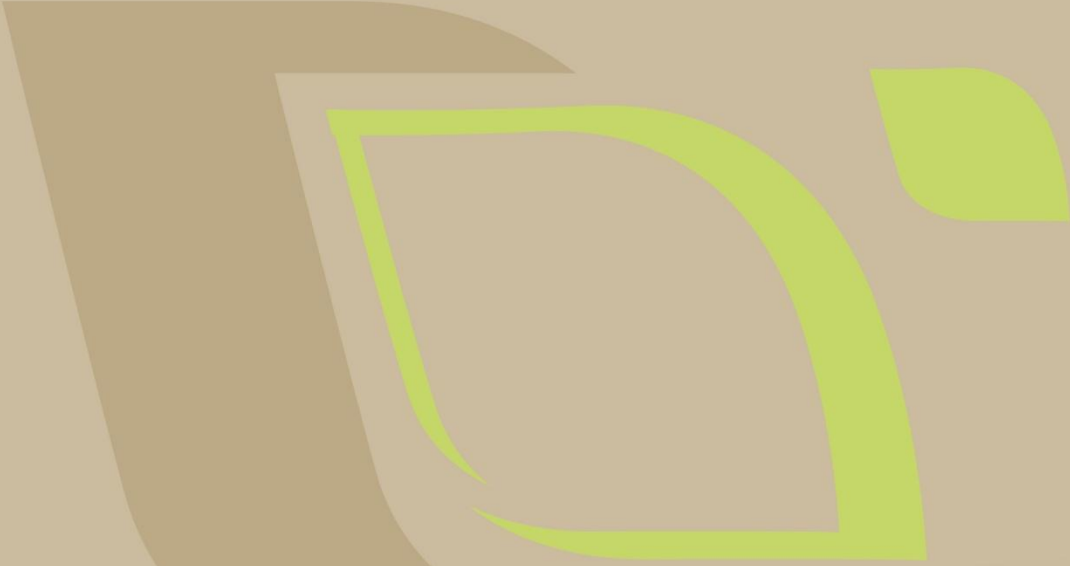


ARVALIS
Institut du végétal



**Modélisation des effets
azote à long terme
induits par des apports
répétés de PRO**



Cette présentation est issue d'une synthèse de résultats d'essais de longue durée réalisée dans le cadre d'un **projet CASDAR**, « **gestion durable des sols avec des produits organiques issus d'élevages** », où ont collaboré **ARVALIS-Institut du Végétal**, **INRA**, **Institut de l'Elevage**, **Chambres d'Agriculture de Bretagne**, **Chambres d'Agriculture de Loire-Atlantique**, **du Cher**, **de la Creuse**, **de la Haute-Vienne** et **de l'Indre**, et d'une analyse de ces mêmes données dans le cadre d'un **projet CASDAR** « **Réseau PRO** » avec le soutien financier du ministère de l'agriculture et de la pêche





Valeur Fertilisante azote des produits résiduaux organiques (PRO)

Les effets longs termes azote d'apports répétés de PRO

Méthode du bilan de masse pour le calcul prévisionnel de la dose d'azote à appliquer sur une culture

Dose N = besoins
- fournitures N sol
- effets directs d'apports et restitutions de MO
- autres apports

Fournitures sol = stock N sol * Km

Km = vitesse de minéralisation

Stock N sol = teneur N * poids de terre fine



Valeur Fertilisante azote des produits résiduels organiques (PRO)

Les effets longs termes azote d'apports répétés de PRO

Méthode du bilan de masse pour le calcul prévisionnel de la dose d'azote à appliquer sur une culture

azote minéralisé sur la période du bilan : Mh (Kg N/ha)

$$Mh = TNorg \times Km \times JN$$

*Tnorg = teneur*profondeur*d.a.*(1-%vol cailloux) = stock d'azote organique du sol*

*Km = Km standard * Fsys = vitesse de minéralisation (KG d'N/t d'N organique/JN)*

JN = nb de jours normalisés pour la minéralisation depuis le RSH jusqu'à la fin de l'absorption par la plante

Effet d'une évolution de la teneur en matières organiques sur la fourniture en azote du sol



méthode du bilan,

Vitesse de minéralisation (kgN/JN/T) = $K_m = K_m \text{ standard} * F_{\text{syst}}$

$$K_{m\text{standard}} = 22750 / [(110+A) * (600+CaCO_3)]$$

$$22750 = 65000 * 0.35$$

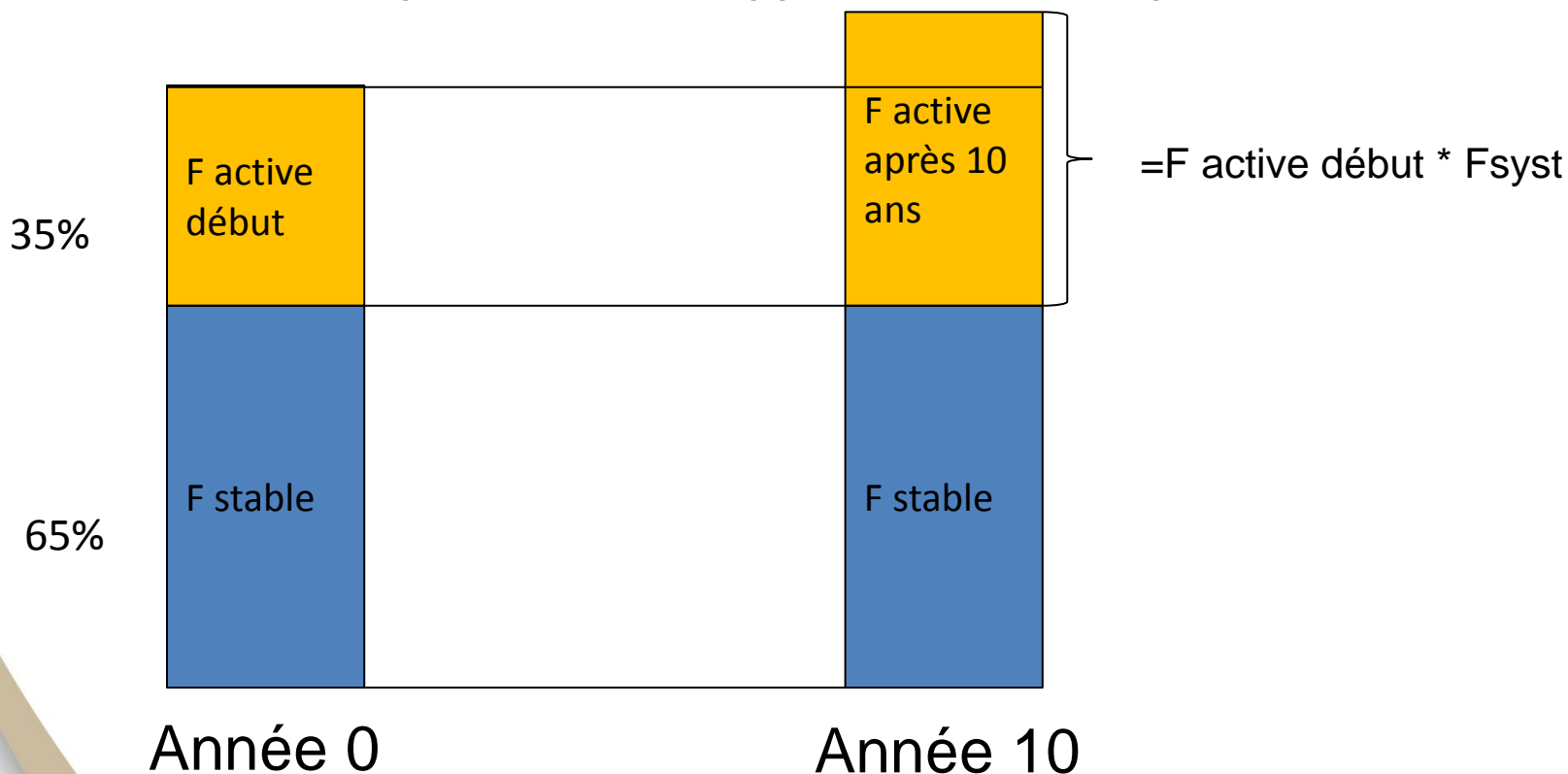
Le calcul de la vitesse de minéralisation suppose que la fraction active du stock d'azote organique du sol représente 35% du stock total d'azote organique

Effet d'une évolution de la teneur en matières organiques sur la fourniture en azote du sol

méthode du bilan,

Les effets longs termes azote d'apports répétés de PRO

Dans le cas d'apports réguliers de PRO pendant 10 ans sur une parcelle sans apport de PRO au paravent



Effet d'une évolution de la teneur en matières organiques sur la fourniture en azote du sol



méthode du bilan,

Vitesse de minéralisation = $K_m = K_m \text{ standard} * F_{\text{syst}}$

$$K_{m\text{standard}} = 22750 / [(110+A) \times (600+CaCO_3)]$$

F_{syst}

Fréquence des apports organiques exogènes et type de produit									
	Jamais	5-10 ans		3-4 ans		1-2 ans		Facteurs multiplicateurs en +	
Résidus de récolte		A	BC	A	BC	A	BC	Retour-prairie	CI
Enlevés-brûlés	0,80	0,95	0,90	1,00	0,95	1,05	1,00	1,1	En cours d'étude
Enfouis 1/2	0,90	1,00	0,95	1,05	1,00	1,10	1,02	1,1	
Enfouis 1/1	1,00	1,05	1,00	1,10	1,02	1,20	1,05	1,1	

Types de produits : A = fumiers et composts (décomposition lente) ; B et C = autres, ainsi que les fumiers de volaille (décomposition rapide). Dans le cas où plusieurs types de produits sont apportés (des A et des BC), alors on privilégie les types A. CI = couverts intermédiaires.

