

# Équation de prédiction de la minéralisation de la matière organique du sol

Focus sur les fonctions pH et teneur en  $\text{CaCO}_3$

Hugues CLIVOT

*Travaux réalisés dans l'UR AgrolImpact INRA de Laon*

UMR Fractionnement des Agro-Ressources et Environnement  
Université de Reims Champagne Ardenne – INRAE

[hugues.clivot@univ-reims.fr](mailto:hugues.clivot@univ-reims.fr)

# Contexte

---

- **Erreur de prédiction pour N minéral dans le sol est plus importante que pour d'autres variables dans STICS (Coucheney et al, 2015) même en sol nu**

→ **suggère une mauvaise prédiction de la Vitesse potentielle de minéralisation de N ( $V_p$ )**

**Précédemment, dans STICS = modèle k2 :**

$$V_p = f(SON) \cdot \underline{f(\text{Clay})} \cdot \underline{f(\text{CaCO}_3)}$$

Modèle et paramétrage principalement déterminés par des expérimentations *in vitro*

**→ Proposer une meilleure fonction de prédiction qui pourrait améliorer les modèles de simulation**

E. Coucheney, S. Buis, M. Launay, J. Constantin, B. Mary, I. García de Cortázar-Atauri, D. Ripoche, N. Beaudoin, F. Ruget, K.S. Andrianarisoa, C. Le Bas, E. Justes, J. Léonard (2015) Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France, Environ. Model. Software. 64: 177–190.

# Objectif et méthodes

---

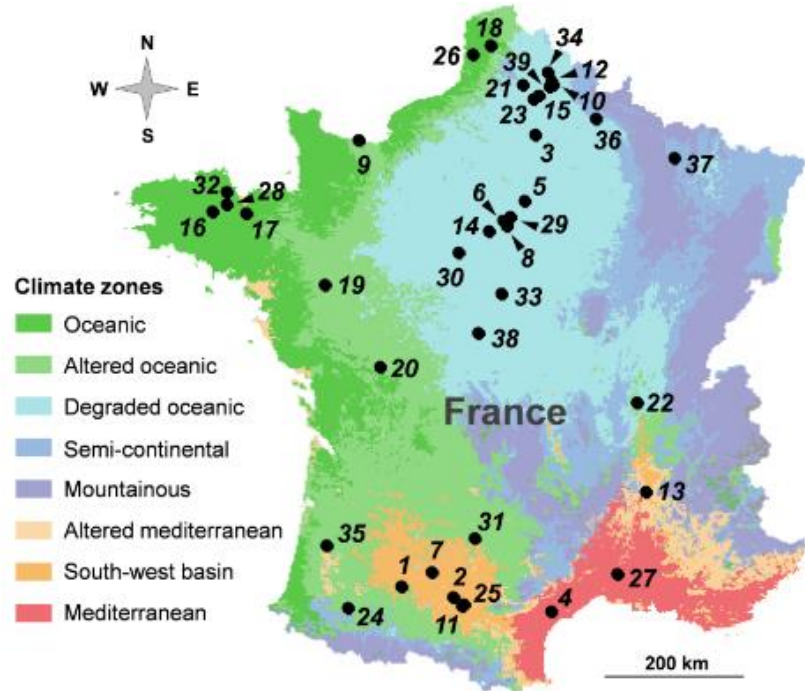
- ❖ **Améliorer la prédiction de la minéralisation de la MOS**
- **Caractérisation de la minéralisation *in situ* de la MOS sur un réseau expérimental en France**
- **Développement d'une nouvelle fonction de minéralisation de la MOS**
- **Implémentation de la fonction dans les modèles de simulation STICS et AMG et évaluation des nouvelles versions**

# Réseau expérimental

Constitué pour développer un modèle de prédiction de la minéralisation de N *in situ*

Poursuite des travaux initiés durant la thèse de M. Valé (2006)

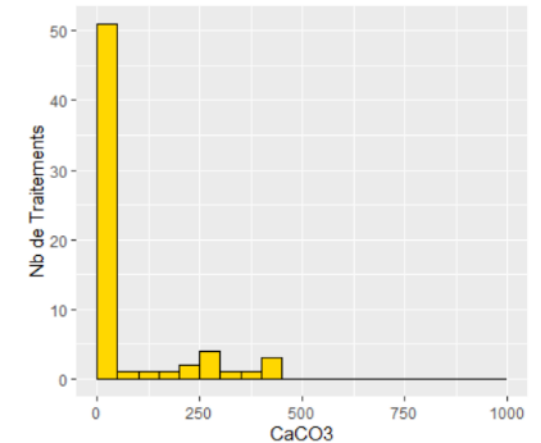
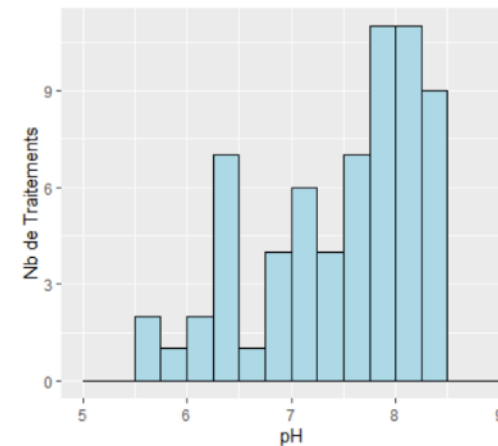
65 expérimentations au champ en sol nu (de 100 à 555 jours)  
réparties sur 39 sites (Réseau INRA – ARVALIS – CETIOM)



	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

Pas de sols de craie ← problème d'estimation des stocks de C&N organiques

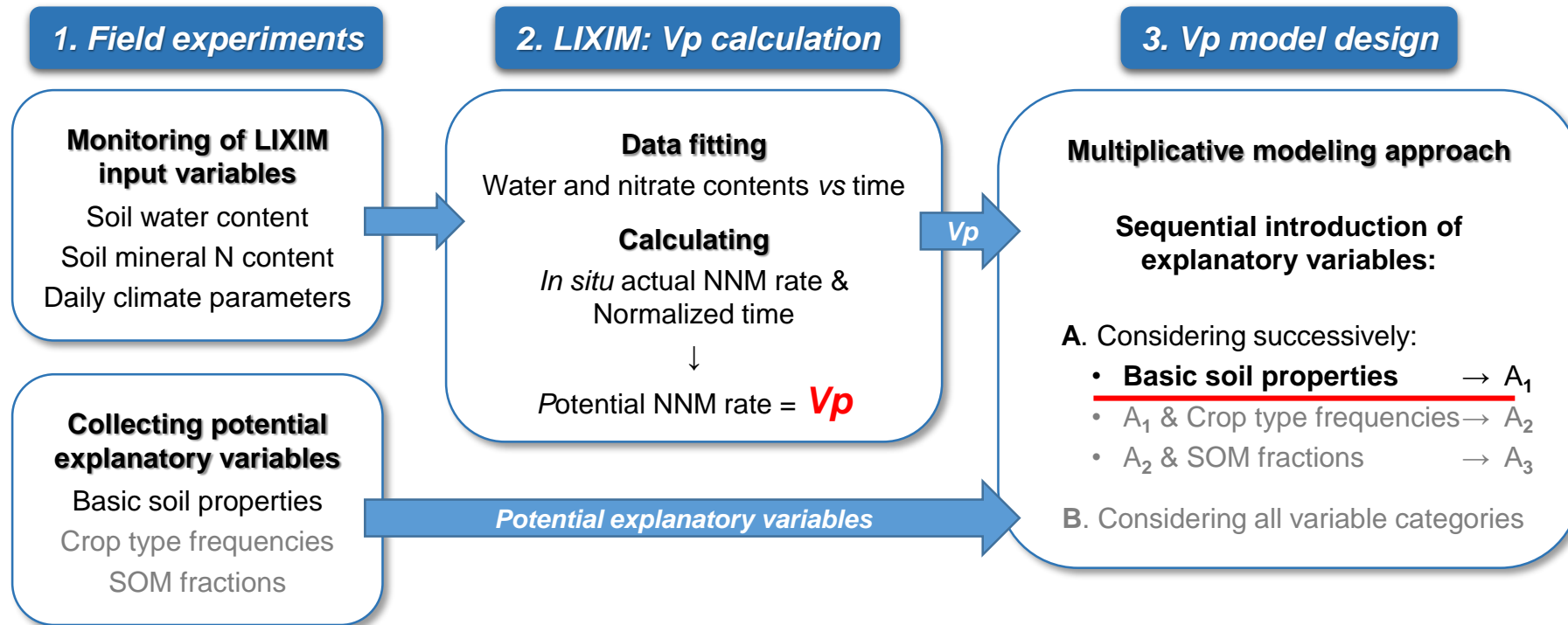
<https://comifer.asso.fr/index.php/fr/component/phocadownload/category/196-session-5.html?download=711:presentation-mary>



