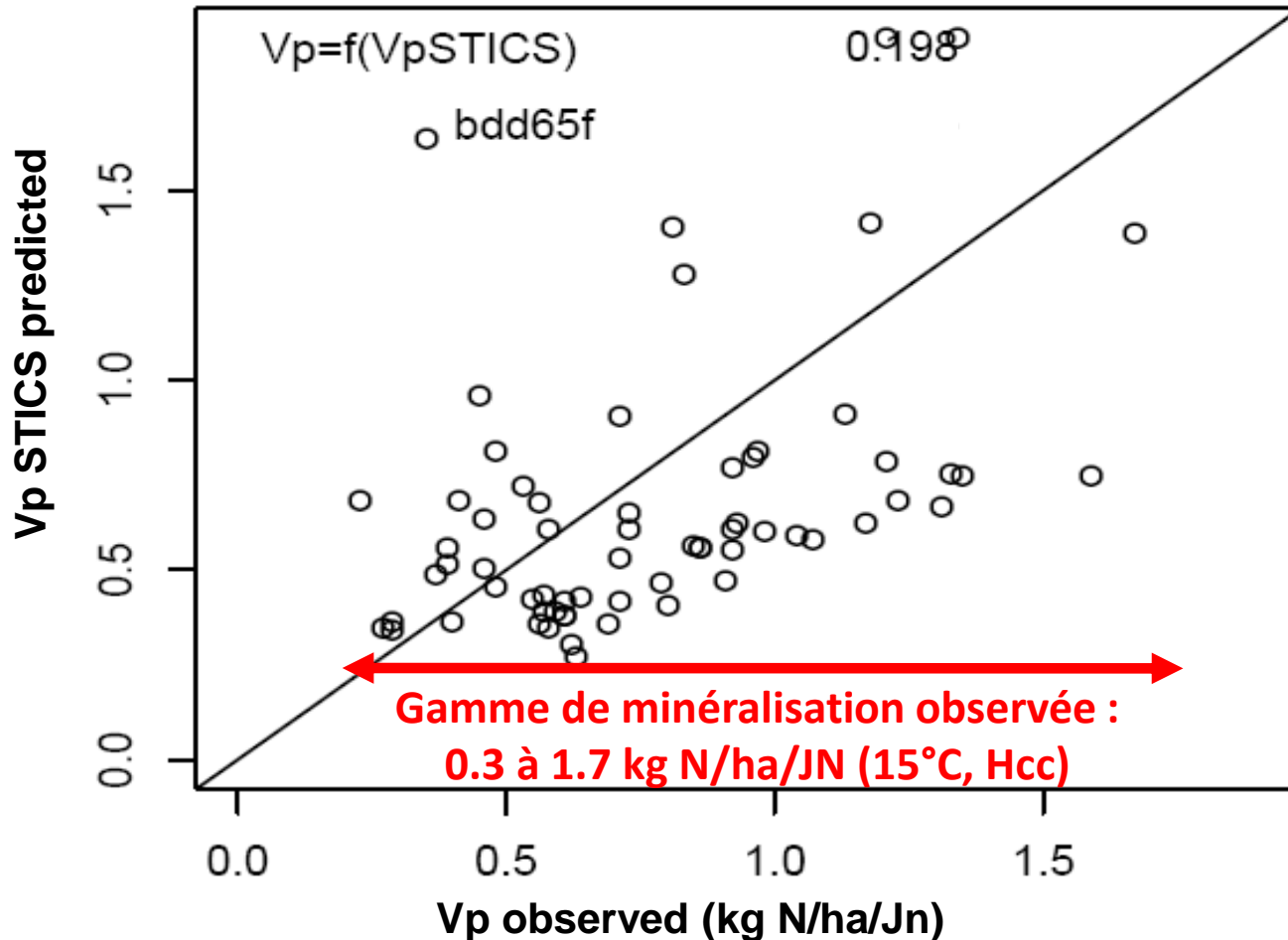


Résultats

Evaluation de l'équation « k2 » diffusée par COMIFER

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

EF = 0.25 ; R² = 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 ⁻¹ nday ⁻¹
<u>Soil model</u>						
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 ₃ (Ca)	$\hat{V}_p(5) = \hat{V}_p(4) \cdot f_5(Ca)$	0.61	0.00	0.22