Tableau 2 : Valeurs du facteur système F_{Syst} selon différents systèmes de cultures.



Effet des apports de produits organiques sur les fournitures d'azote par le sol :

Evaluation d'une méthode opérationnelle de calcul.

Louis BRISSON

- Stage réalisé du 2 avril au 28 septembre 2012 à la
- station expérimentale de la Jaillière, ARVALIS – Institut du végétal.
- Encadrement : Robert TROCHARD, Alain BOUTHIER et Brigitte BRUNEL



Mh : minéralisation du stock de N actif

- Par analogie avec le carbone (modèle AMG (Andriulo et al, 1995), le stock d'azote est découpé en deux compartiments : stock de N actif (35%) stock de N stable (65%)
- Le stock de MO stable est invariant (pour les durées considérées dans les modélisations) (Duparque et al, 2007; Saffih-Hdadi & Mary, 2008)
- Seul le stock de MO active minéralise

Stock de N actif

$$Mh = \underbrace{Norga * F_{syst}}_{\%Stock\ N\ actif} * \left(35\% * \frac{65000}{(110 + Argile) * (600 + CaCO_3)} \right) * JN$$

– %Stock N actif = $F_{syst} * 35\%$

– %Stock N actif > 35 → $F_{syst} > 1$

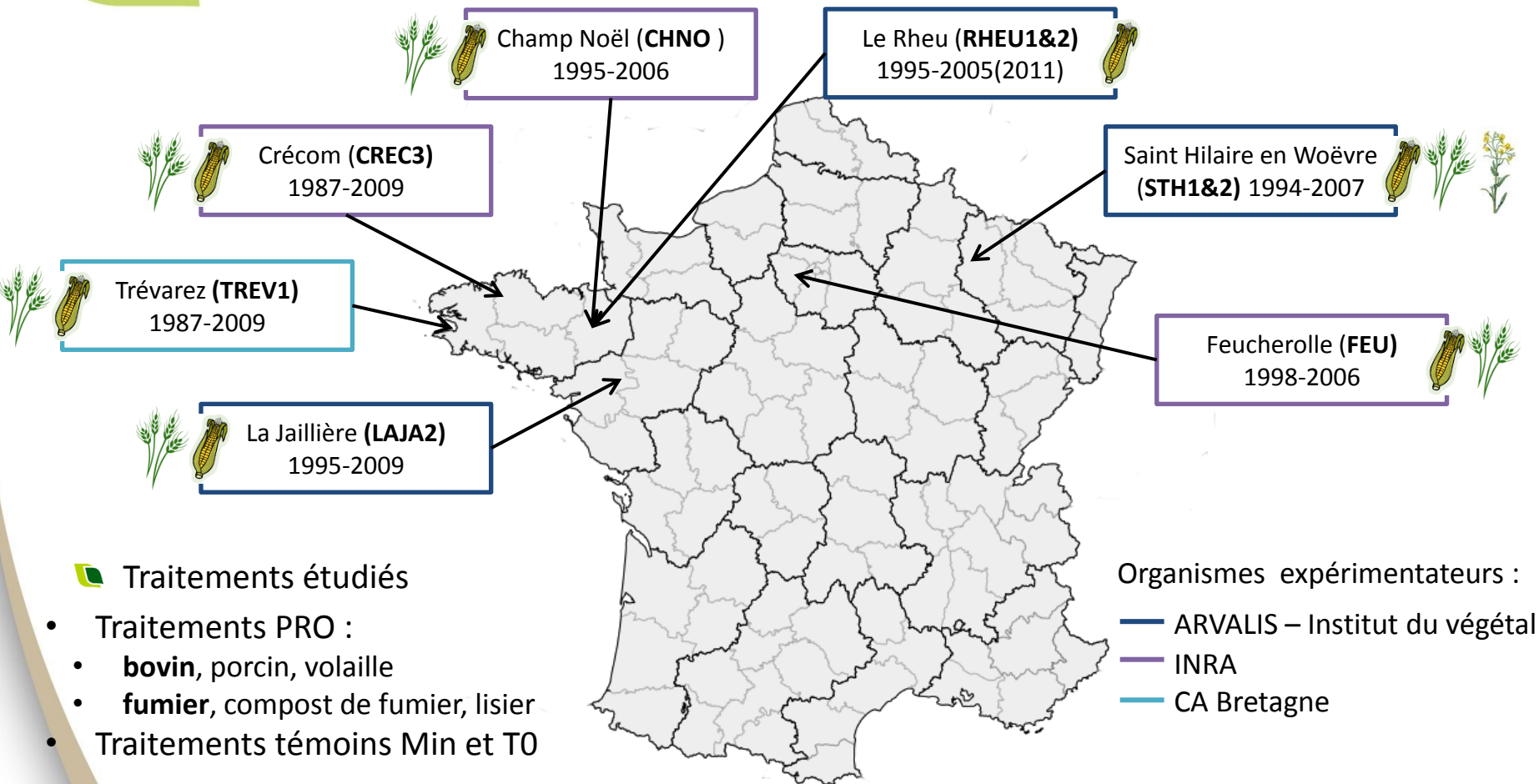
– %Stock N actif = 35 → $F_{syst} = 1$

– %Stock N actif < 35 → $F_{syst} < 1$

$F_{syst} = \%stock\ N\ actif / 35\%$



Les essais



Traitements étudiés

- Traitements PRO :
 - **bovin**, porcine, volaille
 - **fumier**, compost de fumier, lisier
- Traitements témoins Min et T0

Essais de longue durée (10-20 ans), à l'origine mis en place pour étudier les effets azote court terme d'apports de PRO (calculs de CAU, Keq)



Valorisation des données pour l'étude des effets long terme



Modélisation du Fsyst

But : simuler l'évolution temporelle du Fsyst pour confronter les valeurs obtenues avec celles proposées dans la méthode COMIFER

1^{ère} Etape : Calculs préliminaires

- Stock de C et N dans l'horizon 0-25cm
- Carbone restitué chaque année par les résidus de culture
 - Parties aériennes et racinaires
 - Avec mesures de plantes disponibles
 - Méthodes d'estimation d'AMG
- Carbone apporté par les PRO
- ~~• Stockage en profondeur du carbone apporté par les PRO~~



2^{ème} Etape : modélisation AMG

Exemple de l'essai de La Jaillière (LAJA2)

