




Avec la participation de l' 

# Prédiction de la minéralisation de l'azote organique humifié des sols cultivés : paramétrage et validation de modèles opérationnels

E Justes<sup>1</sup>, JP Cohan<sup>2\*</sup>, M Desprez<sup>2</sup>, J Cerman<sup>1</sup>, M Valé<sup>3</sup>, L Champolivier<sup>4</sup>, F Laurent<sup>2</sup> et B Mary<sup>5</sup>

1 INRA - UMR AGIR - BP 52627 - 31326 Castanet Tolosan Cedex ; [eric.justes@toulouse.inra.fr](mailto:eric.justes@toulouse.inra.fr)

2 ARVALIS – Institut du végétal, Station expérimentale 91720 Boigneville,

3 SAS LABORATOIRE – 270 avenue de la Pomme de Pin – BP 10636 - ARDON - 45166 OLIVET cedex, précédemment ARVALIS et CETIOM basé à INRA (UMR AGIR Toulouse)

4 CETIOM - UMR AGIR - BP 52627 - 31326 Castanet Tolosan Cedex

5 INRA - Unité Agro-Impacts - Rue Fernand Christ - 02007 LAON CEDEX

\* auteur correspondant : [jp.cohan@arvalisinstitutduvegetal.fr](mailto:jp.cohan@arvalisinstitutduvegetal.fr)



ARVALIS  
Institut du végétal

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



# Introduction

Estimation des quantités d'azote minéralisé à partir des **pools organiques du sol** = enjeu majeur de la maîtrise des flux N dans les **systemes de cultures**

Prédiction de la **minéralisation de l'azote organique humifié** des sols cultivés = objet de nombreux travaux

**JN** : Temps normalisés à 15°C et HCC (jours)

**K2** : taux de minéralisation Norg humifié (kgN.TNorg.ha<sup>-1</sup>.JN<sup>-1</sup>)

**Vp** : Vitesse potentielle de minéralisation Norg humifié (kgN.ha<sup>-1</sup>.JN<sup>-1</sup>)

**Mh** : quantité d'azote minéralisé à partir de Norg humifié (kgN.ha<sup>-1</sup>)

$$Vp = K2 \cdot TNorg$$

$$Mh = Vp \cdot JN$$

# Rappel des travaux antérieurs

## Équation du K2 référence (Brisson et al. 1998) :

$$K2 = \text{Fact. } a / ((b+A) \cdot (c+\text{CaCO}_3))$$

Fact : fraction active d'azote organique, fixée à 0.35

A = teneur en argile vraie (g.kg-1)

C = teneur en CaCO<sub>3</sub> (g.kg-1)

a, b et c = 65, 110 et 600

## Modèle ANN Valé et al. 2007 :

- Équation non linéaire en exponentielles multiples
- 4 variables = A, CaCO<sub>3</sub>, pH eau et fréquence de colza dans la rotation
- Meilleure prédiction du K2 par rapport au K2 référence

# Objectifs de l'étude

---

- **Validation du modèle ANN Valé et al. 2007 avec des jeux de données indépendants du paramétrage :**

En sol nu

Sous culture de céréales à pailles

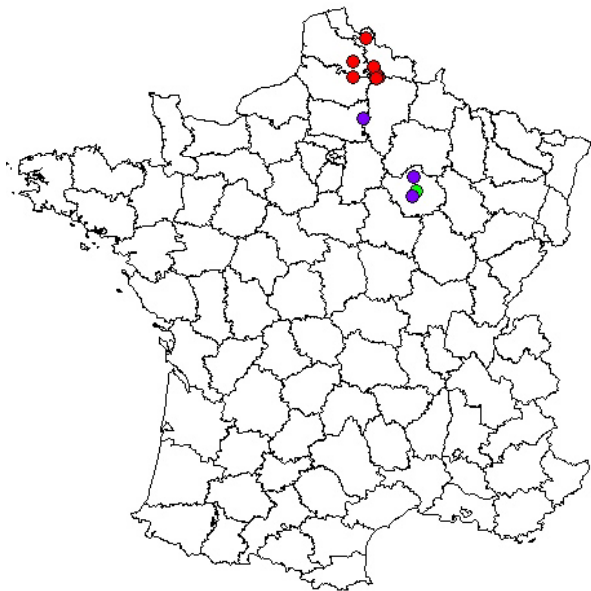
- **Étude de la sensibilité du modèle ANN Valé et al. 2007 à la variable fréquence de colza dans la rotation**
- **Nouvelles modélisations pour affiner la prise en compte de la variable colza dans la rotation**

# Validation du modèle ANN Valé et al. 2007 en sol nu

12 essais\*

■ CA 59/62  
■ CAVISA (INRA E.J.)  
■ SOUFFLET

Site	Dpt	Expérimentateur	type de sol	A (g.kg <sup>-1</sup> )	CaCO3 (g.kg <sup>-1</sup> )	Ntot (g.kg <sup>-1</sup> )	Ctot (g.kg <sup>-1</sup> )	MO (%)	Norg (tN.ha <sup>-1</sup> )	pH eau	Fréq. Colza
ARCIS SUR AUBE	10	CAVISA (INRA E.J.)	Rendzine brune sur craie à poches	59	657	2.0	19.3	3.3	7.7	8.3	0.0
BERNEUIL SUR AISNE	60	CAVISA (INRA E.J.)	sable argileux	124	353	1.0	9.6	1.7	4.5	8.3	0.0
BOURANTON	10	SOUFFLET	calcaire moyennement profond	108	668	1.4	12.3	2.1	4.4	8.3	0.0
BUCHERES	10	CAVISA (INRA E.J.)	limon	90	619	1.4	13.1	2.3	5.3	8.3	0.0
ELINCOURT	59	CA 59/62	limon argileux	191	5	1.4	12.5	2.2	6.3	7.4	0.0
ESNES 02	59	CA 59/62	limon argileux	159	11	1.2	12.9	2.2	5.4	7.9	0.0
ESNES 03	59	CA 59/62	limon argileux	183	4	1.4	14.5	2.5	6.3	7.6	0.0
HAUT PAYS	62	CA 59/62	limon moyen profond	156	7	1.1	10.8	1.9	4.3	7.9	0.0
MARTINPUICH	62	CA 59/62	limon argileux	185	1	1.3	12.3	2.1	5.9	7.6	0.0
MONTREUIL	59	CA 59/62	sable limoneux profond	115	36	1.1	11.0	1.9	4.7	8.2	0.0
RAMILLIES	59	CA 59/62	limon argileux profond	225	2	1.5	16.1	2.8	5.9	7.4	0.1
VILLERS OUTREAUX	59	CA 59/62	limon argileux	133	3	1.1	10.2	1.8	5.0	7.8	0.0