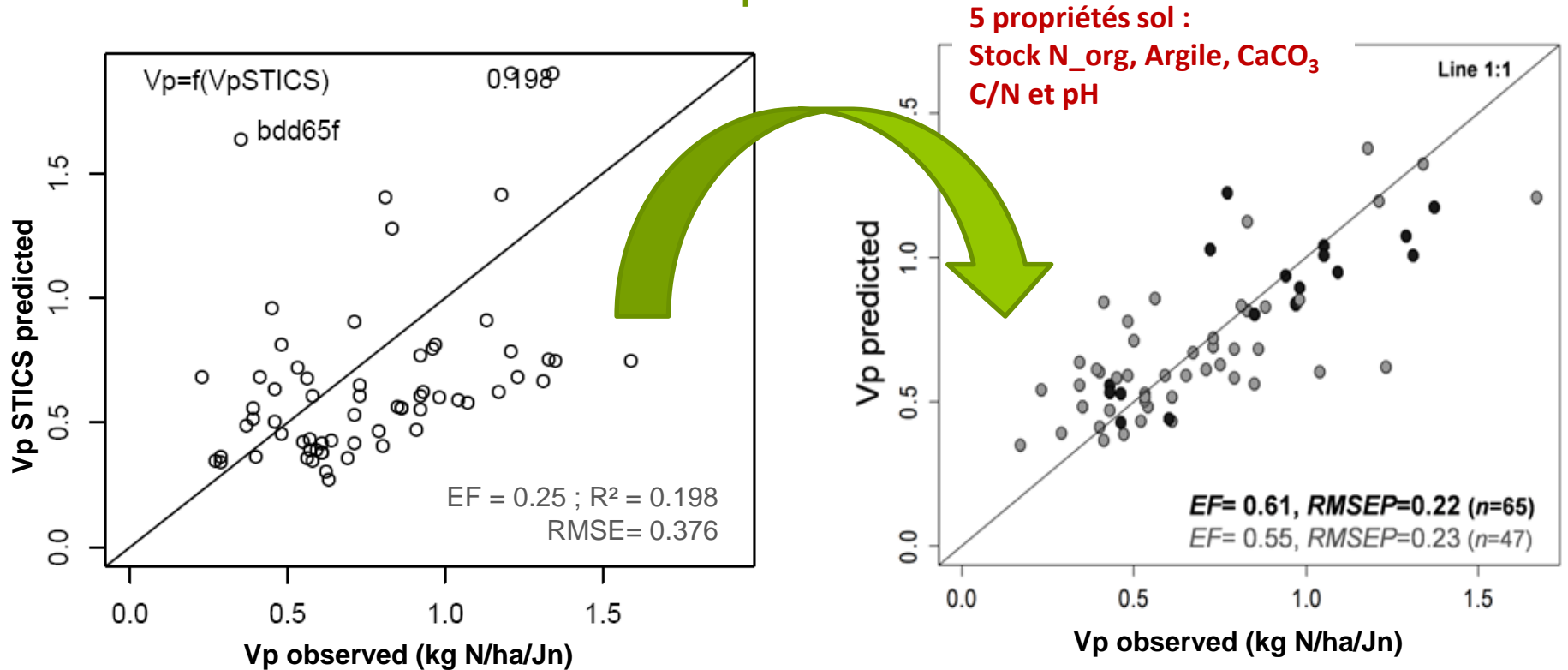
Modèle empirique non linéaire à structure multiplicative