nom essai	parcelle	traitement	Stock stable	stock début mesures T C/ha	simulation évolution C (stock fin année T/ha)													2009 Fin simul	2009 stock fin mesures T C/ha		
					1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008				
LAJA2	79	CFB	17.6	39.4	38.7	38.2	37.8	37.1	36.7	36.0	35.6	35.2	34.8	34.4	33.8	33.2	32.4	31.7	32.1	K1	
LAJA2	91	CFB	17.6	36.8	36.2	35.8	35.6	35.0	34.7	34.2	33.9	33.5	33.3	33.0	32.5	32.0	31.2	30.6	30.5	FB	27%
LAJA2	123	CFB	17.6	33.8	33.4	33.2	33.1	32.7	32.5	32.1	31.8	31.6	31.4	31.2	30.8	30.4	29.7	29.2	28.8	FP	31%
LAJA2	73	CFP	17.6	40.4	39.6	39.2	38.9	38.5	38.3	37.6	37.0	36.6	36.4	35.9	35.3	34.6	33.7	33.0	31.0	Fv	0%
LAJA2	88	CFP	17.6	33.1	32.7	32.7	32.7	32.6	32.7	32.4	32.1	31.9	32.0	31.8	31.3	30.8	30.1	29.6	32.1	CFB	13%
LAJA2	117	CFP	17.6	35.1	34.6	34.4	34.4	34.1	34.2	33.8	33.4	33.1	33.0	32.8	32.3	31.7	31.0	30.4	29.8	CFP	23%
LAJA2	81	CFV	17.6	37.5	36.9	36.3	35.6	35.0	34.4	33.7	33.1	32.6	32.1	31.6	31.2	30.7	30.0	29.5	28.7	CFV	0%
LAJA2	102	CFV	17.6	35.8	35.3	34.8	34.2	33.6	33.1	32.5	31.9	31.5	31.0	30.7	30.3	29.9	29.2	28.7	27.1	stock C stable	17.6346
LAJA2	120	CFV	17.6	35.3	34.8	34.3	33.8	33.3	32.8	32.2	31.6	31.2	30.7	30.3	30.0	29.6	28.9	28.5	29.3	RMSE+Biais	1.1856
LAJA2	67	FB	17.6	32.9	32.5	32.4	33.3	33.0	33.4	33.1	33.5	33.4	33.7	33.6	33.0	32.5	31.7	31.1	30.7		
LAJA2	93	FB	17.6	37.5	36.9	36.6	37.2	36.7	36.9	36.4	36.6	36.3	36.5	36.2	35.5	34.8	33.9	33.2	33.6		
LAJA2	109	FB	17.6	37.0	36.4	36.1	36.8	36.3	36.5	36.0	36.2	36.0	36.2	35.9	35.2	34.5	33.6	32.9	32.7		
LAJA2	76	FP	17.6	40.2	39.4	39.4	39.2	38.8	38.9	38.4	37.9	37.6	37.5	37.0	36.3	35.6	34.6	33.9	33.9		
LAJA2	96	FP	17.6	39.7	39.0	39.0	38.8	38.4	38.6	38.2	37.7	37.3	37.2	36.8	36.2	35.4	34.5	33.7	32.9		
LAJA2	114	FP	17.6	34.6	34.1	34.4	34.5	34.3	34.6	34.4	34.2	34.0	34.1	33.8	33.3	32.7	31.9	31.3	31.9		
LAJA2	70	FV	17.6	40.2	39.4	38.7	37.9	37.2	36.5	35.7	35.0	34.4	33.8	33.4	32.8	32.3	31.5	31.0	30.2		
LAJA2	99	FV	17.6	39.2	38.5	37.8	37.1	36.4	35.8	35.1	34.4	33.9	33.3	32.8	32.3	31.8	31.0	30.5	29.9		
LAJA2	112	FV	17.6	36.3	35.7	35.2	34.6	34.0	33.5	32.9	32.3	31.9	31.4	31.0	30.6	30.2	29.5	29.1	29.6		
LAJA2	74	M0 ble	17.6	40.3	39.5	38.8	38.0	37.4	36.7	36.1	35.3	34.8	34.2	33.8	33.2	32.6	31.8	31.2	29.8		
LAJA2	89	M0 ble	17.6	34.9	34.5	34.0	33.4	33.1	32.6	32.2	31.7	31.4	30.9	30.7	30.2	29.8	29.2	28.7	30.8		
LAJA2	124	M0 ble	17.6	33.8	33.4	33.0	32.5	32.2	31.7	31.4	30.9	30.6	30.1	29.9	29.6	29.2	28.5	28.1	27.6		
LAJA2	64	M0 mais	17.6	32.9	32.5	32.2	31.7	31.2	30.9	30.3	29.9	29.4	29.1	28.7	28.4	28.1	27.5	27.1	29.8		
LAJA2	100	M0 mais	17.6	37.5	36.9	36.3	35.6	34.9	34.3	33.6	32.9	32.4	31.9	31.3	30.9	30.4	29.7	29.2	30.8		
LAJA2	106	M0 mais	17.6	37.0	36.4	35.9	35.2	34.5	34.0	33.3	32.7	32.1	31.7	31.2	30.7	30.2	29.6	29.1	27.6		
LAJA2	80	Min	17.6	37.2	36.6	36.1	35.4	34.9	34.4	33.9	33.3	32.9	32.3	32.0	31.6	31.1	30.3	29.8	29.0		
LAJA2	92	Min	17.6	38.5	37.8	37.2	36.4	35.9	35.3	34.8	34.1	33.7	33.1	32.8	32.2	31.7	30.9	30.4	29.4		
LAJA2	113	Min	17.6	36.5	36.0	35.4	34.8	34.3	33.8	33.4	32.7	32.4	31.9	31.6	31.1	30.6	29.9	29.4	29.9		

Paramètres estimés par le solveur

Critère de minimisation du

Indicateurs de la qualité de l'ajustement du

Paramètres du modèle obtenus grâce à une analyse de sol ou un calcul



3^{ème} Etape : Modélisation du F_{syst}

Transformation du stock actif de C en stock d'N
en utilisant le C/N de la fraction active

En prenant pour hypothèse que ce C/N est égal au C/N de la MO
minéralisée en incubation

C/N de la fraction active = $\frac{\text{C minéralisé en incubation pendant X jours de labo}}{\text{N minéralisé en incubation pendant X jours de labo}}$

Stock actif N = (stock actif C) / (C/N fraction active)

stock total N = mesure en fin d'essai

F_{syst} = (Stock actif N / stock total N) / 0.35

F_{syst} = %stock N actif / 35%



Résultats



RESULTATS

Modélisation AMG

	LAJA2	CHNO	CREC3	STH1	STH2	RHEU1	RHEU2	TREV1	FEU
Stock C début (tC/ha)	36.78	35.77	51.68	37.48	37.48	31.68	31.68	107.90	39.17
RMSE (tC/ha)	1.19	0.58	1.72	2.25	3.12	2.19	2.31	1.52	2.7
Biais (tC/ha)	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01

Qualité d'ajustement du modèle :

-  Biais très faibles
-  RMSE représente entre 2 et 8% du stock total de carbone



RESULTATS

Coefficients isohumiques des PRO

	Laja2	Chno	Crec3	Sth1	Sth2	Rheu1	Rheu2	Trev1	Feu	Moy	AMG
K ₁ FB	27%	67%	32%	40%	53%	4%		28%	53%	39%	42%
K ₁ FP	31%						18%	52%		34%	40%
K ₁ FV	0%									0%	15%
K ₁ CFB	13%	86%				25%				19%	-
K ₁ CFP	23%						26%			25%	-
K ₁ CFV	0%									0%	-
K ₁ LP		53%									15%
Stock stable	17.63	21.46	45.37	27.97	16.94	24.59	21.53	59.62	15.17		
RMSE	1.19	0.58	1.72	2.25	3.12	2.19	2.31	1.52	2.7		
%	4%	2%	3%	5%	8%	7%	8%	2%	8%		
Biais	0	-0.01	0	0	-0.01	-0.01	-0.01	0	-0.01		



RESULTATS

C/N de la fraction active

	CHNO	CREC3	FEU	LAJA2	TREV1	RHEU1	RHEU2	
	2006	2009	2009	2009	2009	2006	2006	2009
Min	14.3	12.6	12.1	13.1	9.6	12.6	12.4	12.1
CB1						13		
CB2						13.2		
CB3						13.5		
CFB	13.2			14.4				
CP1							12.4	11.2
CP2							15.0*	
CP3							13.6	
FB	13.5		10.9*		10.3			
FB1		12.1						
FB2		12.6						
FP					10.6		13.2	
LP	13.7							
Moyenne	13.7	12.4	11.5	13.7	10.2	13	13.3	11.6



RESULTATS

Détail des calculs pour l'obtention du stock actif N

			Stock C stable	Stock C total	Stock actif (T/ha)					Stock N total	Stock N stable	C/N stock stable
Parcelle	PRO				C	%	C/N	N	%			
LAJA2	79	CFB	17.63	32.06	14.42	45%	13.73	1.05	27%	3.94	2.89	6.1
LAJA2	91	CFB	17.63	30.55	12.92	42%	13.73	0.94	24%	3.97	3.02	5.83
LAJA2	123	CFB	17.63	28.82	11.19	39%	13.73	0.81	21%	3.88	3.07	5.75