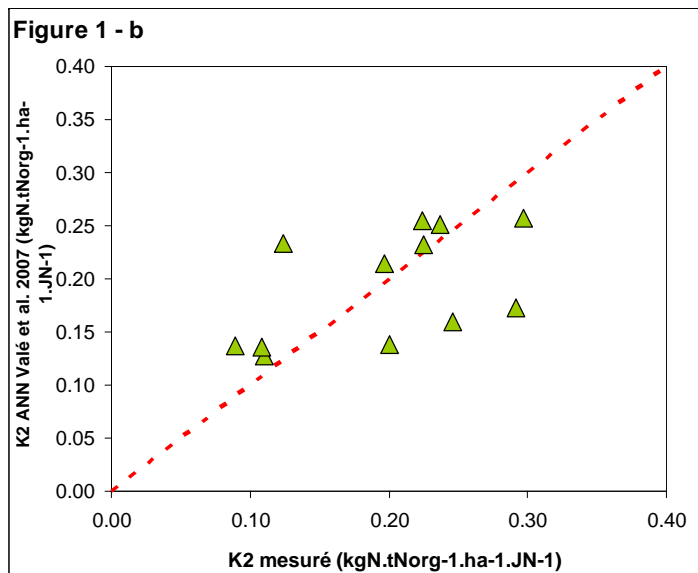
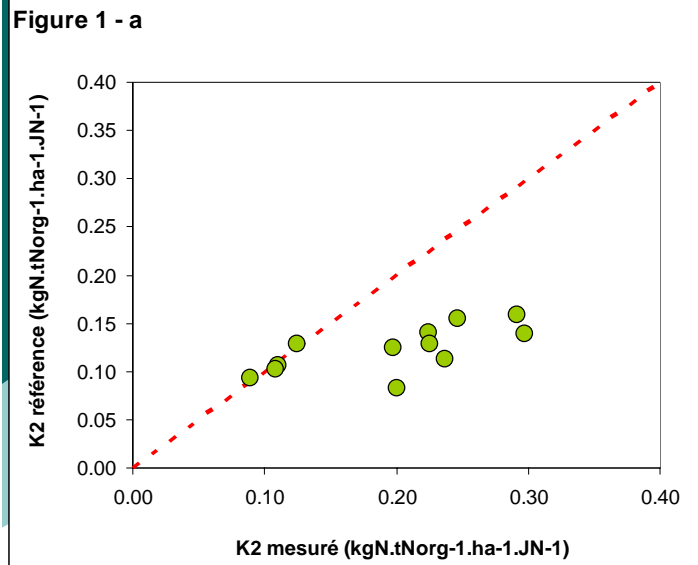


## Méthodologie

- Essai = suivi des stocks N et H<sub>2</sub>O du sol dans le temps
- Calcul de Vp par le modèle LIXIM (Mary et al. 1999)
- Calcul du K2 = Vp/TNorg (« K2 mesuré »)
- Comparaison aux K2 estimés par les modèles

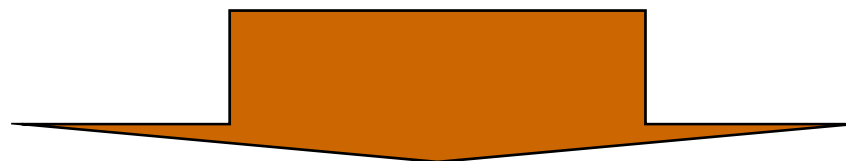
\* Essais CA 59/62, CAVISA (INRA E.J.) et SOUFFLET

# Validation du modèle ANN Valé et al. 2007 en sol nu



	RMSE kgN.tNorg-1.ha-1.JN-1	RRMSE %	EF	Biais kgN.tNorg-1.ha-1.JN-1	d1
<b>K2 référence</b>	0.092	47.1%	-0.80	0.07	0.434
<b>K2 ANN Valé et al. 2007</b>	0.061	31.0%	0.22	0.00	0.544

**K2 ANN Valé et al. 2007 = plus faible erreur de prédiction, meilleur efficacité de modélisation, pas de biais**



**Confirmation que le K2 ANN Valé et al. 2007 est plus performant que le K2 référence en sol nu.**

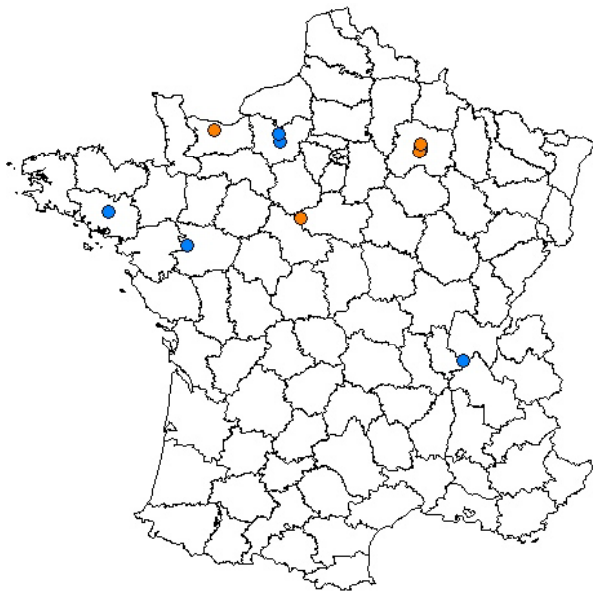
# Validation du modèle ANN Valé et al. 2007 sous culture (témoin 0N)