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

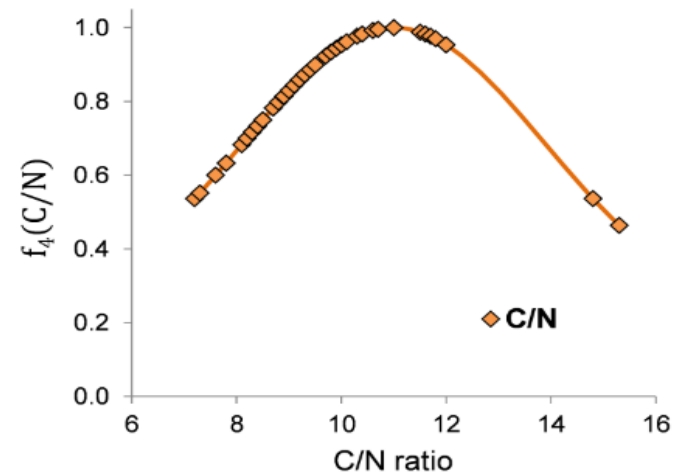
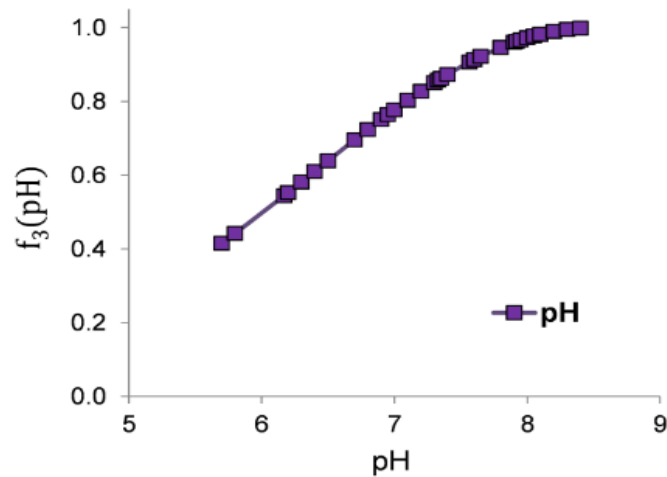
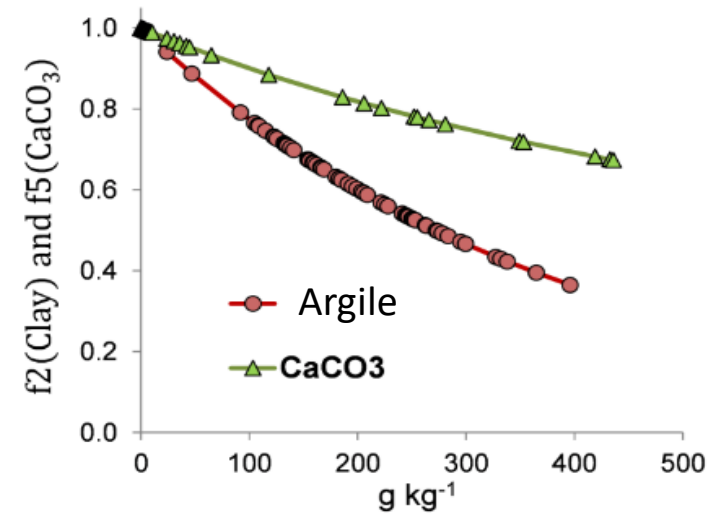
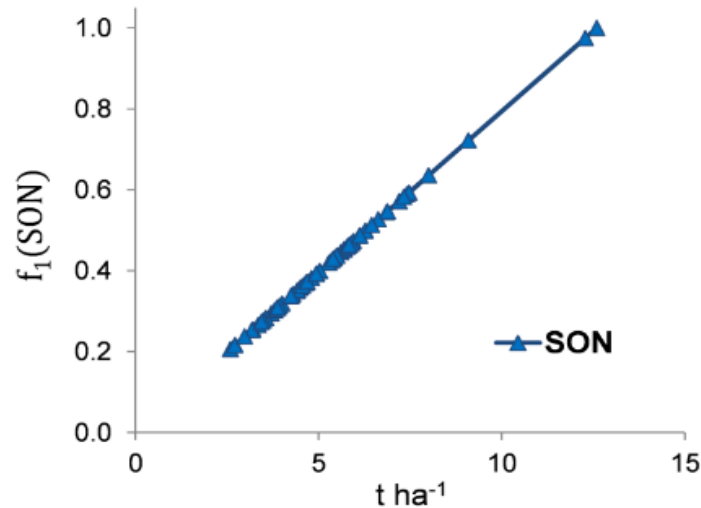