Valé, Matthieu. *Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français*. 2006. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique (Toulouse).

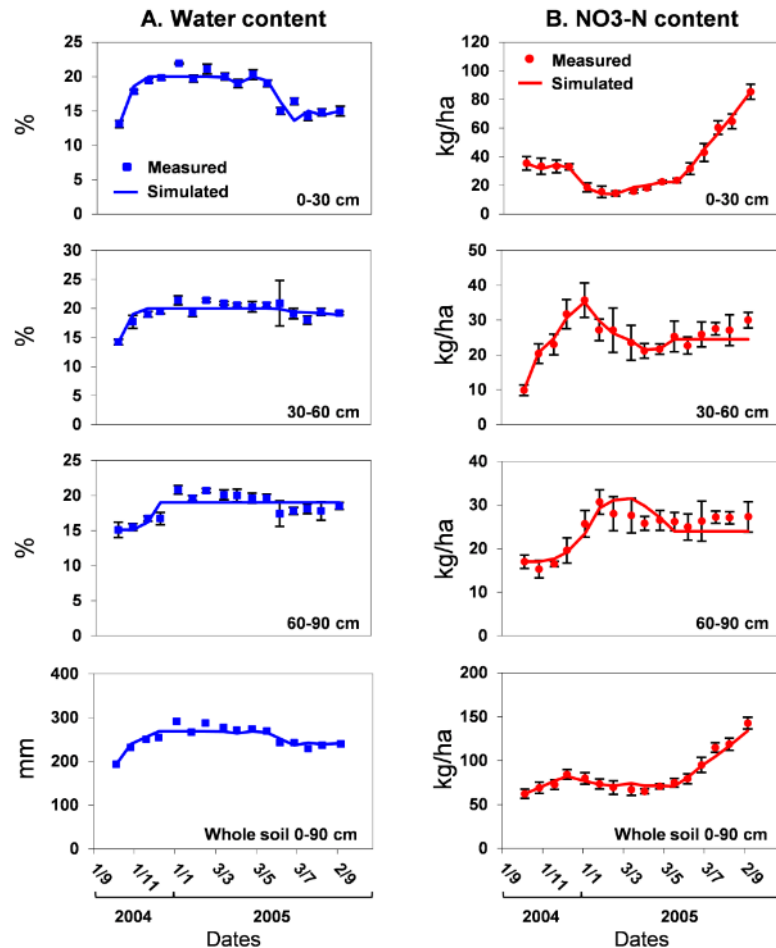
Clivot H., Mary B., Valé M., Cohan J.P., Champolivier L., Piraux F., Laurent F., Justes E., 2017. Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 111: 44-59, DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.03.010](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.010)

# Méthode

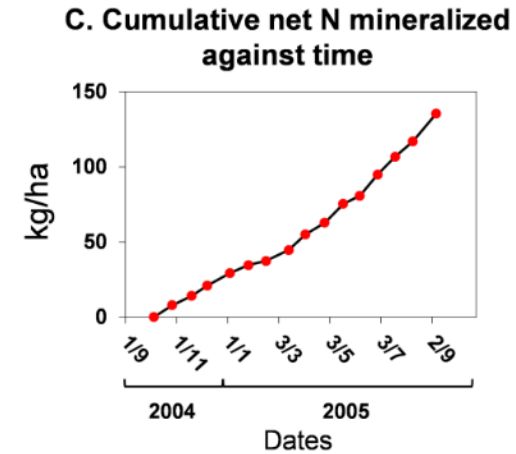


# Calcul de la vitesse potentielle de minéralisation de N = $V_p$

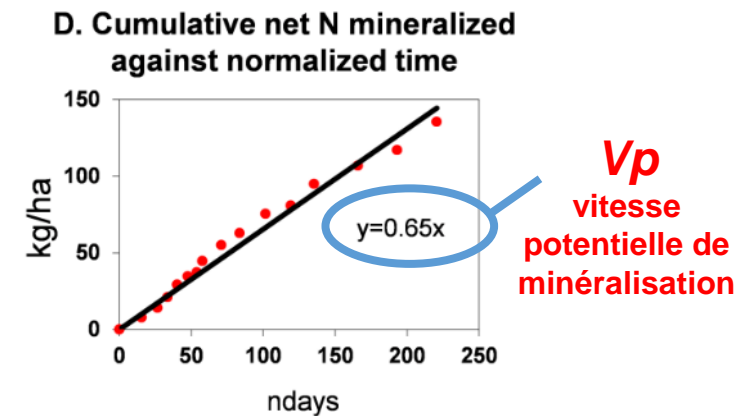
## 1 Mesures régulières des profils d'eau et de N minéral du sol et simulations