14 essais\* BTH

5 essais\* OP



Site	Dpt	Espèce	type de sol	A (g.kg <sup>-1</sup> )	CaCO3 (g.kg <sup>-1</sup> )	Ntot (g.kg <sup>-1</sup> )	Ctot (g.kg <sup>-1</sup> )	MO (%)	Norg (tN.ha <sup>-1</sup> )	pH eau	Fréq. Colza
Bernierville	27	BTH	Limon	128.8	1.0	1.2	11.5	2.0	5.4	7.6	0.0
Cesseville	27	BTH	Limon profond	101.8	1.0	1.0	7.9	1.4	4.4	7.6	0.0
Kerguehenec	56	BTH	Limon	152.0	0.0	2.3	20.9	3.6	9.1	6.4	0.0
Kerguehenec	56	BTH	Limon sur schistes	176.0	0.0	2.9	26.2	4.5	11.3	6.3	0.0
Kerguehenec	56	BTH	Limon profond sur schistes tendres	141.9	0.0	1.7	16.5	2.8	6.6	6.4	0.1
La Chap. St Sauveur	44	BTH	Limon argileux	213.0	0.0	1.3	11.6	2.0	4.1	6.7	0.2
Lyon St Ex.	69	BTH	Graviers profonds	165.0	1.2	1.6	14.5	2.5	4.8	6.7	0.4
Matougues	51	BTH	Craie	91.4	706.9	1.6	14.9	2.6	6.4	8.2	0.0
Matougues	51	BTH	Craie	90.0	800.0	2.1	20.6	3.5	8.2	8.4	0.0
Matougues	51	BTH	Craie	91.0	792.0	2.2	22.0	3.8	8.6	8.3	0.0
Saint pierre	51	BTH	Craie	34.8	828.3	2.0	18.8	3.2	7.9	8.3	0.0
Villejouet	41	BTH	Argile limoneuse	268.0	1.0	1.4	12.2	2.1	5.3	6.9	0.3
Vraux	51	BTH	Craie	55.1	764.7	2.3	19.9	3.4	8.8	8.2	0.1
Vraux	51	BTH	Craie	89.4	697.3	1.7	15.5	2.7	6.8	8.3	0.1
Mézières	41	OP	Limon argileux profond	196.0	7.0	1.2	10.9	1.9	5.5	7.6	0.1
Rots	14	OP	Limon argileux profond	162.0	5.0	1.2	10.9	1.9	5.5	7.7	0.0
Rots	14	OP	Limon argileux profond	176.0	3.0	1.2	10.9	1.9	5.5	7.1	0.0
Thibie	51	OP	Craie	27.9	845.6	1.7	18.4	3.2	6.6	8.4	0.0
Vraux	51	OP	Craie	101.2	695.3	1.9	18.0	3.1	7.4	8.2	0.0

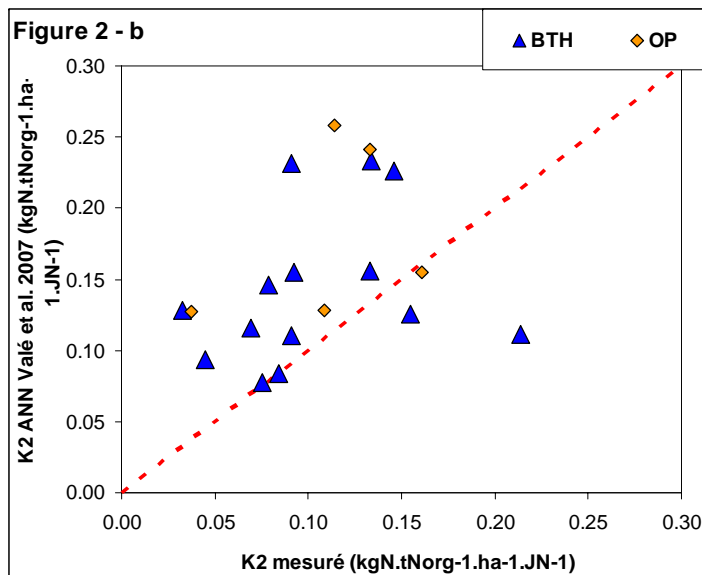
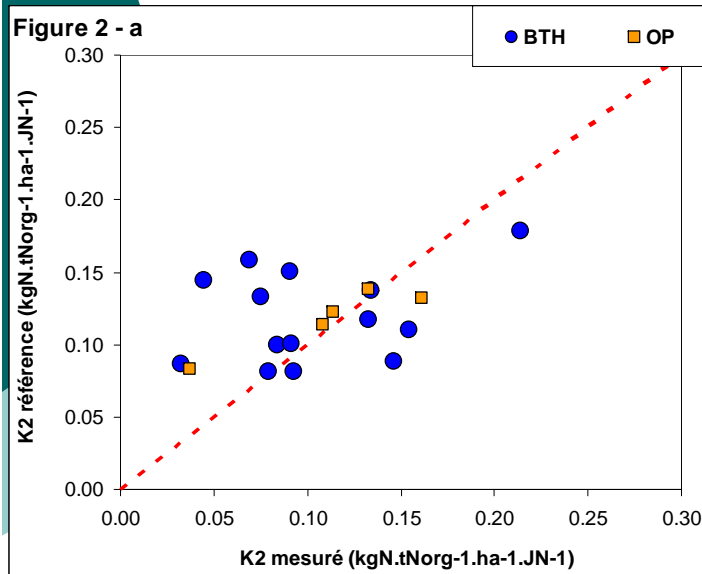


## Méthodologie

- Calcul de Mh par bilan de masse N sol sur témoin 0N
- Calcul de Vp = Mh/JN (avec JN issu de simulation STICS)
- Calcul du K2 = Vp/TNorg (« K2 mesuré »)
- Comparaison aux K2 estimés par les modèles

\* Essais ARVALIS – Institut du végétal

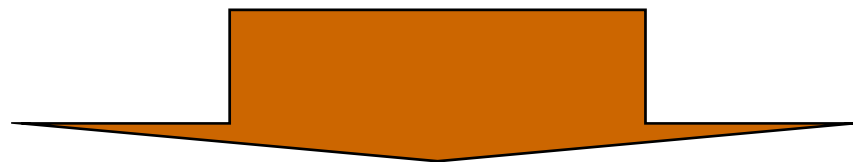
# Validation du modèle ANN Valé et al. 2007 sous culture (témoin 0N)