➤ Meilleure prédiction (plus précise et plus robuste) avec le nouveau modèle (fonction)

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

Résultats

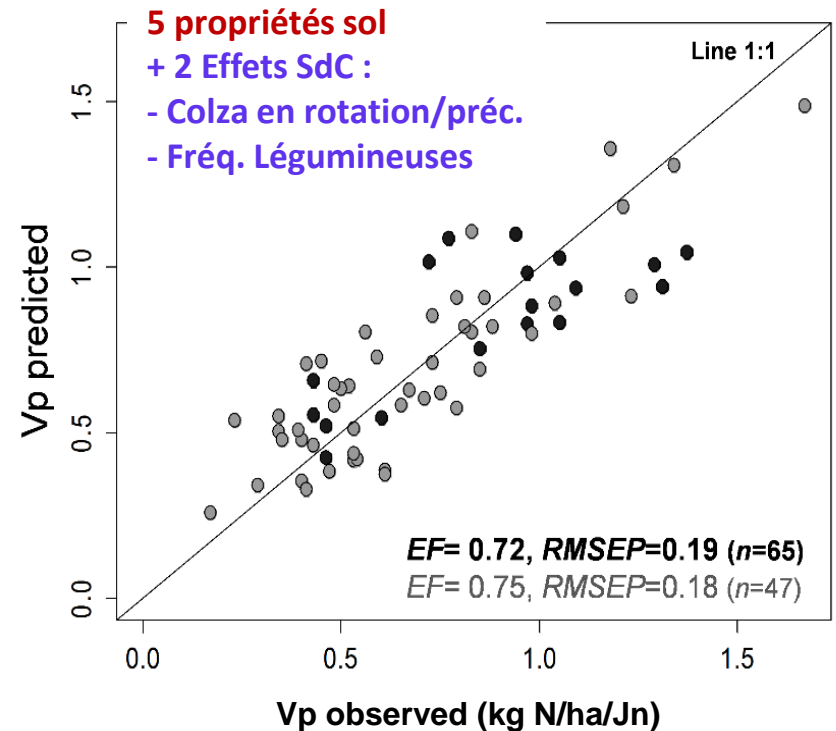
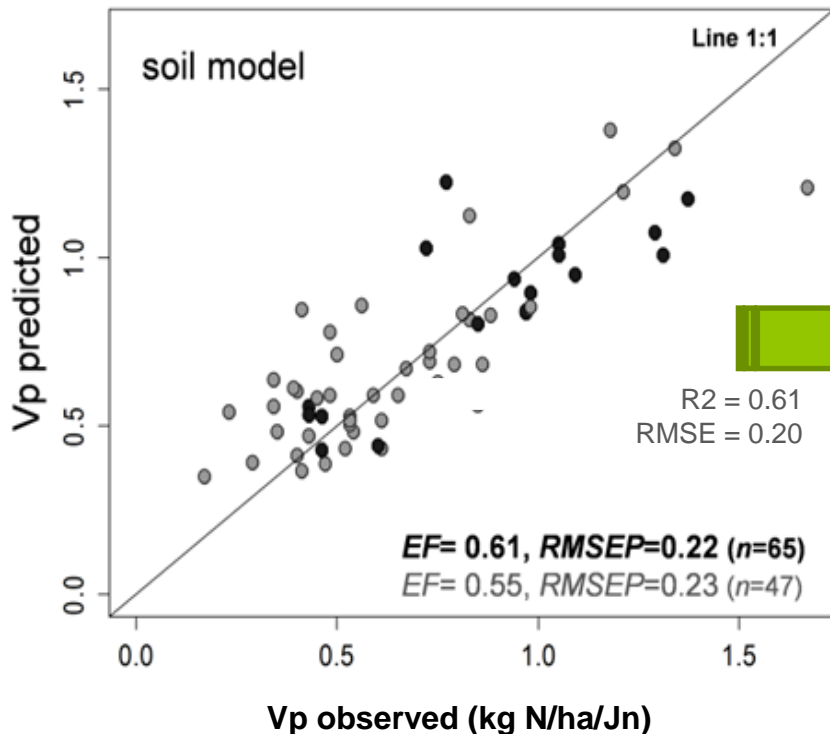
La forme des fonctions (effets) dans le nouveau modèle