## 2 Cinétique de minéralisation de N en fonction du temps



## 3 Cinétique de minéralisation de N en fonction du temps normalisé (T & Hum)



Clivot et al. 2017

# Développement d'un nouveau modèle de prédiction de Vp

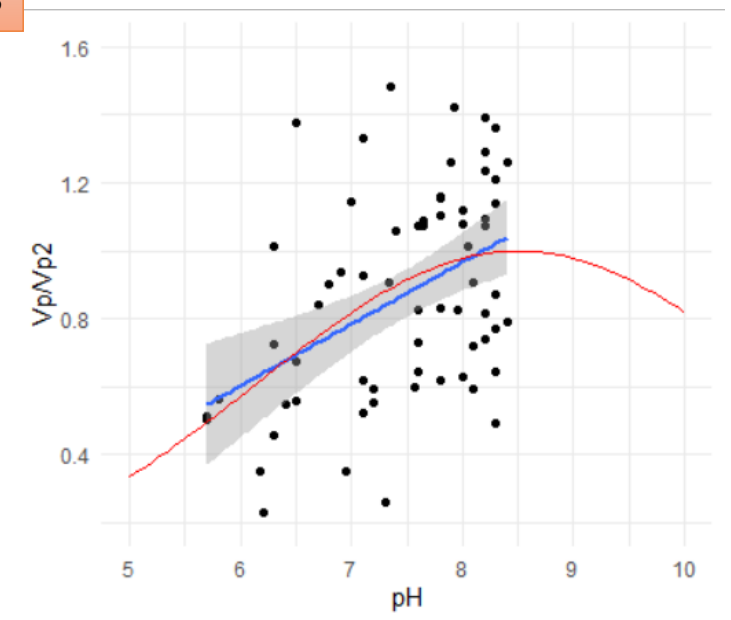
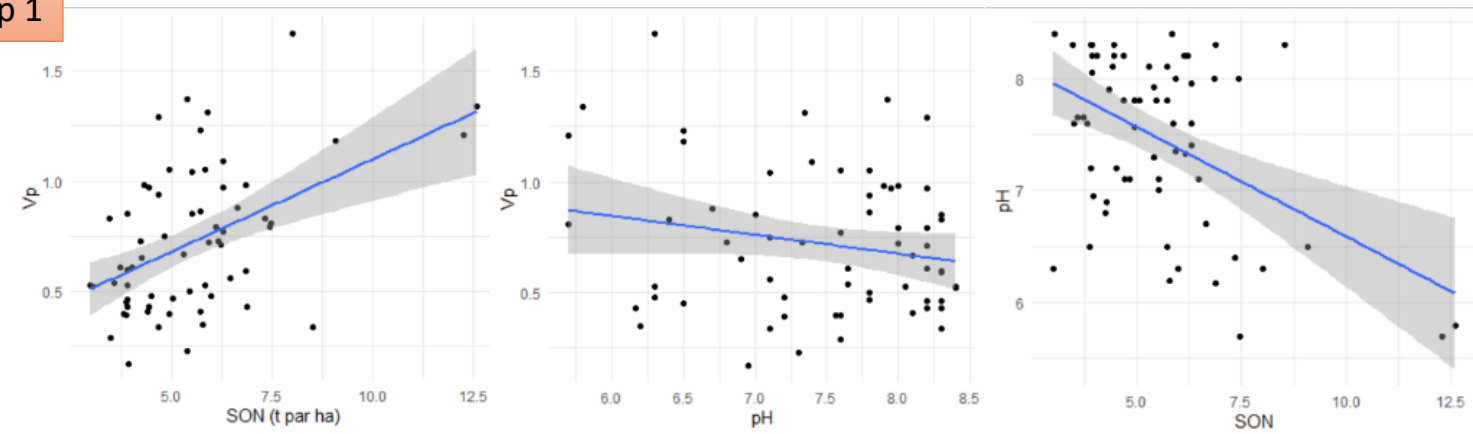
## ➤ Modélisation de la Vitesse potentielle de minéralisation Vp vs propriétés physico-chimiques

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

$$f(\text{pH}) = \exp(-a_{\text{pH}} \cdot (\text{pH} - b_{\text{pH}})^2)$$

Step 3

Step 1



Clivot et al. 2017

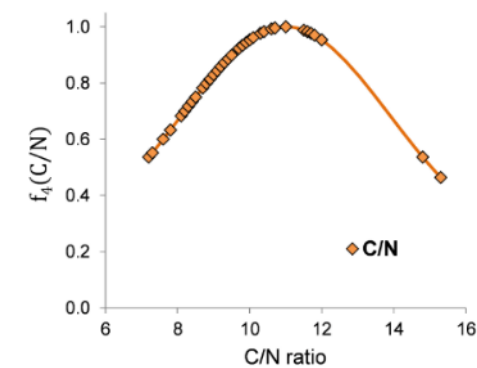
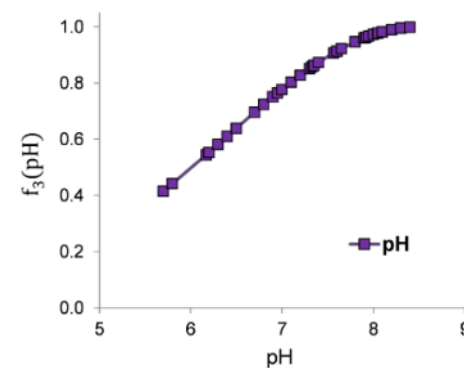
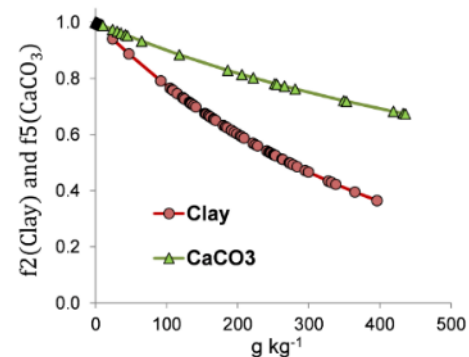
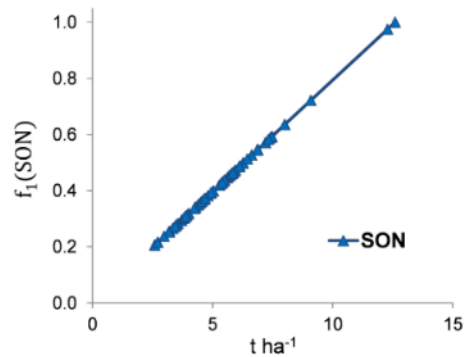
# Développement d'un nouveau modèle de prédiction de Vp

## ➤ Modélisation de la Vitesse potentielle de minéralisation Vp vs propriétés physico-chimiques

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

Modèle empirique non linéaire à structure multiplicative

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

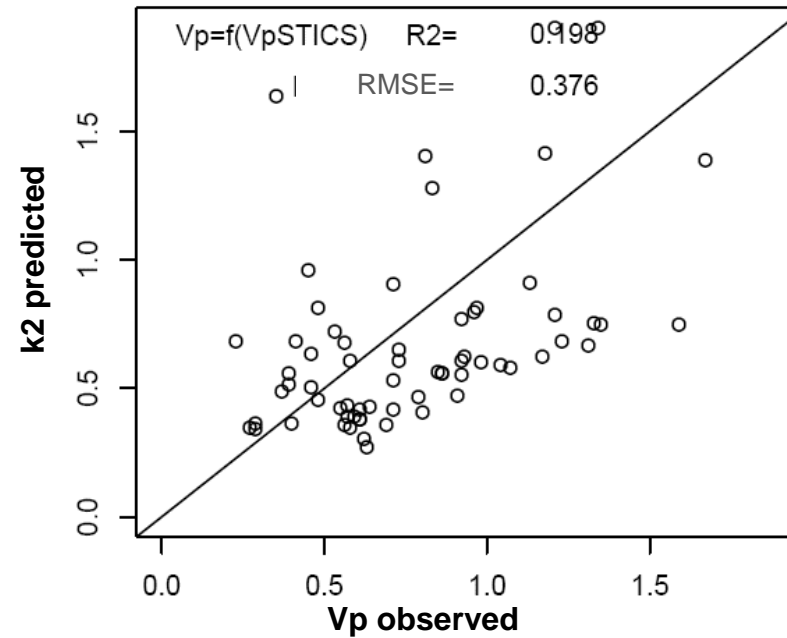
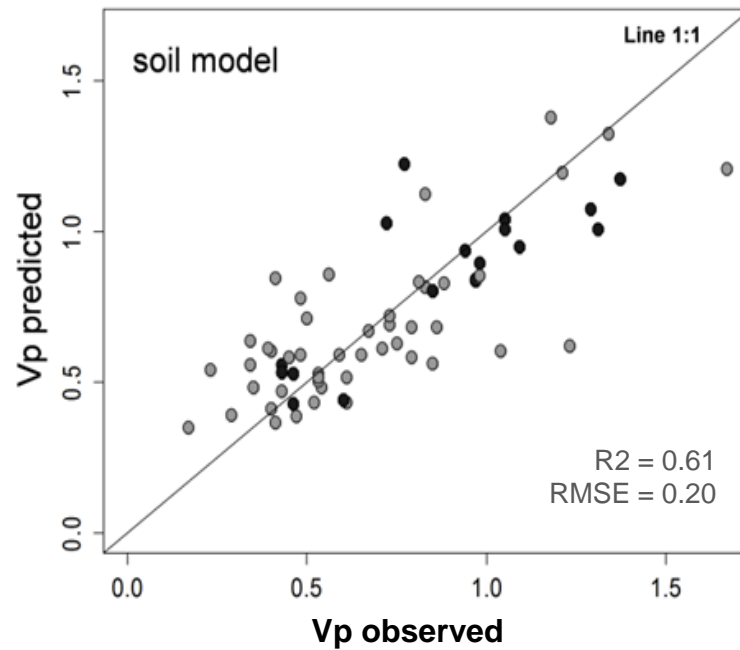