	RMSE kgN.tNorg-1.ha-1.JN-1	RRMSE %	EF	Biais kgN.tNorg-1.ha-1.JN-1	d1
K2 référence	0.045	42.7%	0.02	-0.01	0.456
K2 ANN Valé et al. 2007	0.077	72.9%	-1.86	-0.05	0.317

**K2 ANN Valé et al. 2007 = la plus mauvaise performance de prédiction**

**K2 référence = performance médiocre aussi**



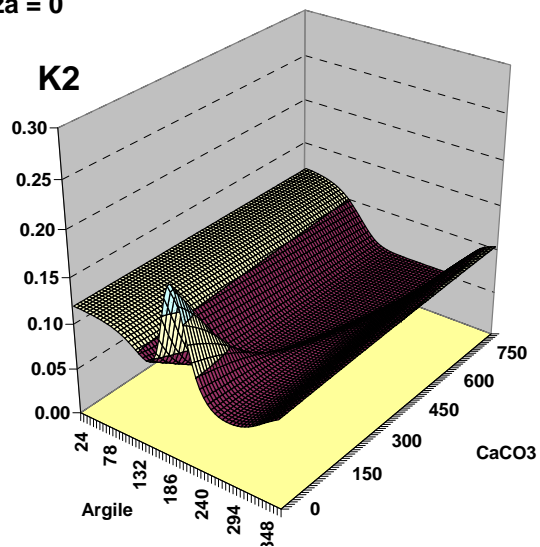
**Imprécision de la méthodologie = besoin d'enrichir le jeu de données de validation et de lever des imprécisions de calcul**

**Transfert d'un modèle élaboré en sol nu sous culture : Impact de l'organisation N dans la rhizosphère ?**

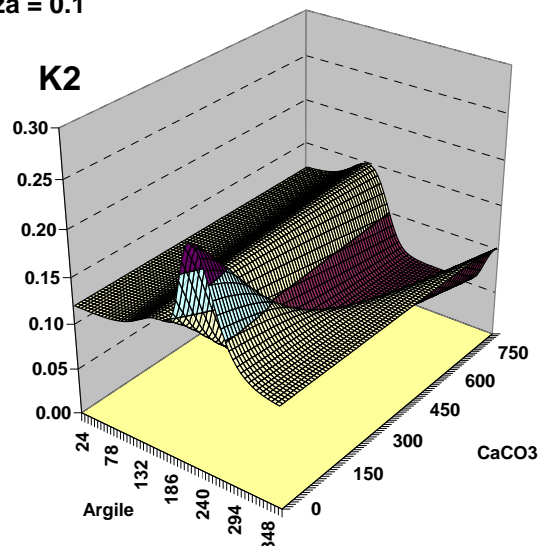


# Sensibilité du modèle ANN Valé et al. 2007 à la variable fréquence de colza dans la rotation

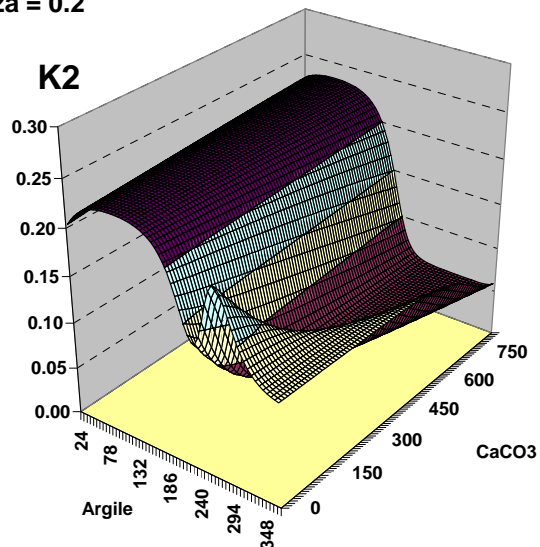
Fréquence de colza = 0



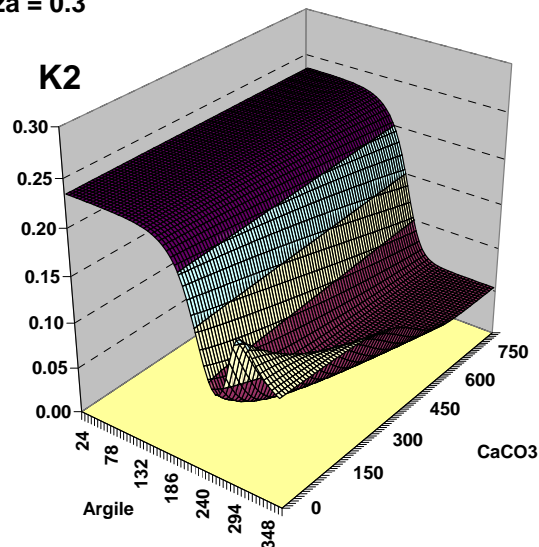
Fréquence de colza = 0.1



Fréquence de colza = 0.2



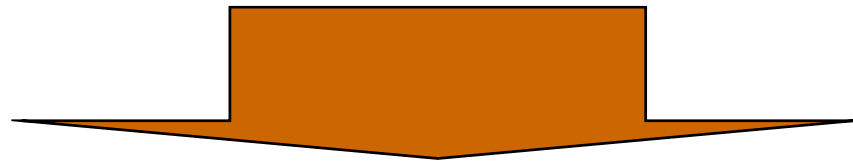
Fréquence de colza = 0.3



# Sensibilité du modèle ANN Valé et al. 2007 à la variable fréquence de colza dans la rotation

---

- Forte influence de la variable sur la prédiction du K2
- Imprécision de la définition de la variable dans le système de culture (quelle durée considérer ?)