Résultat solver

Mesures fin essai

incubation

Mesures fin essai



RESULTATS

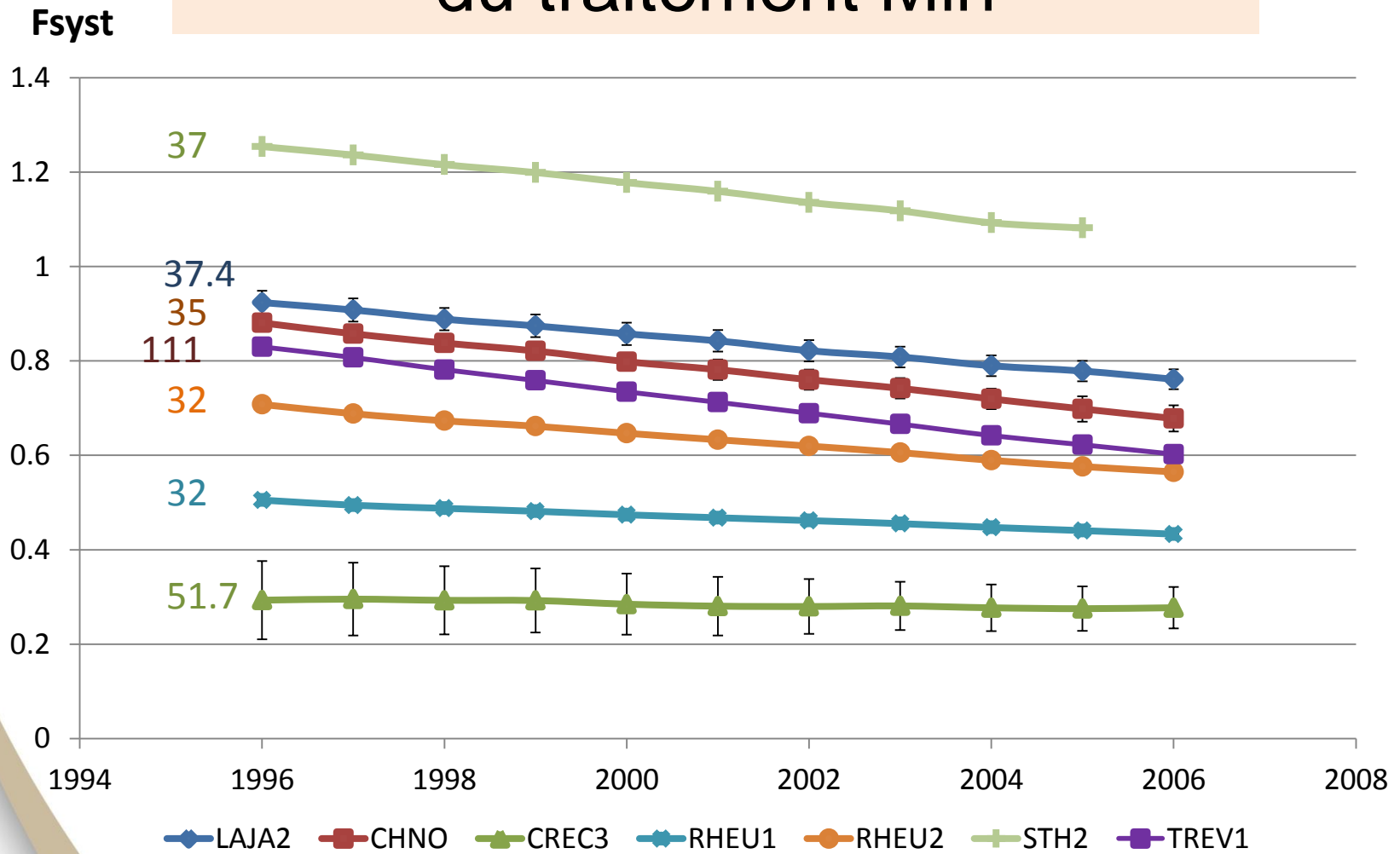
Tailles des fractions stables C et N dans les essais traités

	LAJA2	CHNO	CREC3	STH1	STH2	RHEU1	RHEU2	TREV1	FEU
SsC (TC/ha)	17.63	21.46	45.37	27.97	16.94	24.59	21.53	59.62	15.17
SsN (TN/ha)	2.8	2.73	4.17	3.19	2.15	2.94	2.57	6.58	1.79
C/N stable	6.3	7.86	10.88	8.78	7.9	8.37	8.39	9.06	8.46
%C stable début	48%	60%	88%	75%	45%	78%	68%	55%	43%
%N stable début	62%	65%	-	-	-	-	-	-	-



RESULTATS

Evolution temporelle du F_{syst} du traitement Min



Valeurs devant les courbes = stock total C en T/ha



RESULTATS

Fsys des traitements Min et FB

Traitement Min

- Gestion de la matière organique :
 - Résidus de culture enlevés
 - Aucun apport de PRO
 - Au minimum 10 ans

Fsyst COMIFER = 0.8

Traitement FB

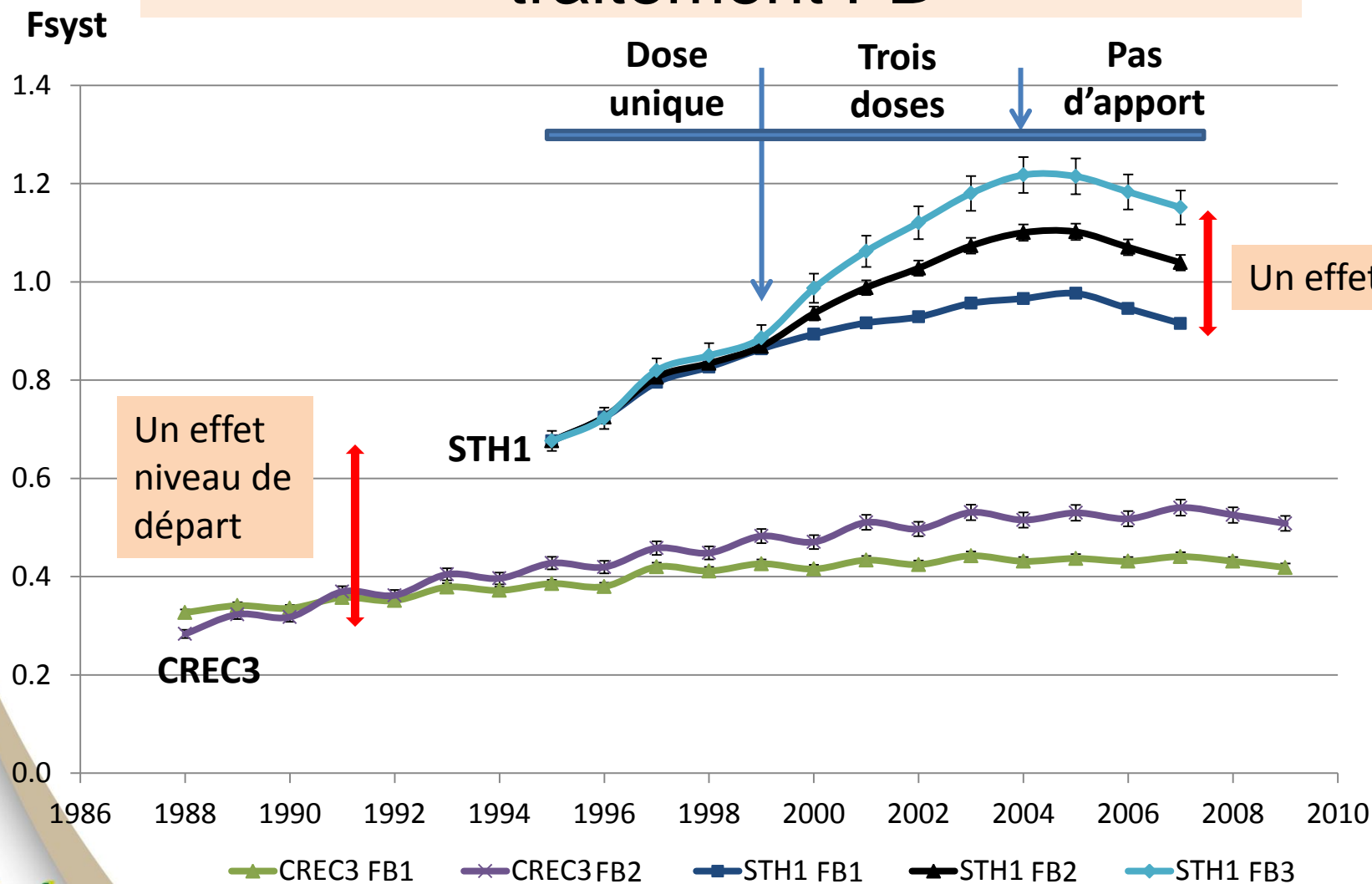
- Gestion de la matière organique :
 - Résidus de culture enlevés
 - Apport de PRO de type A
 - Fréquence d'apport : tous les 1-2 ans
 - Au minimum 10 ans