Clivot et al. 2017



# Evaluation du nouveau modèle

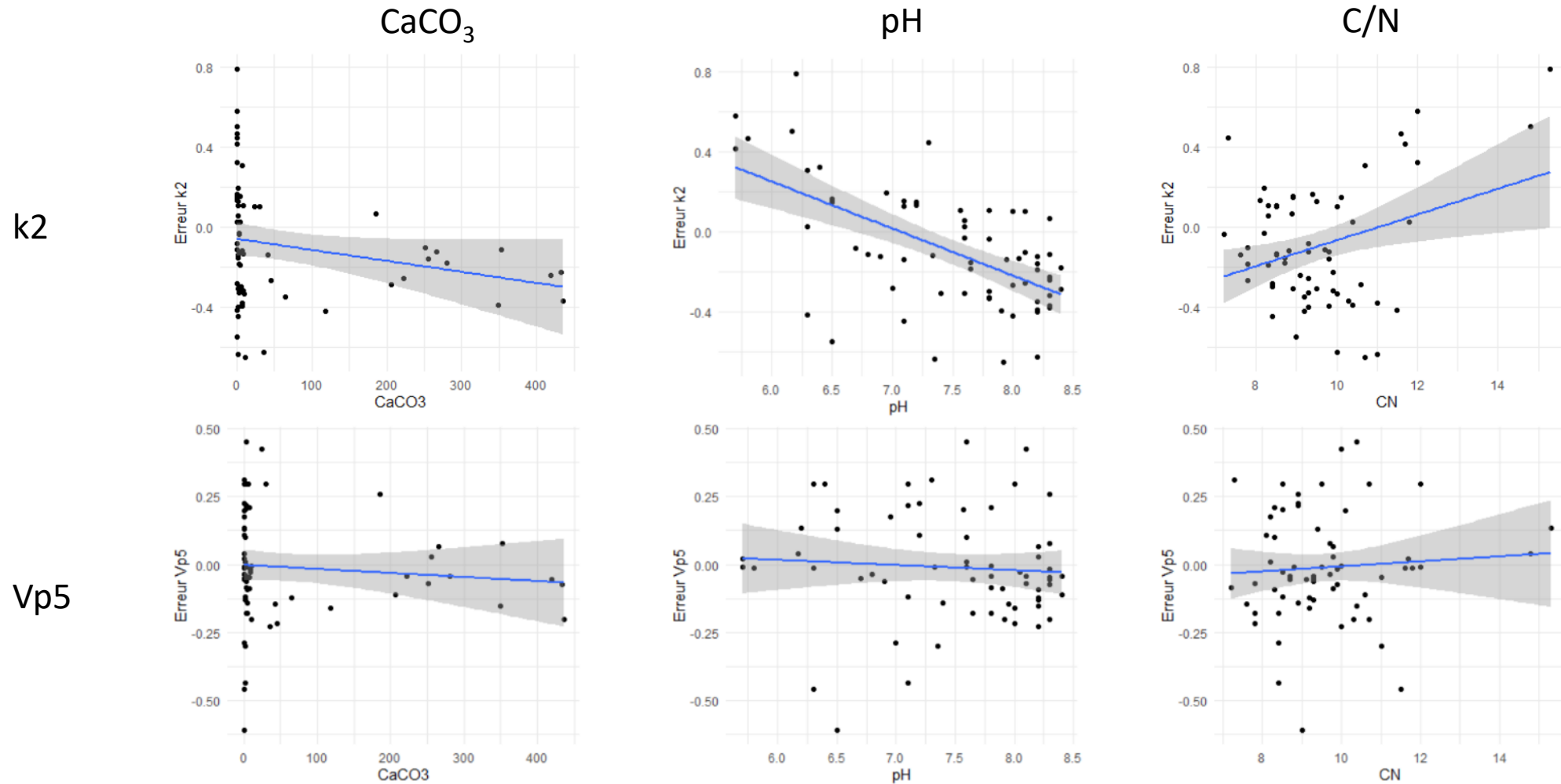
## ➤ Evaluation de la nouvelle fonction de prédiction



## ➤ Meilleur modèle vs Vp prédit par les anciennes équations

# Evaluation du nouveau modèle

- Analyse de l'écart des simulations k2 et Vp5 aux observations (Vp sim-obs) vs variables sol



➔ Implémenter la nouvelle équation dans les modèles de simulation : **STICS** (Nmin) et **AMG** (stocks de C)