Engagement de travaux de modélisation pour une prise en compte plus opérationnelle de la variable colza

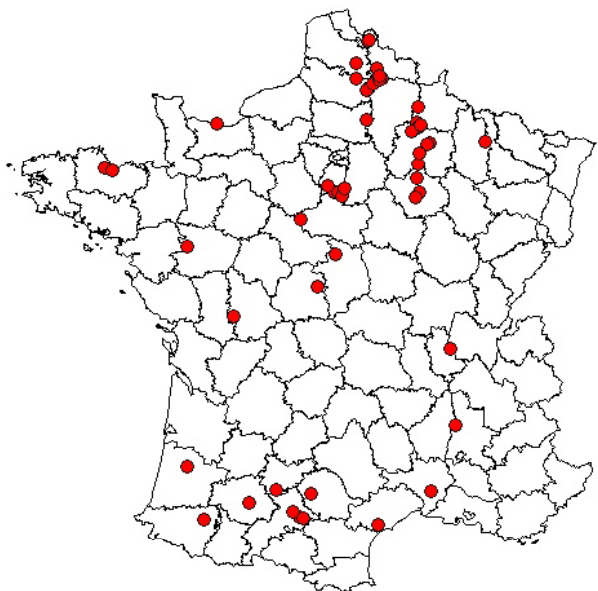
3 nouvelles variables colza :

- RotColza : présence d'un colza dans la rotation (0 ou 1)
- PrecColza : colza en précédent cultural (0 ou 1)
- RotPrecColza : fusion des 2 variables (0, 0.5 ou 1)

# Elaboration de nouveaux modèles avec des variables « colza » opérationnelles

80 essais\*

Variable	Abréviation	Unité	Moyenne	Minimum	Maximum
<i>Physico-chimique (mesure sur l'horizon 0-30 cm)</i>					
Teneur en argile décarbonatée	A	g.kg <sup>-1</sup>	179.9	24.0	364.9
Teneur en limon total	L	g.kg <sup>-1</sup>	436.1	35.5	813.5
Teneur en sable total	S	g.kg <sup>-1</sup>	190.1	2.5	895.0
Teneur en carbonate de calcium	CaCO <sub>3</sub>	g.kg <sup>-1</sup>	177.1	0.0	857.5
pH eau	pHeau		7.6	5.7	8.4
Teneur en Carbone total	Corg	g.kg <sup>-1</sup>	13.3	6.5	34.7
Teneur en Azote total	Norg	g.kg <sup>-1</sup>	1.4	0.8	3.0
Stock de Carbone total	TCorg	t.ha-1	54.8	28.9	147.2
Stock d'Azote total	TNorg	t.ha-1	5.6	3.0	12.6
Rapport C/N de la matière organique	C/N		9.6	7.2	15.3
<i>Système de culture</i>					
Présence d'un colza dans la rotation (0 ou 1)	RotColza		0.2	0.0	1.0
Colza en précédent cultural (0 ou 1)	PrecColza		0.1	0.0	1.0
Présence et positionnement d'un colza dans la rotation (0, 0.5 ou 1)	RotPrecColza		0.1	0.0	1.0



## Méthodologie

- Modélisation par ANN (Valé et al. 2007)
- Utilisation de tout le jeu de données
- Modélisation du K2
- Analyse de la performance des modèles sur K2 et Vp

\* Essais ARVALIS, INRA, CETIOM, CA 59/62, CAVISA, SOUFFLET, CREAB

Rencontres de Blois: les 25 et 26 novembre 2009

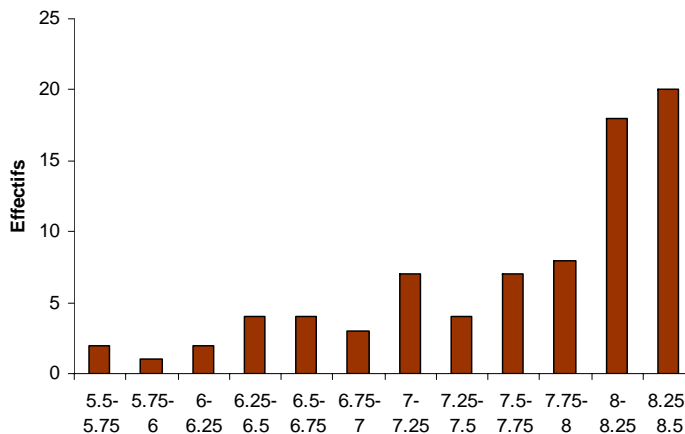
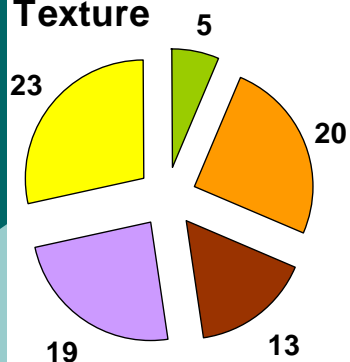
« Fertilisation raisonnée et analyse de terre: Quoi de neuf en 2009? »

# Elaboration de nouveaux modèles avec des variables « colza » opérationnelles

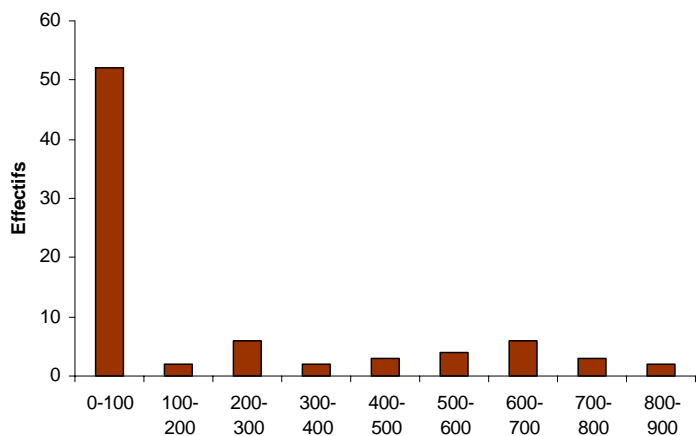
80 essais\* : plages de variations de quelques variables explicatives