Fsyst COMIFER = 1.05



RESULTATS

Evolution temporelle du F_{syst} du traitement FB



Un effet dose

Un effet niveau de départ

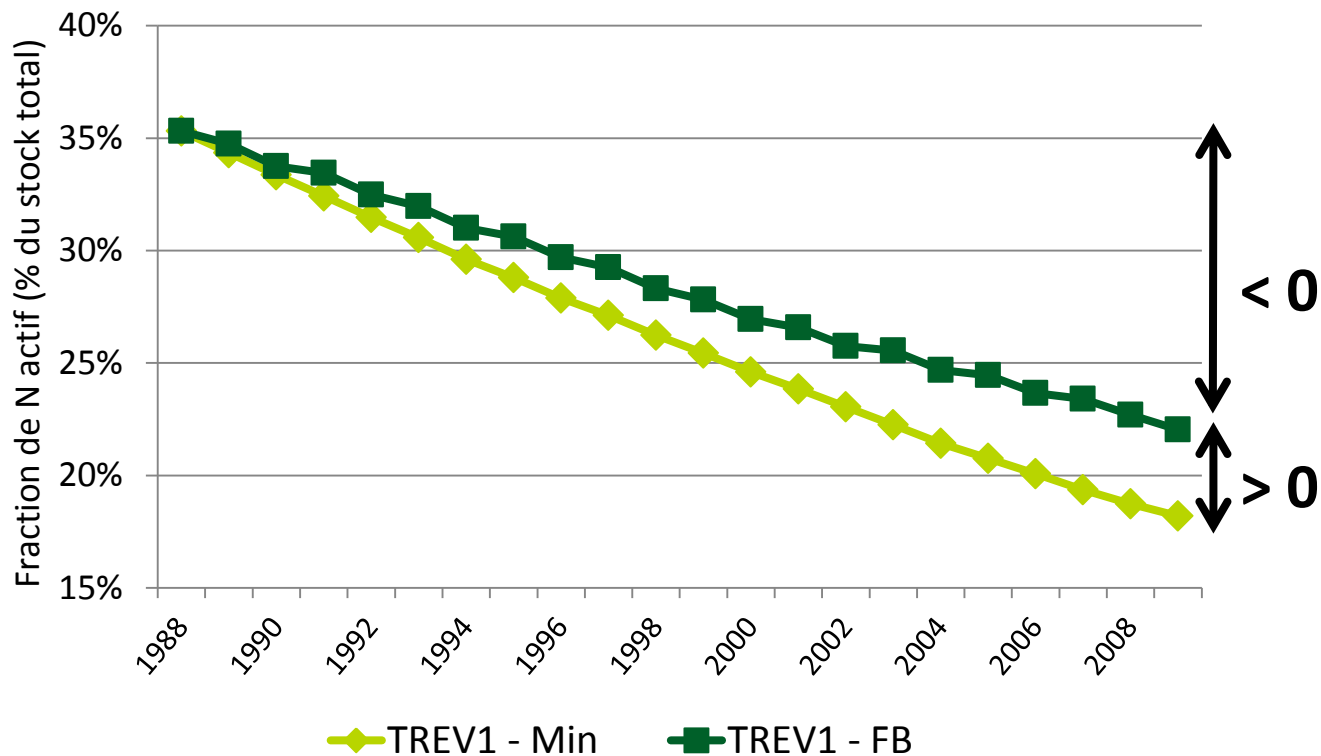
STH1

CREC3



RESULTATS

Fsyst et apports de PRO ?



Fsyst pas toujours positif même avec apport de PRO



RESULTATS

Fsyst calculé fin essai

Essai (durée de simulation, nombre)	Traitement	Fsyst fin d'essai	Δ Fsyst PRO - MIN	Δ Fsyst COMIFER
LAJA2 (14 ans, 9 apports de PRO)	CFB	0.72	0.03	0.25
	CFP	0.74	0.04	0.25
	CFV	0.65	-0.04	0.2
	FB	0.79	0.1	0.25
	FP	0.81	0.11	0.25
	FV	0.7	0.01	0.2
	Min	0.69		
CHNO (11 ans, 7 apports de PRO)	LP	0.83	0.16	0.25
	CFB	1.18	0.5	0.25
	FB	1.13	0.46	0.25
	Min	0.68		
CREC3 (22ans, 11apports de PRO)	FB1	0.42	0.15	0.25
	FB2	0.51	0.24	0.25
	Min	0.27		
FEU (8ans, 6 apports de PRO)	FB1	1.45	0.22	0.25
	FB2	1.43	0.2	0.25
	Min	1.23		



RESULTATS

Fsys calculé fin essai

Essai (durée de simulation, nombre)	Traitement	Fsys fin d'essai	Δ Fsys PRO - MIN	Δ Fsys COMIFER
RHEU1 (11ans, 11 apports de PRO)	CFB1	0.55	0.18	0.25
	CFB2	0.67	0.3	0.25
	CFB3	0.64	0.27	0.25
	FB	0.53	0.16	0.25
	Min	0.37		
RHEU2 (10 ans, 10 apports de PRO)	CFP1	0.71	0.24	0.25
	CFP2	0.84	0.37	0.25
	CFP3	0.79	0.31	0.25
	FP	0.75	0.28	0.25
	Min	0.47		
STH1 (13 ans, 10 apports de PRO)	FB1	0.92	0.3	0.25
	FB2	1.04	0.43	0.25
	FB3	1.15	0.54	0.25
	Min	0.61		
STH2 (13 ans, 7 apports de PRO)	FB1	1.31	0.23	0.25
	FB2	1.35	0.27	0.25
	FB3	1.52	0.44	0.25
	Min	1.08		
TREV1 (22ans, 11 apports de PRO)	FB	0.67	0.09	0.25
	FP	0.7	0.12	0.25
	Min	0.58		



Conclusions mémoire 1/4

$$F_{\text{syst}} = \frac{\% \text{stock N actif}}{35\%}$$

La correction du stock actif par le facteur F_{syst} illustre la vision conceptuelle de l'impact du régime de restitutions organiques (résidus de cultures, PRO) sur le stock actif lorsque le bilan humique de la parcelle est à l'équilibre initialement.

Cette correction repose sur l'hypothèse d'un stock actif d'N égal à 35% du stock total lorsque les résidus de cultures sont restitués au sol et qu'il n'y a pas d'apport de PRO



Conclusions mémoire 2/4

$$F_{\text{syst}} = \% \text{stock N actif} / 35\%$$

Le stock actif n'est pas toujours à l'équilibre

Le stock actif n'est pas systématiquement égal à 35% du stock total d'azote lorsque les résidus de cultures sont restituées et sans apport de PRO



Conclusions 3/4

$$F_{\text{syst}} = \% \text{stock N actif} / 35\%$$

Le stock actif à un moment donné, est lié:

à un bilan humique ancien

anciens retournements de prairies
Importance des restitutions

au bilan humique récent

restitutions cultures (gestion des résidus)
apports PRO (type, doses)

**Son évolution est liée a l'écart entre le bilan humique ancien
et le bilan humique récent**



Conclusions 4/4

Piste à explorer

Calcul du stock actif

À partir d'essais de longue durée et des quantités d'azote minéralisé sous sol nu durant 1 an au cours de la deuxième année suivant l'arrêt des apports de PRO.



Piste à explorer

Calcul du stock actif

$$\text{Stock actif (T N/ha)} = V_p \text{ sol nu} / V_p \text{ COMIFER}$$

Vp sol nu (kg de N minéralisé par jour normalisé) = Vp calculée avec Lixim dans les sols nus suivis durant 1 année après 1 ou 2 cultures sans apport de PRO dans des parcelles ayant reçu ou non des PRO pendant 10 à 20 ans

Vp Comifer (Kg de N minéralisé par jour normalisé et par tonne de stock N actif)
= Km standard/ 0.35

Vp = vitesse de minéralisation



Piste à explorer

2 jeux de données

Premier jeu de données CASDAR GDS avec PRO

Essais avec enregistrement des rendements et restitutions pendant 10 à 20ans:
Crecom maïs fourrage/blé paille enlevée
La Jaillière maïs fourrage/blé paille enlevée
Le Rheu maïs fourrage
St Hilaire colza/blé paille enlevée
St Hilaire maïs fourrage/blé paille enlevée
Trévarez maïs fourrage/blé paille enlevée

Deuxième jeu de données Synthèse INRA ARVALIS Tony Paumard

Suivis de sol nu pour connaître les cinétiques de minéralisation de l'azote organique des PRO. Historiques avant essais peu connus (peu de rendement rotation des 3 années précédant le sol nu dans le meilleurs des cas)