# Implémentation dans STICS et évaluation

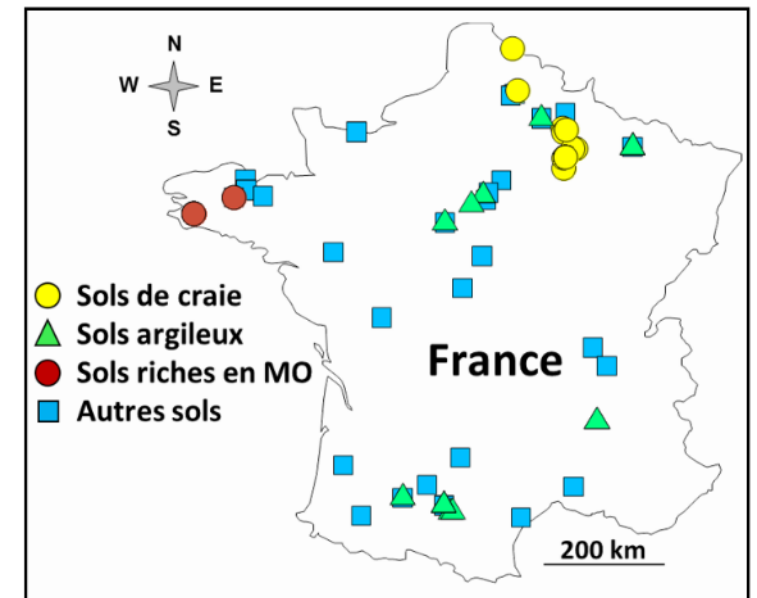
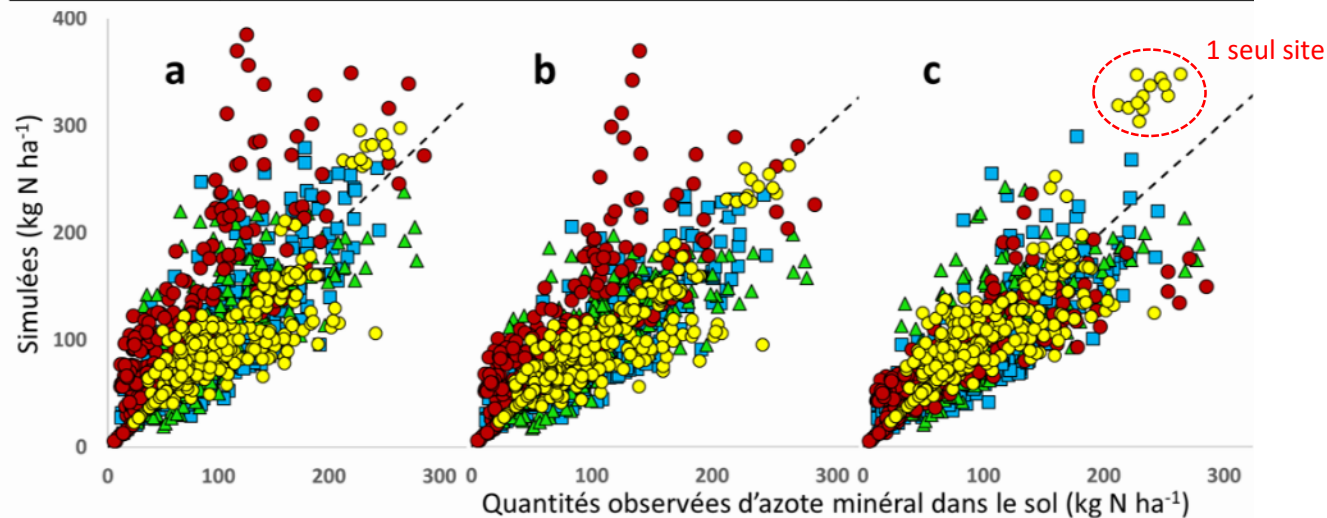
➤ Caler et tester STICS sur BDD SMS sols nus (131 USMs dont 52 utilisées pour la fonction Vp)

a) sans aucun reparamétrage:  $K2HUM = FMIN1 \cdot f(Argile) \cdot f(CaCO_3)$

b) après optimisation du paramètre:  $FMIN1 = 0.00047$  vs  $0.00060$  dans v8.41

c) après implémentation de la nouvelle fonction:  $K2HUM = GMIN1 \cdot f(Argile) \cdot f(CaCO_3) \cdot f(pH) \cdot f\left(\frac{Corg}{Ntot}\right)$

	a. STICS v8.41	b. <i>FMIN1</i> ré-optimisé	c. <i>GMIN1</i>
Efficiéce	0,30 (0,04)	0,54 (0,41)	0,65 (0,51)
rRMSE (%)	47,2 (80,7)	38,3 (63,4)	33,6 (57,9)
Biais (kg N ha <sup>-1</sup> )	-12,0 (-8,5)	0,1 (-2,1)	-0,1 (-2,7)

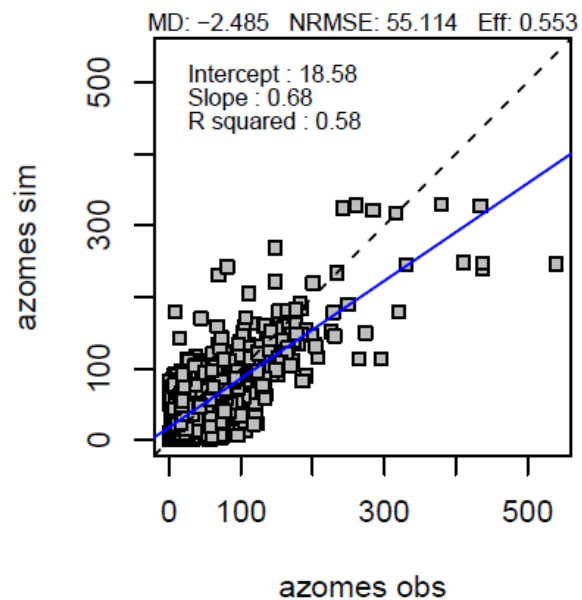


# Implémentation dans STICS et évaluation

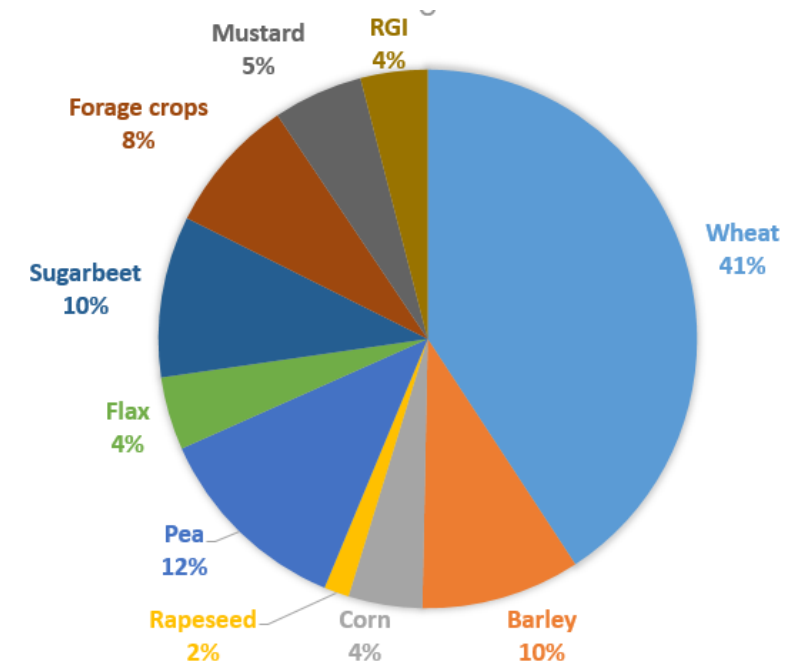
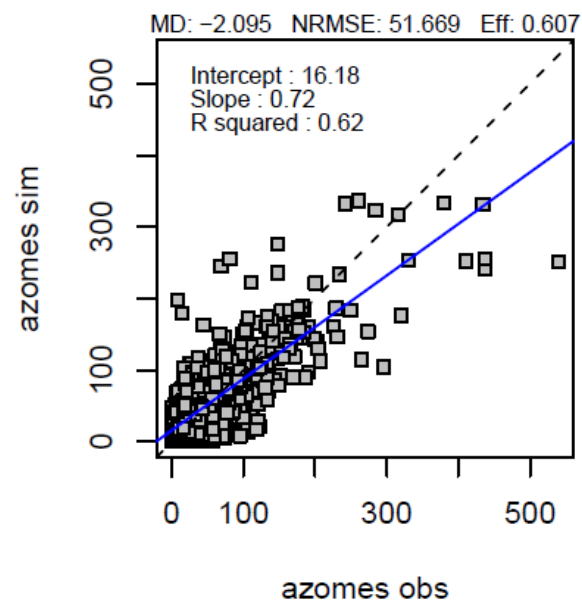
- Evaluation sur BDD SMS sols cultivés (2188 USMs)

Quantités d'azote minéral dans le sol (kg N ha<sup>-1</sup>)