Résultats

L'effet « système de culture » améliore la prédiction

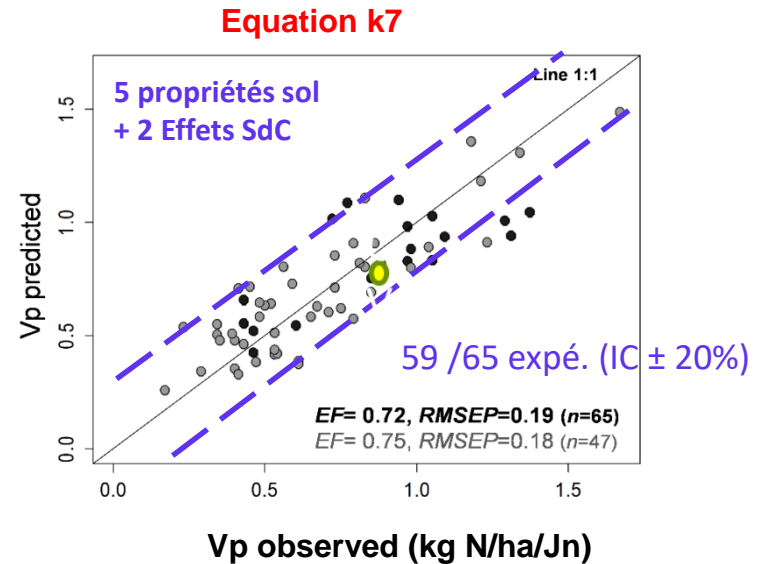
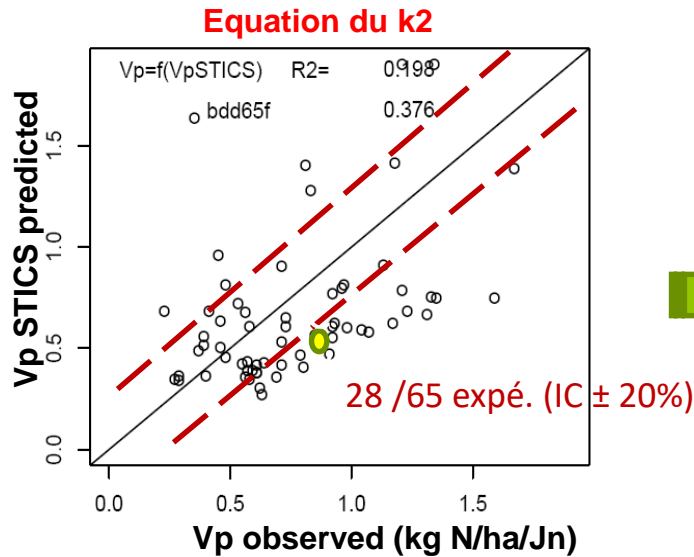
- **Evaluation de la nouvelle fonction de prédiction avec les effets « système de culture »** rotation sans colza (valeur 0), rotation avec colza (valeur 0.5) et précédent colza (valeur 1)



- **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 ?