20 essais répartis en nord France

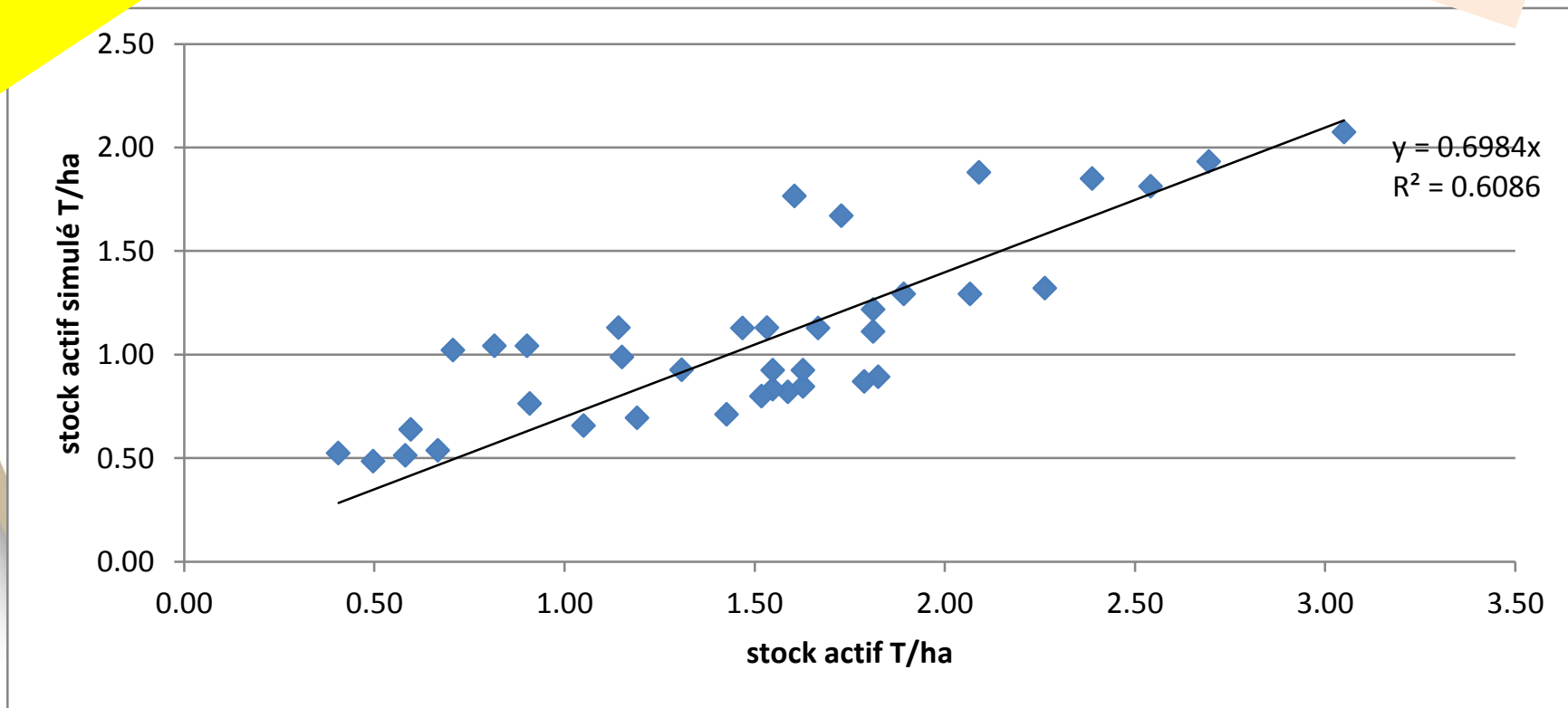


Piste à explorer

Stock actif calculé en prenant en compte le stock N 0-25 cm et les restitutions par les cultures

Restitutions moyennes annuelles au cours des 10 dernières années

Premier jeu de données





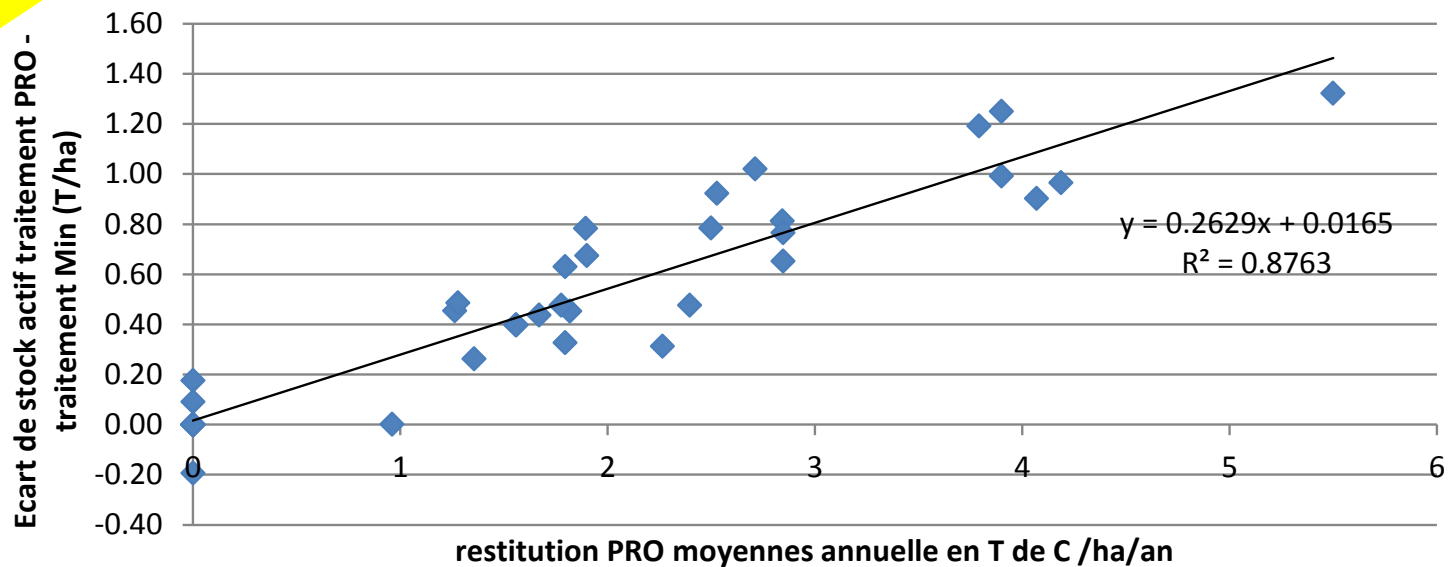
Piste à explorer

Relation écart de stock actif (PRO – témoin)
restitution C PRO

Restitutions moyennes
annuelles au cours des 10
dernières années

Premier jeu de données

Effet des apports de PRO sur le stock actif



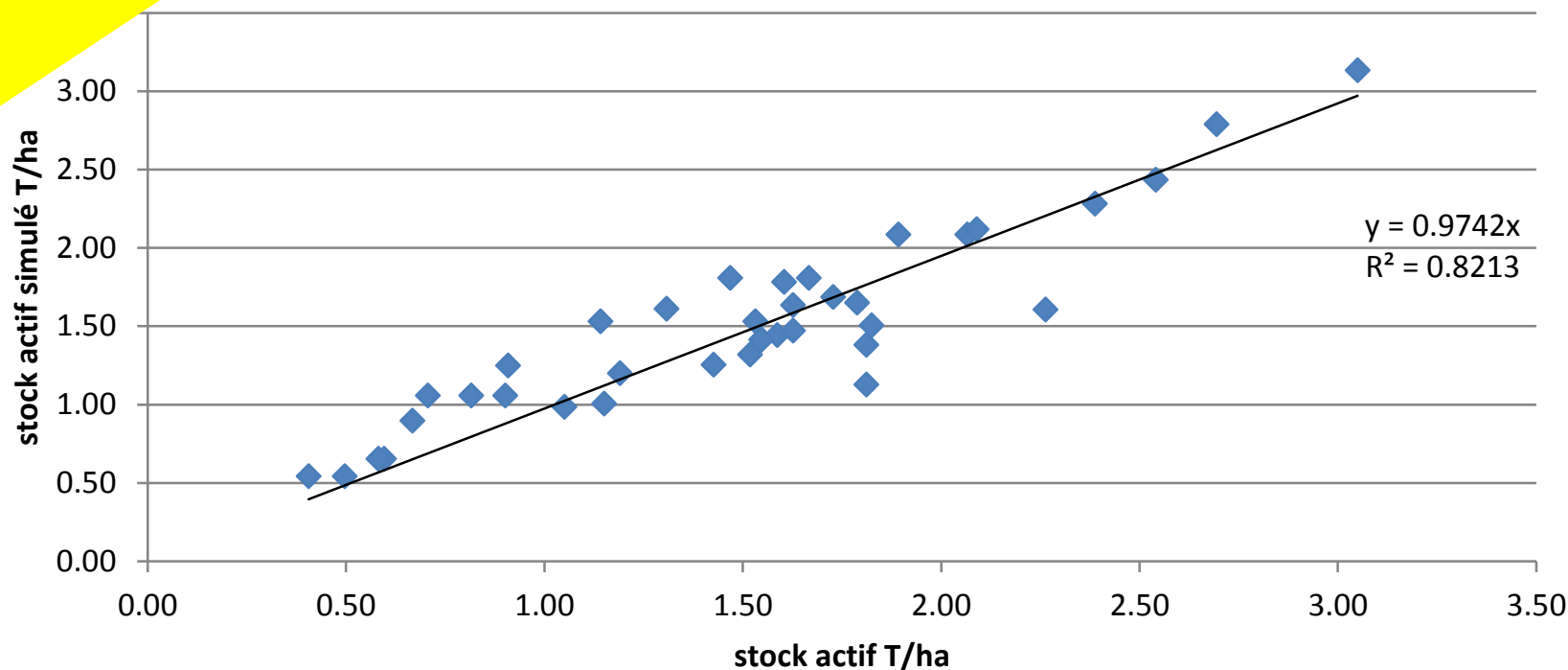


Piste à explorer

Stock actif calculé en prenant en compte le stock 0-25 cm , les restitutions par les cultures et les restitutions par les PRO