*Paramétrage standard*



*Version optimisée*

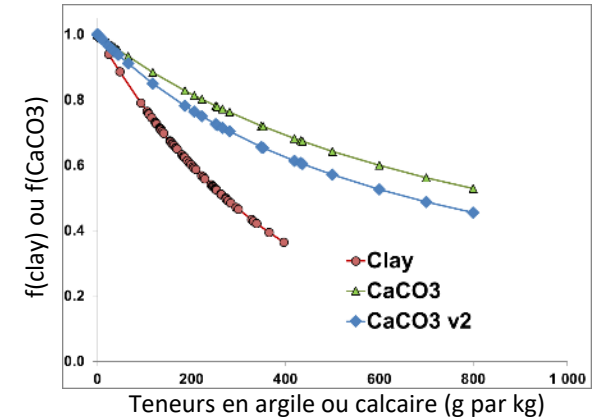


# Mise à jour du paramétrage de la fonction $\text{CaCO}_3$

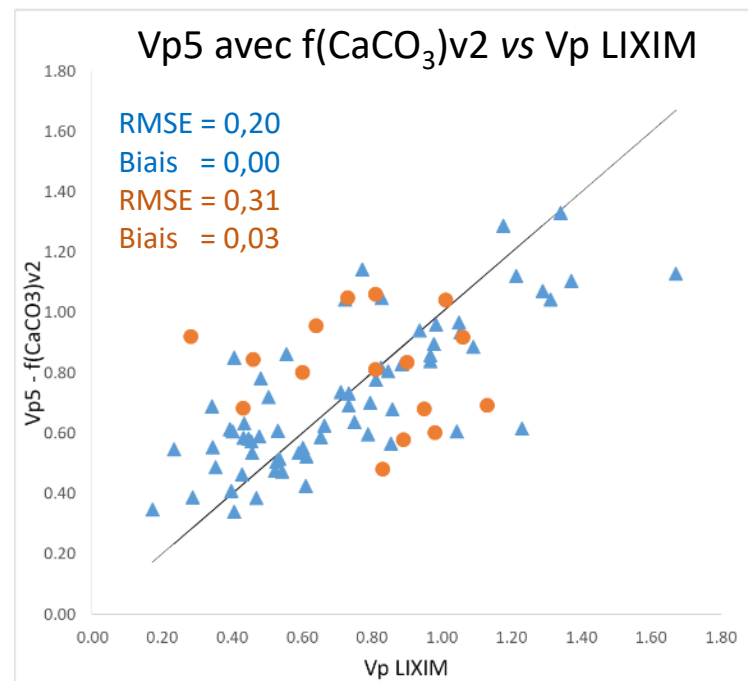
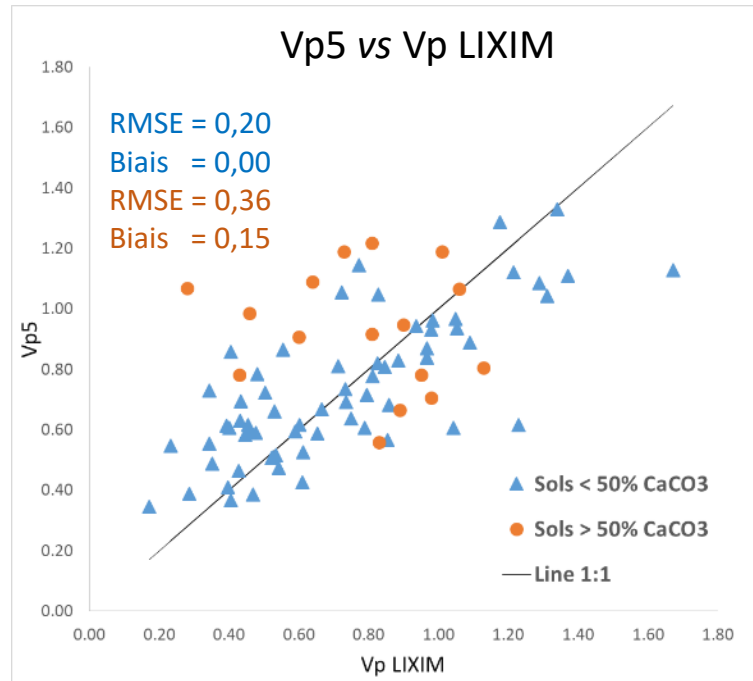
- Travail avec STICS sur l'essai de longue durée de Fagnières (Yin et al 2020)

$$f(\text{CaCO}_3) = \frac{1}{1 + c_m \cdot \text{CaCO}_3} \quad c_m = 1.114 \cdot 10^{-3} \rightarrow \underline{1.5 \cdot 10^{-3}} \text{ (g kg}^{-1}\text{)}$$

Yin X., Beaudoin N., Ferchaud F., Mary B., Strullu L., Chlébowski F., Clivot H., Herre C., Duval J., Louarn G., 2020. Long-term modelling of soil N mineralization and N fate using STICS in a 34-year crop rotation experiment. Geoderma, 357: 113956, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.113956](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113956)



- Validation sur jeu de données en sols de craie (avec incertitude sur les stocks de C et Norg)

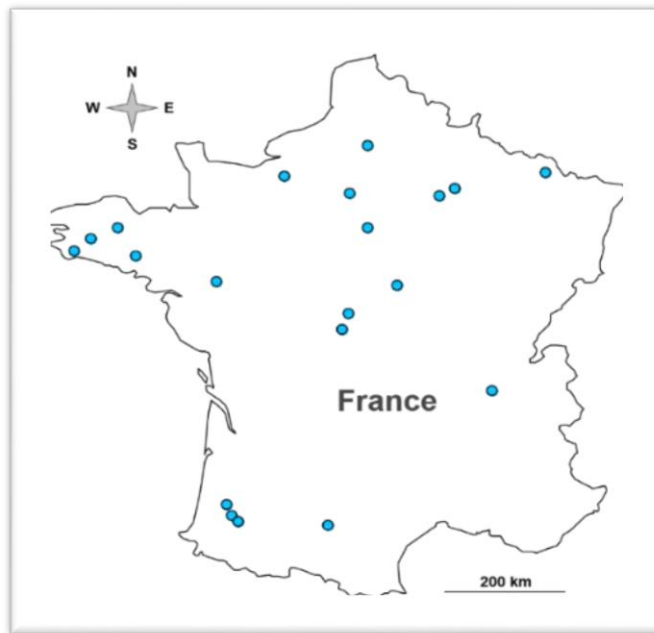


# Implémentation dans AMG et évaluation

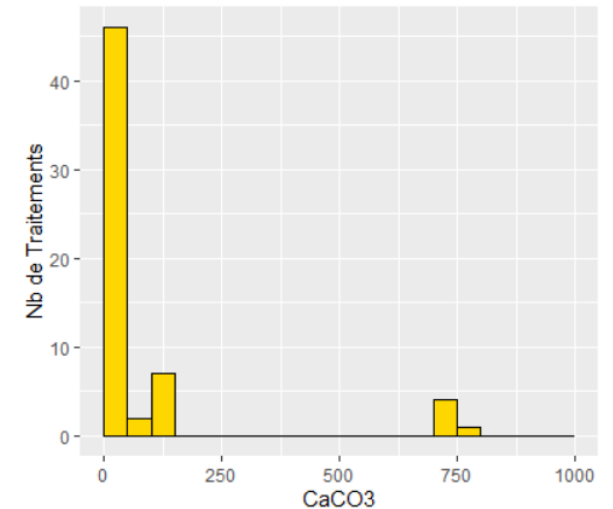
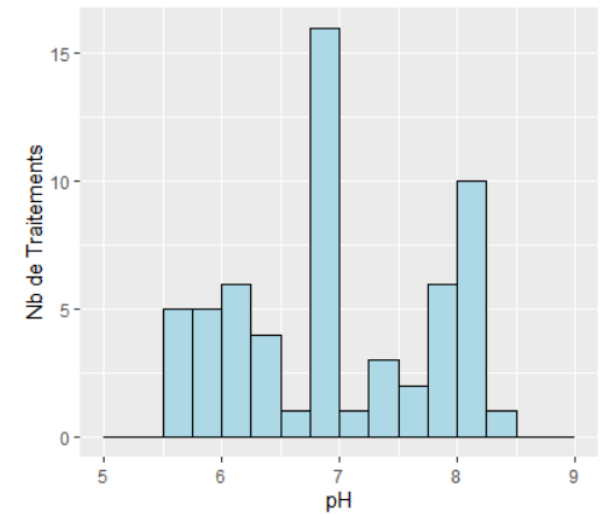
AMG v1 (k2) vs AMG v2 (nouvelle équation de minéralisation)