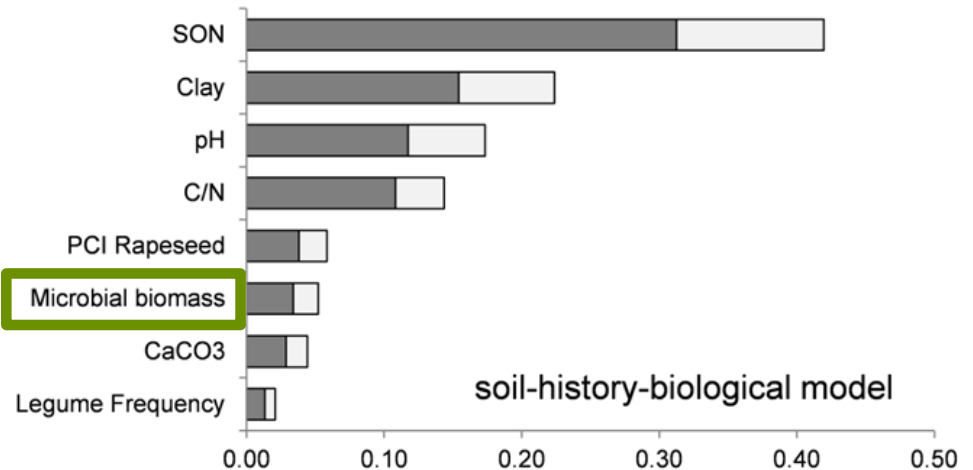
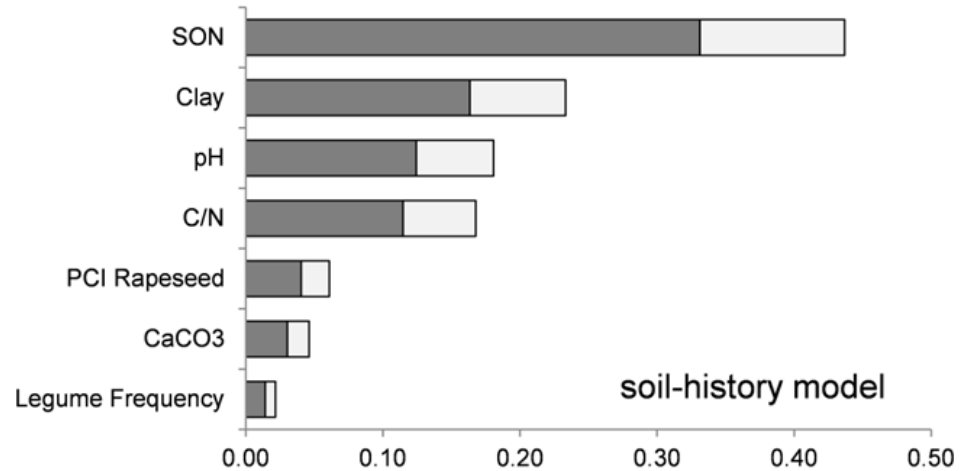
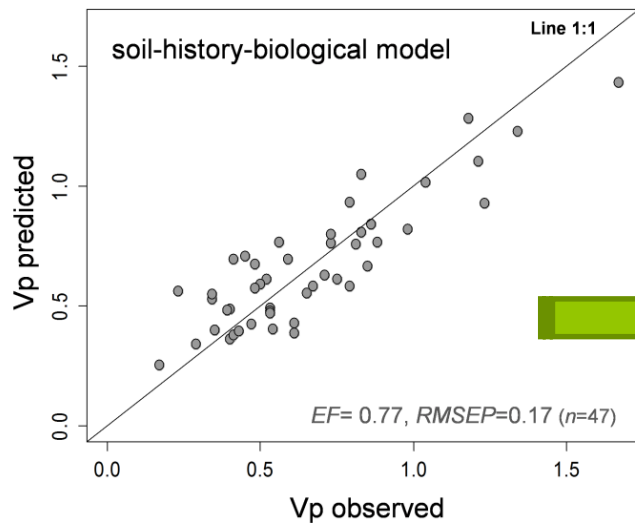
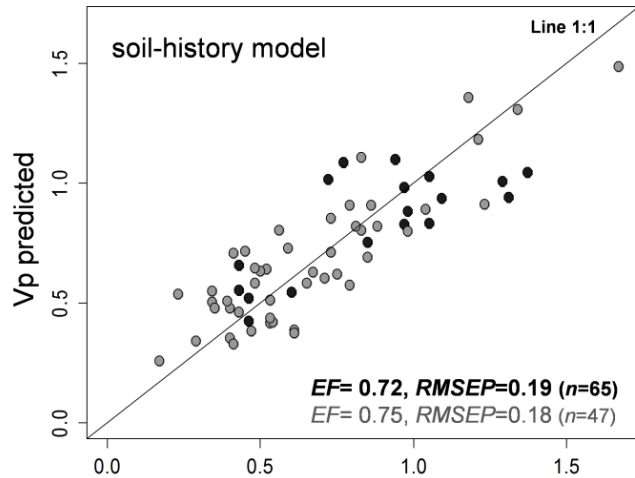
Période de prédiction	Modèle utilisé	Vp moyen (kg N/ha/Jn)	
		0.5	1.3
Ferti N céréale Fév.. à Juil. (100 Jn)	k2	50 ± 19	130 ± 49
	k7	± 9	± 23
Année calendaire (320 Jn)	k2	160 ± 61	416 ± 158
	k7	± 29	± 75