Restitutions moyennes annuelles au cours des 10 dernières années

Premier jeu de données



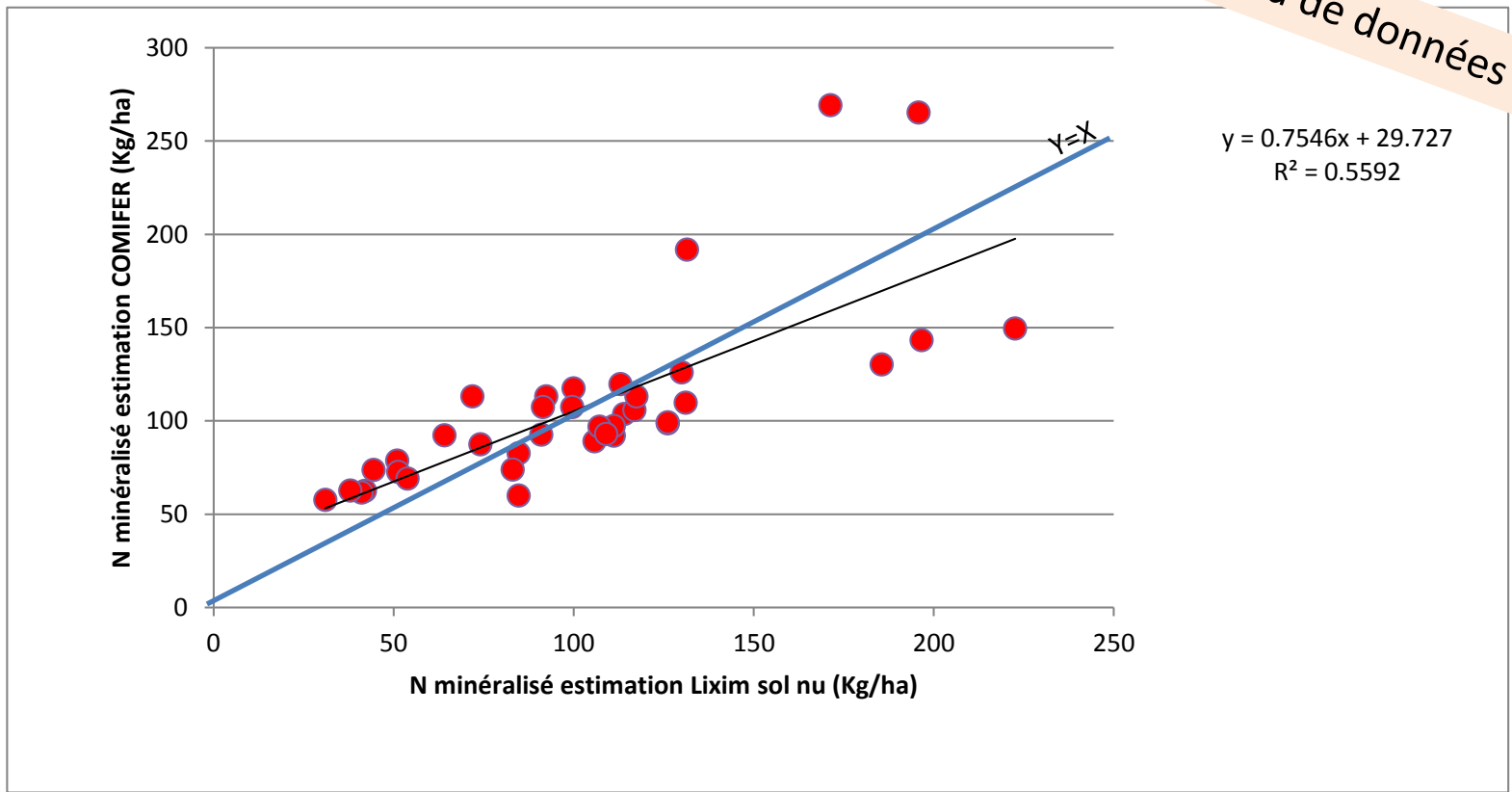


Piste à explorer

Méthode actuelle de calcul COMIFER

Résultats

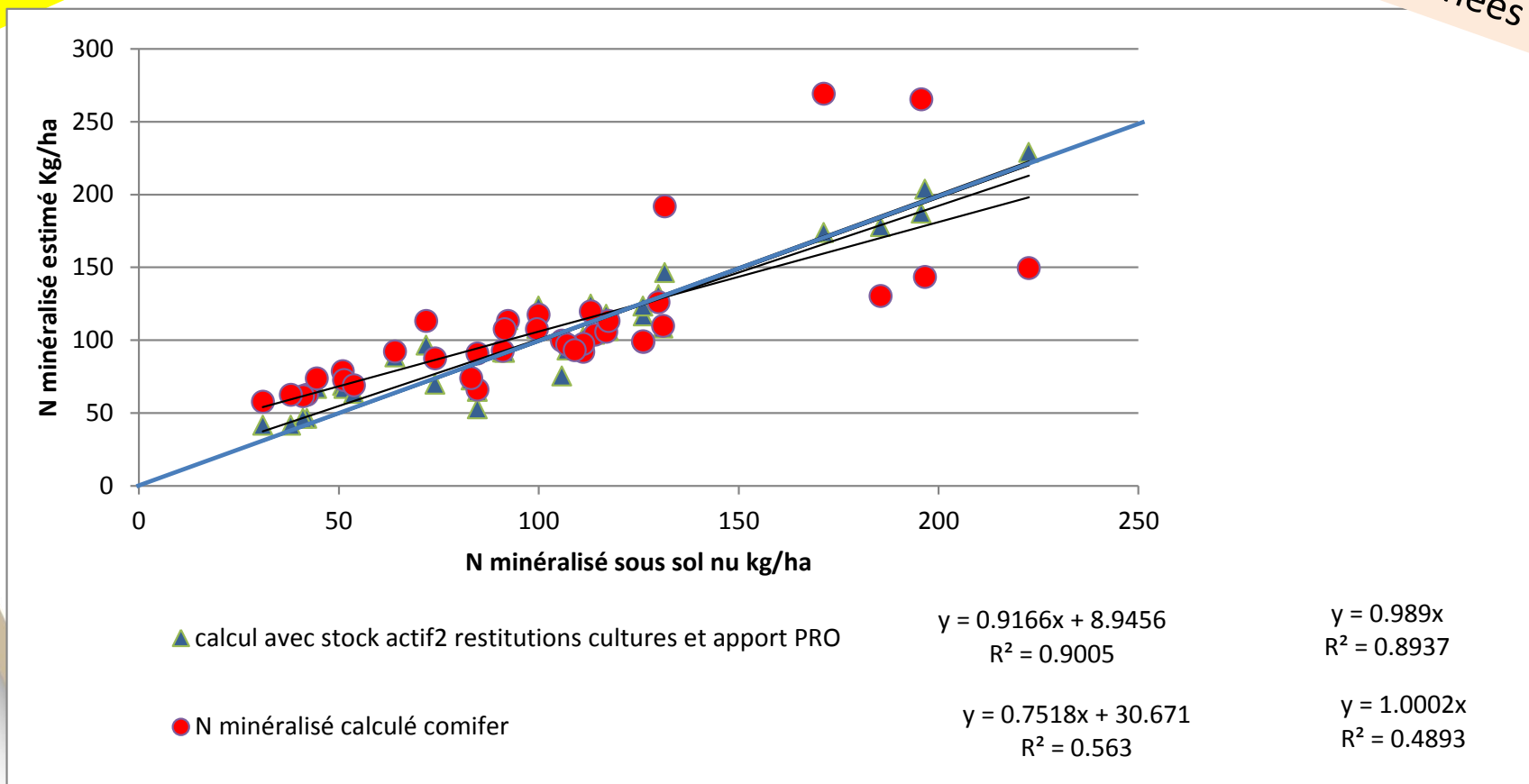
Premier jeu de données



Piste à explorer

Résultats

Premier jeu de données



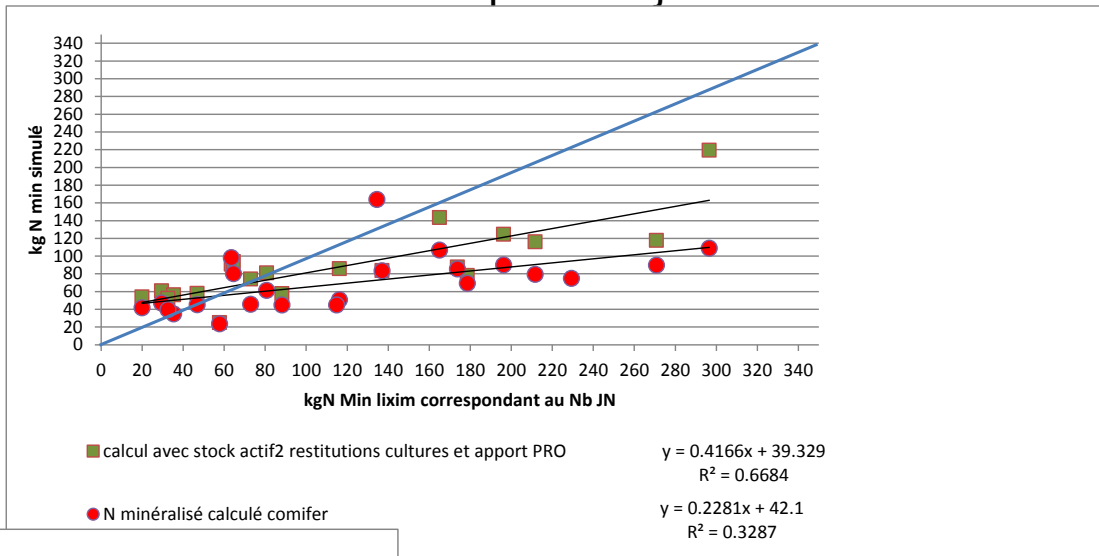


Piste à explorer

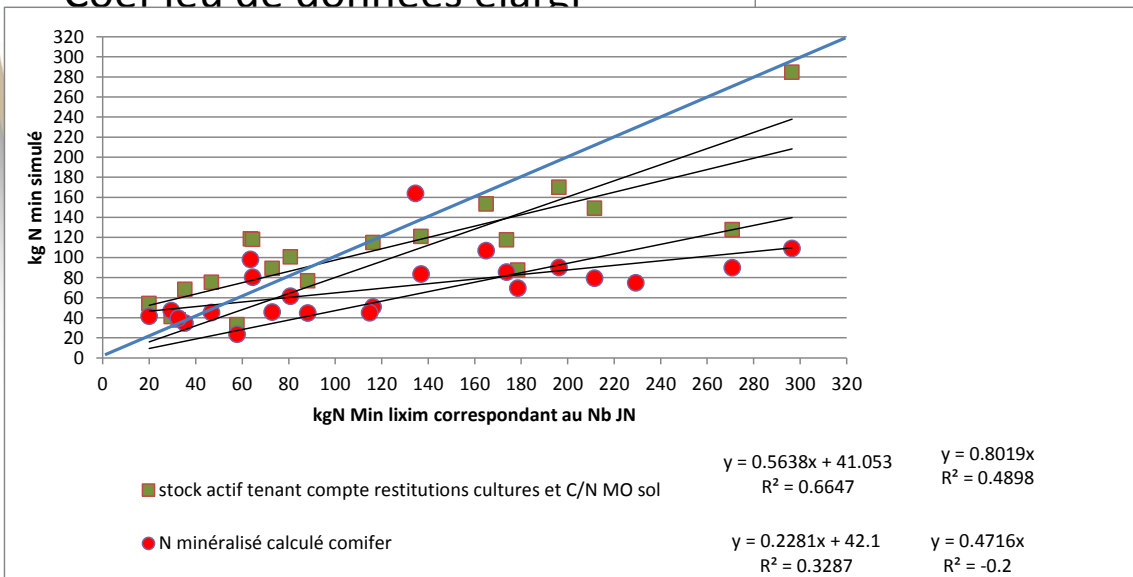
Résultats

Deuxième jeu de données

Coef premier jeu de données



Coef jeu de données élargi



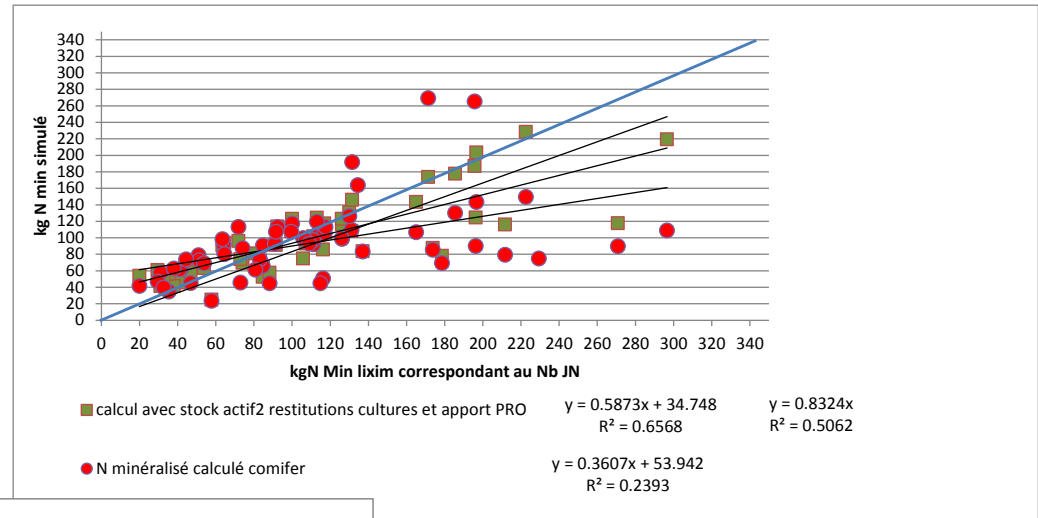


Piste à explorer

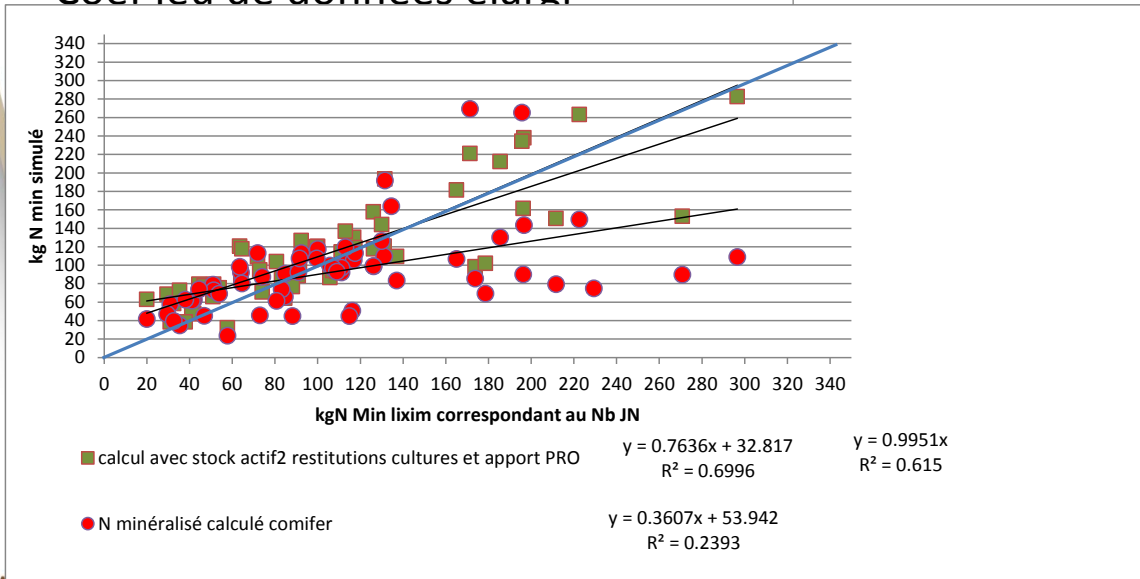
Résultats

Ensemble des 2 Jeux de données

Coef jeu de données de base



Coef jeu de données élargi





Piste à explorer

Résultat obtenu avec le jeu de données actuel

$$\begin{aligned} \text{Stock actif N} = & (0.2976 * \text{stock N 0-25}) \\ & + (0.7137 * \text{Restit Res cult}) - 1.1697) \\ & + (0.263 * \text{RestitPRO} + 0.017) \end{aligned}$$

Restit Res cult = restitution moyenne annuelle de C par les parties aériennes et racinaires (0 – 25 cm) des cultures au cours des 10 années précédentes (T/ha)

RestitPRO= restitution moyenne annuelle de C par les PRO au cours des 10 années précédentes (T/ha)



Piste à explorer

perspectives

Élargir le jeu de données

Éventuellement affecter des K1 aux restitutions racinaires, aériennes et PRO

Utiliser le modèle de calcul de minéralisation AMG?