Base de données d'essais de longue durée **AIAL** (Arvalis, INRA, Agro-Transfert et LDAR)

## 20 sites en France (60 traitements)

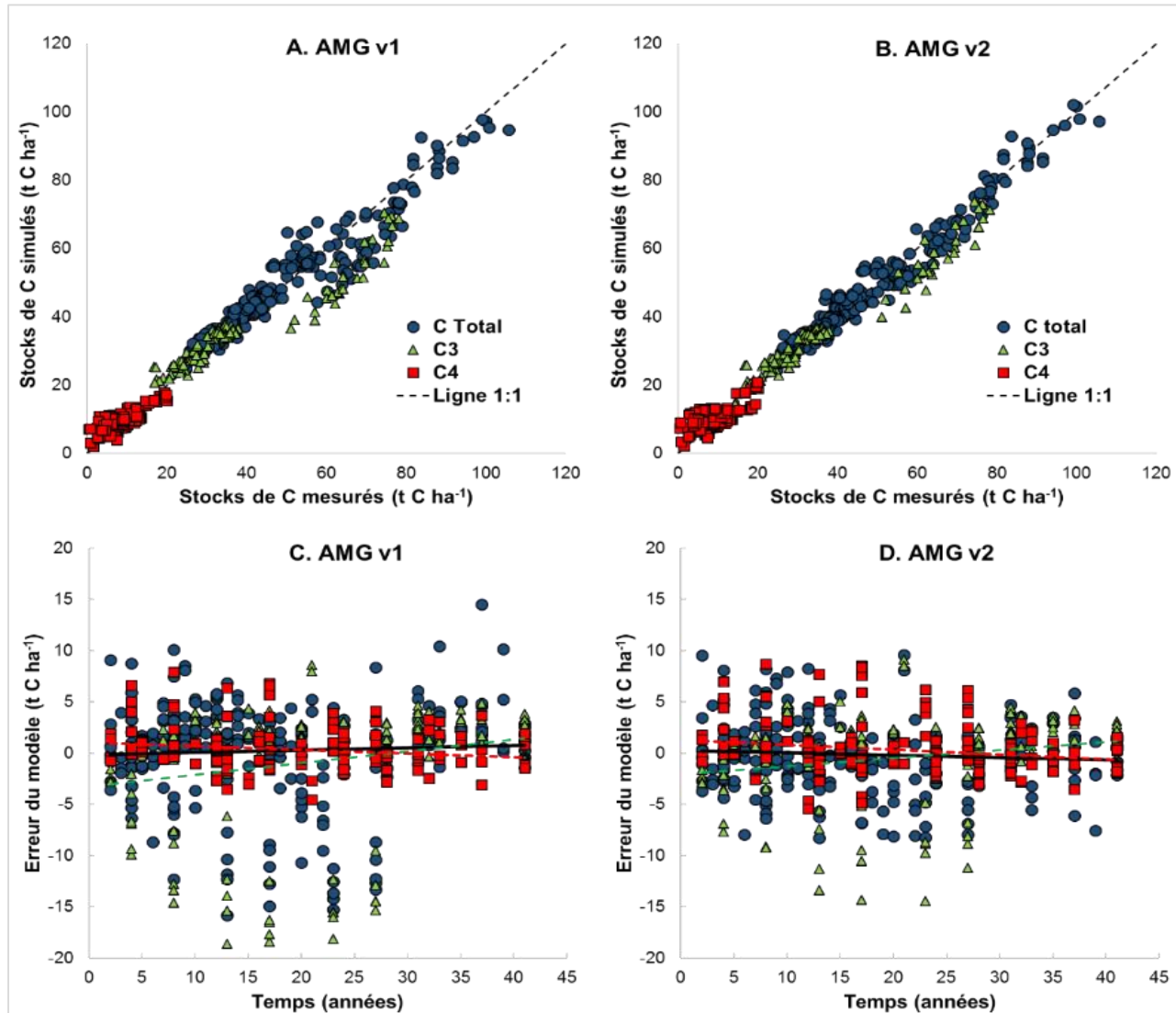


	Units	Min	Max	Median	Mean	SD
<b>SOC stock variations</b>						
Considered soil depth	cm	20	30	28	27	3
Initial SOC stock	t C ha <sup>-1</sup>	25.1	115.3	43.8	53.5	21.2
SOC stock changes (final-initial)	t C ha <sup>-1</sup>	-24.0	7.1	-1.2	-3.6	7.3
Experiment duration	yr	8	41	22	24	12
Annual SOC stock change rates	t C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	-1.01	0.45	-0.08	-0.20	0.33
<b>Soil properties</b>						
Clay	g kg <sup>-1</sup>	43	308	214	197	76
Silt	g kg <sup>-1</sup>	95	781	528	488	176
Sand	g kg <sup>-1</sup>	12	791	140	233	194
CaCO <sub>3</sub>	g kg <sup>-1</sup>	0	781	0	82	209
pH		5.6	8.3	6.8	7.0	0.9
C/N		7.8	13.0	9.1	9.4	1.1
Initial SOC content	g kg <sup>-1</sup>	7.2	32.9	14.1	15.8	6.8
Bulk density	g cm <sup>-3</sup>	1.20	1.52	1.40	1.38	0.08
Rock fragment	%	0	39	0	7	10



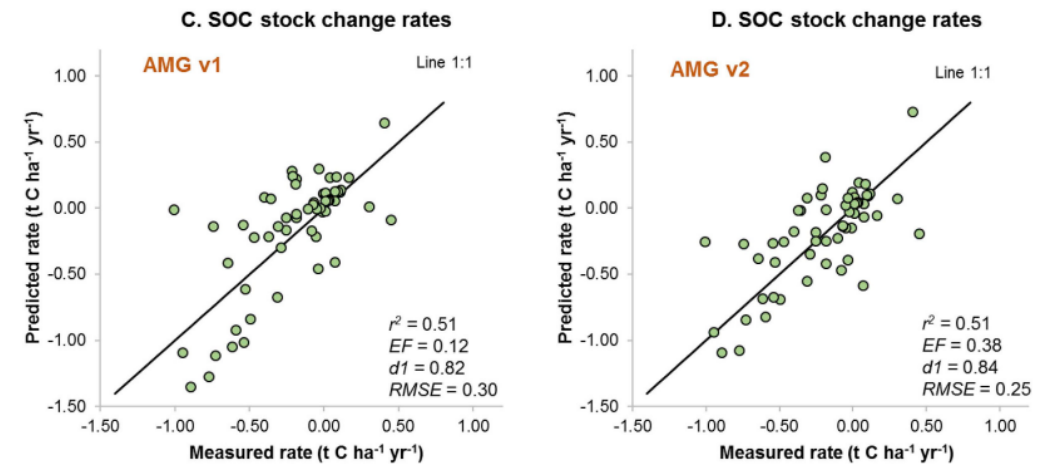
Clivot H., Mouny J.C., Duparque A., Dinh J.L., Denoroy P., Houot S., Vertès F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., Mary B., 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. Environmental Modelling & Software, 118: 99-113, DOI: [10.1016/j.envsoft.2019.04.004](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004)