\* Essais ARVALIS, INRA, CETIOM, CA 59/62, CAVISA, SOUFFLET, CREAB

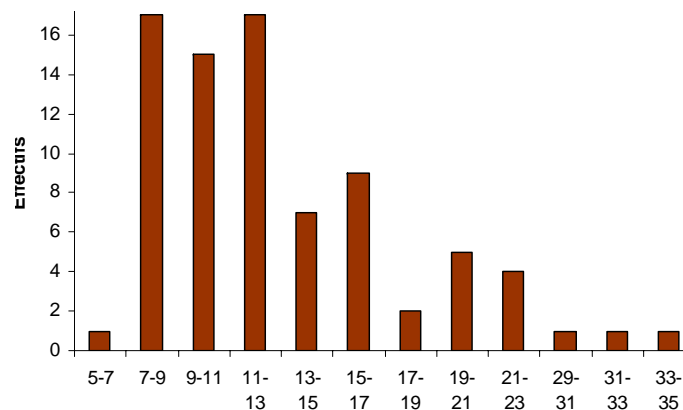
## Texture



## pH eau

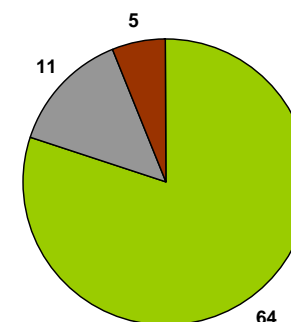


## CaCO3 (g.kg-1)



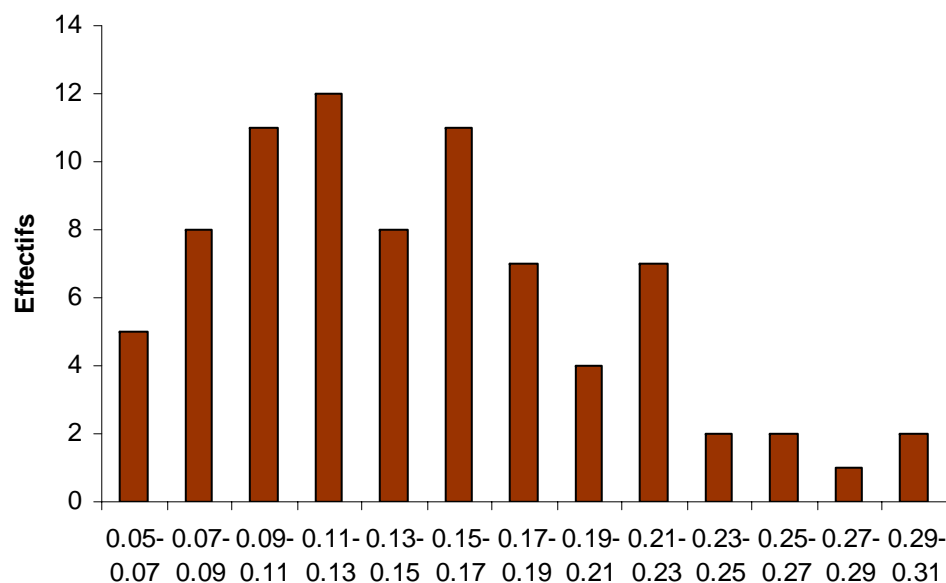
## Corg (g.kg-1)

## RotPrecColza

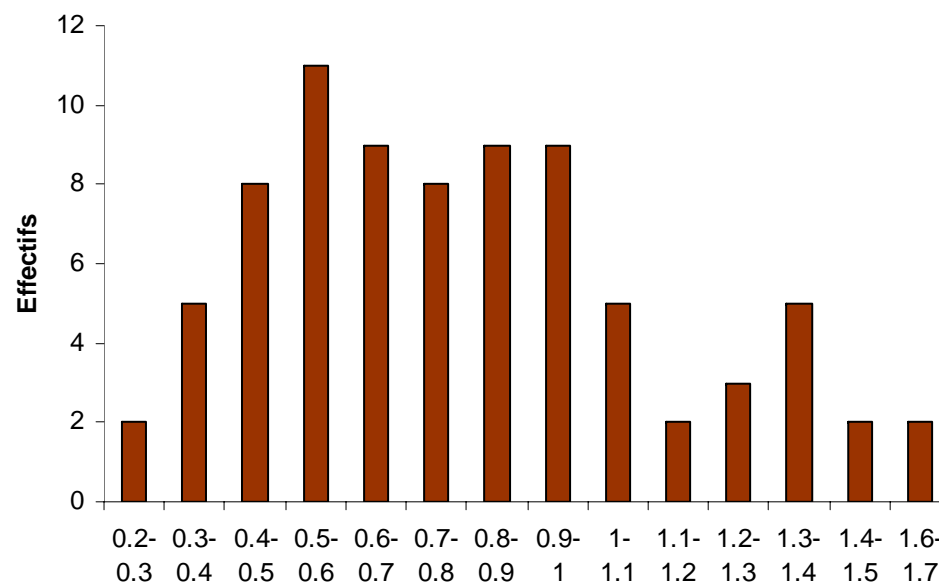


# Elaboration de nouveaux modèles avec des variables « colza » opérationnelles

80 essais\* : plages de variations des variables à expliquer



K2 mesuré (kgN.tNorg<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup>.JN<sup>-1</sup>)



Vp mesurée (kgN.ha<sup>-1</sup>.JN<sup>-1</sup>)