Cas réel de la base de données (100 Jn)

Observé	Prédit
Vp = 0.91	Vp k2 = 0.55 → 55 ± 21 kg N/ha
→ 91 ± 18 kg N/ha	Vp k7 = 0.86 → 86 ± 15 kg N/ha

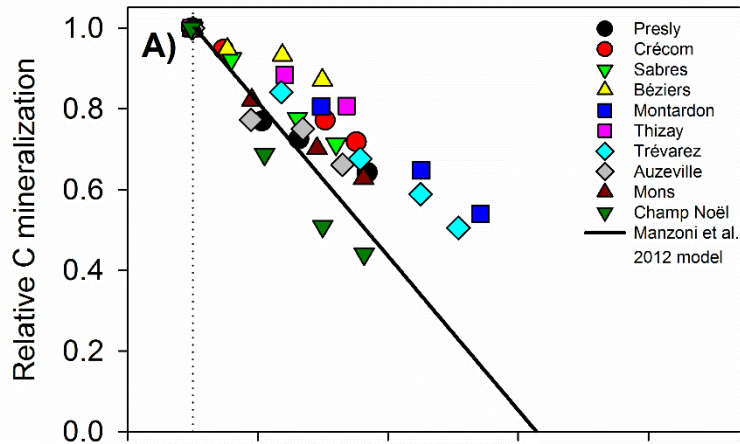
Résultats

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



Résultats

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



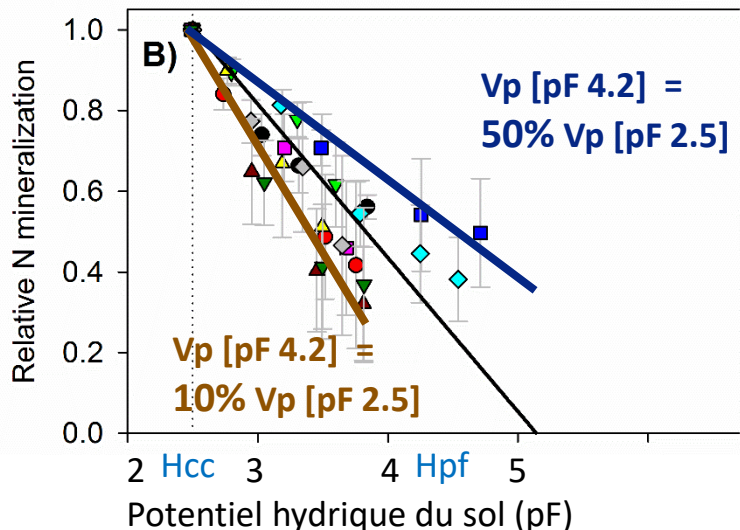
➤ **Un effet variable de l'humidité sur la minéralisation de C et N de la MOS**

- 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, CaCO₃, 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...*