# Implémentation dans AMG et évaluation



## Comparaison AMG v2 vs v1 =

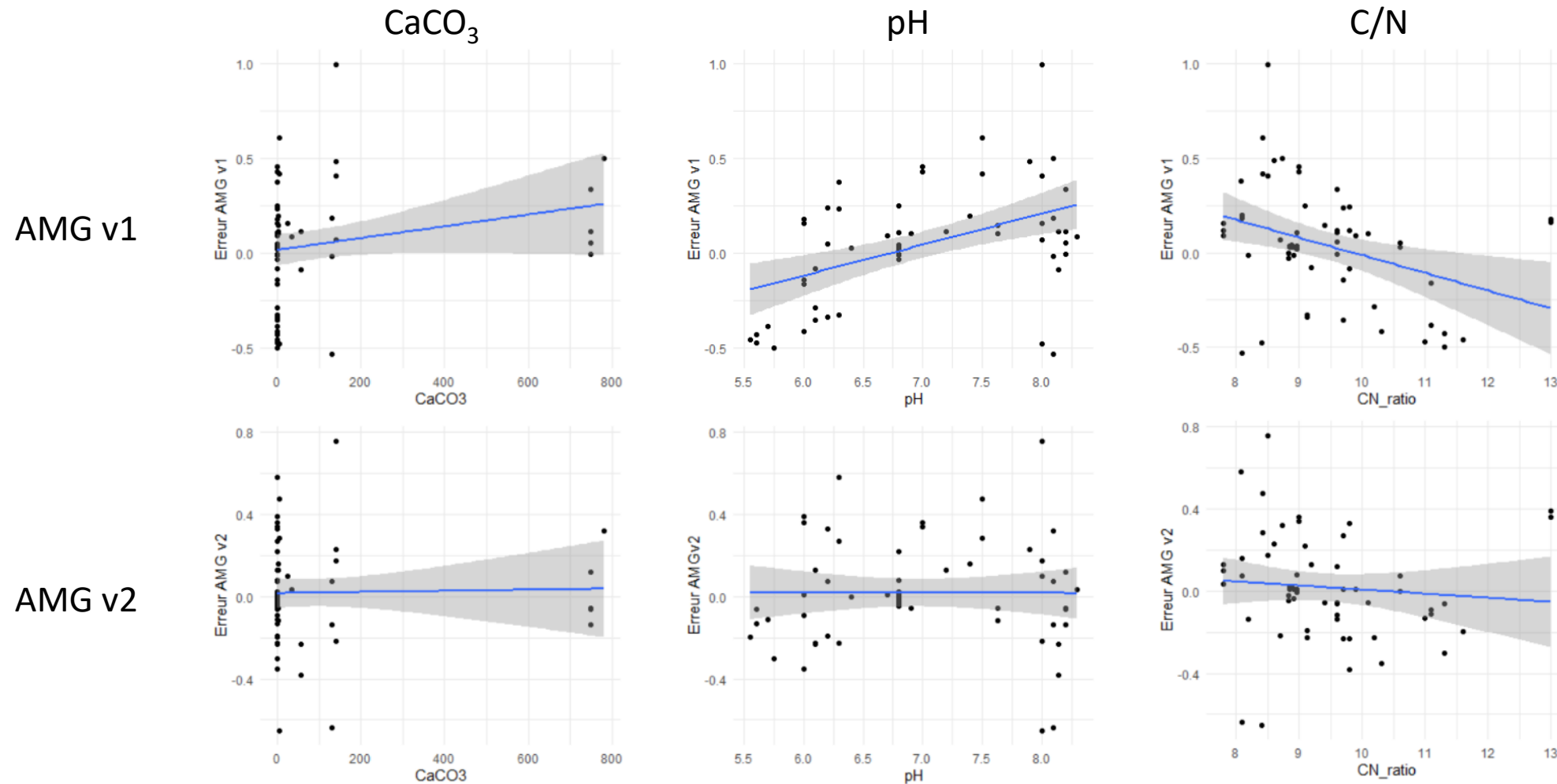
- Amélioration de la simulation des stocks de C : diminution de l'erreur du modèle (RMSE) de 3,2 à 2,6 t C ha<sup>-1</sup>
- Erreur relative (RRMSE) de 5,3 % comparable à l'erreur de mesure des stocks de C (CV = 4,3 %)
- Modèle ne présentant pas de biais ni de dérive au cours du temps



Clivot et al. 2019

# Implémentation dans AMG et évaluation

- Analyse de l'erreur du modèle (sim-obs) pour prédire les variations annuelles de stocks de C





# Conclusion & perspectives

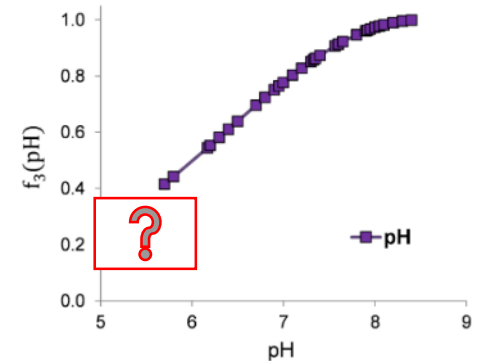
- Equation de prédiction de la minéralisation avec prise en compte de 2 nouvelles variables (pH et C/N) et de nouveaux paramétrages

→ meilleure prédiction de :

- La minéralisation de l'azote in situ (Vp)
- L'azote minéral dans le sol simulé par STICS
- La dynamique du carbone organique du sol simulé par AMG

sur des expérimentations au champ de quelques mois à plusieurs décennies

- Attention au domaine de validité des modèles (e.g. prairies ? pH acides ?)
- Poursuite des travaux d'expérimentation et de modélisation dans des pédoclimats et systèmes de production végétale variés pour mieux caractériser les principaux facteurs impliqués dans la dynamique des matières organiques et étendre les domaines de validité des modèles



# Remerciements

---

## ➤ Co-auteurs de ces travaux

Clivot H., Mary B., Valé M., Cohan J.P., Champolivier L., Piraux F., Laurent F., Justes E., 2017. Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 111: 44-59, [DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.03.010](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.010)

Clivot H., Mouny J.C., Duparque A., Dinh J.L., Denoroy P., Houot S., Vertès F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., Mary B., 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software*, 118: 99-113, [DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.04.004](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004)

Yin X., Beaudoin N., Ferchaud F., Mary B., Strullu L., Chlébowski F., Clivot H., Herre C., Duval J., Louarn G., 2020. Long-term modelling of soil N mineralization and N fate using STICS in a 34-year crop rotation experiment. *Geoderma*, 357: 113956, [DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113956](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113956)

## ➤ Responsables et personnes en charge des expérimentations et essais de longue durée

## ➤ Personnes en charge de la préparation et des analyses de sols

....