\* Essais ARVALIS, INRA, CETIOM, CA 59/62, CAVISA, SOUFFLET, CREAB

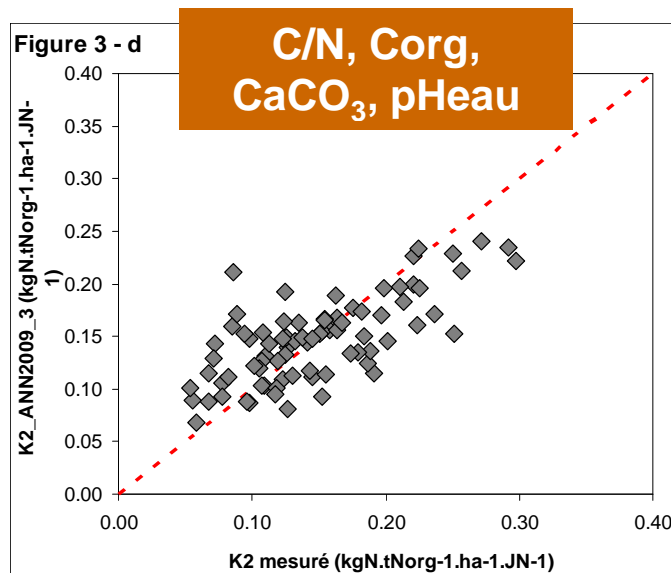
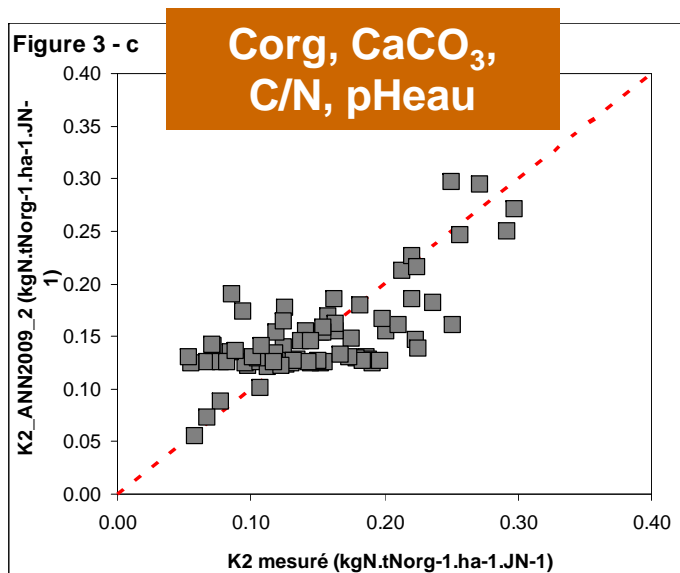
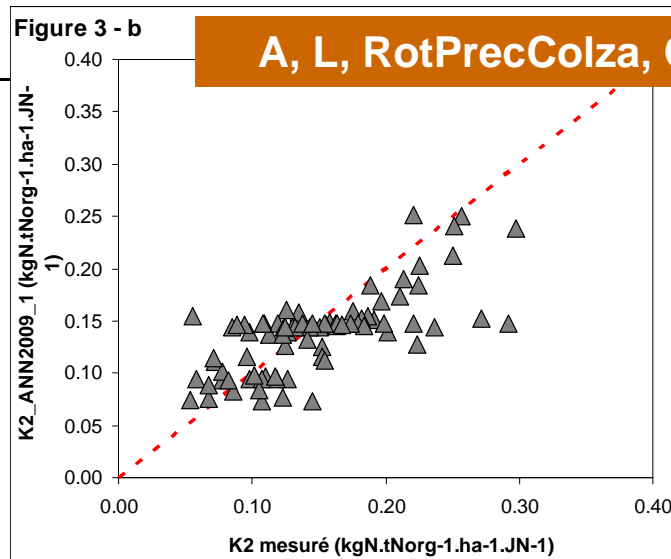
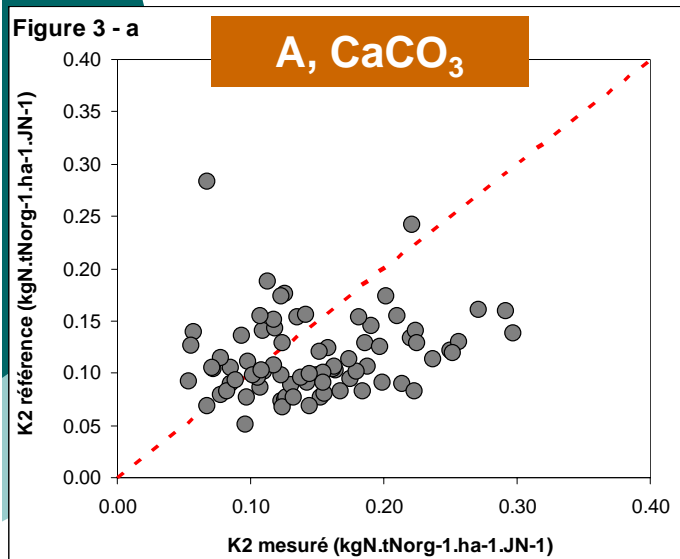


Rencontres de Blois: les 25 et 26 novembre 2009

« Fertilisation raisonnée et analyse de terre: Quoi de neuf en 2009? »



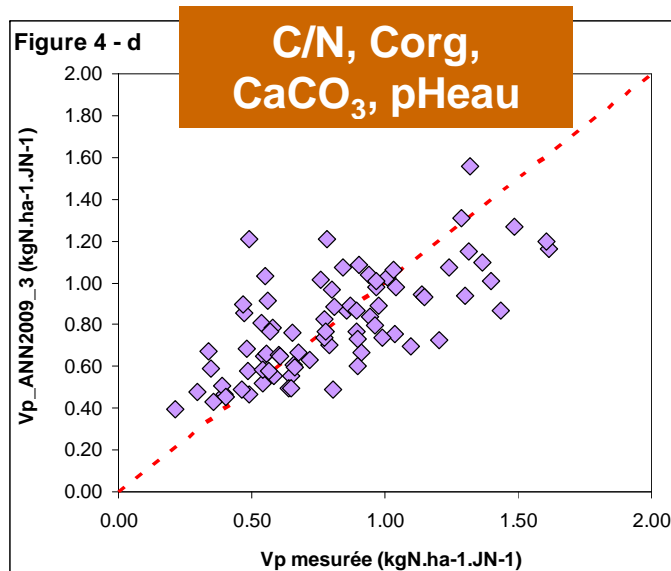
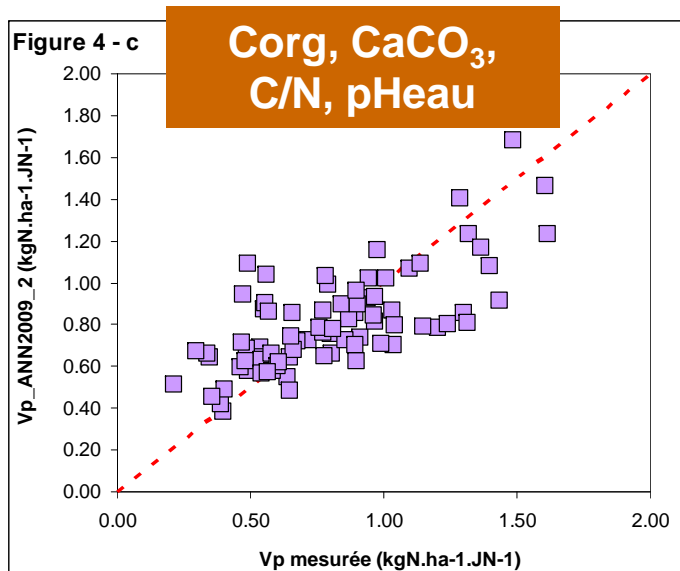
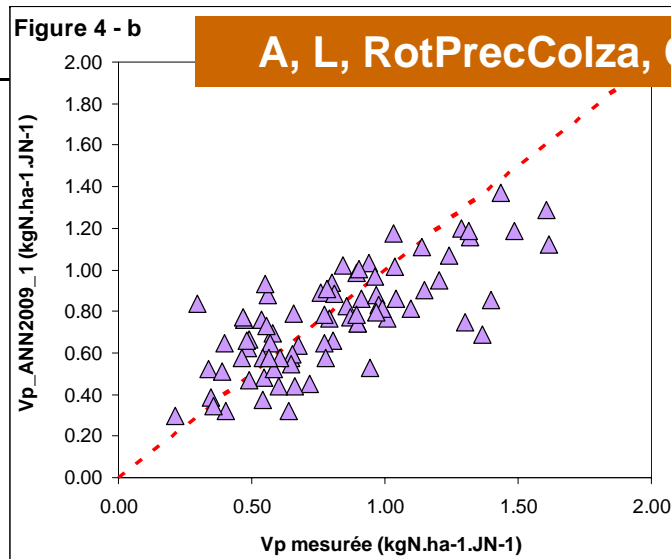
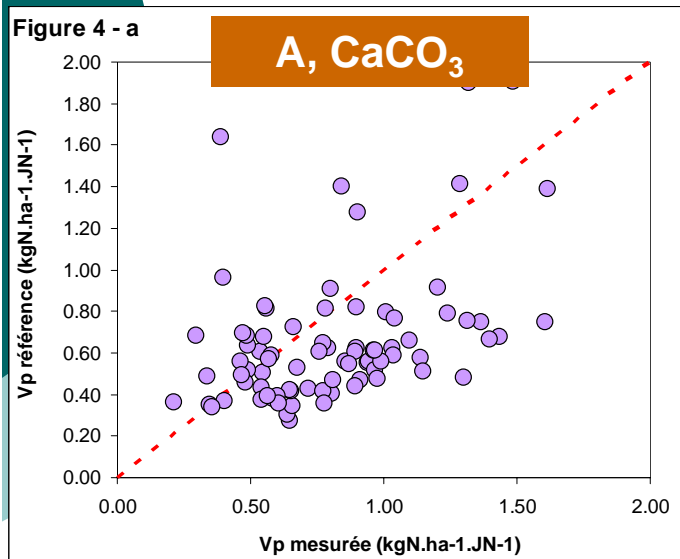
# Elaboration de nouveaux modèles avec des variables « colza » opérationnelles



## Résultats sur K2

- 3 nouveaux modèles affichant de meilleures performances que le K2 référence
- La variable RotPrecColza apparaît dans le modèle K2\_ANN2009\_1
- La variable Corg apparaît dans les 3 modèles

# Elaboration de nouveaux modèles avec des variables « colza » opérationnelles



## Résultats sur Vp

- 3 nouveaux modèles affichant de meilleures performances que le K2 référence pour prédire la Vp.
- La variable **RotPrecColza** apparaît dans le modèle K2\_ANN2009\_1
- La variable **Corg** apparaît dans les 3 modèles



# Elaboration de nouveaux modèles avec des variables « colza » opérationnelles

Modèles	Variables explicatives par ordre de contribution				Performance de paramétrage du K2				Performance induite sur la prédiction de Vp			
					RMSE kgN.tNorg-1.ha-1.JN-1	RRMSE	EF	Biais kgN.tNorg-1.ha-1.JN-1	RMSE kgN.ha-1.JN-1	RRMSE	EF	Biais kgN.ha-1.JN-1
<i>K2 référence</i>	A	CaCO <sub>3</sub>			0.070	0.475	-0.509	-0.033	0.382	0.473	-0.397	-0.154
<b>K2_ANN2009_1</b>	A	L	RotPrecColza	Corg	0.041	0.278	0.484	-0.009	0.218	0.269	0.547	-0.045
K2_ANN2009_2	Corg	CaCO <sub>3</sub>	C/N	pHeau	0.040	0.271	0.508	0.001	0.227	0.281	0.508	0.002
K2_ANN2009_3	C/N	Corg	CaCO <sub>3</sub>	pHeau	0.040	0.272	0.504	-0.001	0.233	0.289	0.480	-0.004

- Le modèle **K2\_ANN2009\_1** présente la meilleur performance pour prédire K2 & Vp
- Variables prises en compte : **A, L, RotPrecColza** et **Corg**
- Variables aisées à renseigner en routine
- Bon « candidat » pour implémentation dans des OAD et des modèles de simulation des flux N dans les sols cultivés, après validation sous cultures



# Conclusion générale

---

## Validation du modèle K2 ANN Valé et al. 2007 :

- Confirmation des performances en sol nu
- Validation sous culture à travailler
- Sensibilité à la variable fréquence de colza dans la rotation

## Elaboration des modèles K2 ANN2009 :

- Bonne performance en sol nu
- Prise en compte plus opérationnelle de la présence d'un colza dans la rotation
- K2\_ANN2009\_1 = bon candidat pour implémentation dans les outils, sous réserve d'une validation sous culture.

# Remerciements

---

**Nous remercions tous les partenaires qui ont mis leurs références expérimentales à disposition pour réaliser cette étude.**



---

**Merci de votre attention**