



Effets des produits résiduaux organiques sur le statut acido- basique du sol

A. Bouthier (1), P. Cambier (2), B. Félix-Faure (3), S. Houot (2)

(1) ARVALIS Institut du végétal

(2) UMR INRA – AgroParisTech ECOSYS

(3) Laboratoire GALYS

Un effet des PRO le plus souvent alcalinisant

- Constat basé sur résultats expérimentaux tant en France qu'à l'étranger
 - ➔ Substitution possible d'une partie des apports d'amendements basiques par les apports de PRO
- Mais pas de modèle d'estimation d'une valeur neutralisante (VN) des PRO
- Test d'incubation au laboratoire : coûteux et non référencé au champ.

Tester la faisabilité de modèles de prédiction de la VN des PRO

- **Modèles de prédiction basés sur :**
 - Notions de chimie des sols (A. Turpin)
 - Bilan de protons à l'échelle du système sol-plante (J-L. Julien)
- **Évaluation sur la base de résultats expérimentaux :**
 - longue durée (≥ 10 ans)
 - plusieurs PRO et un témoin "minéral" ou sans apports
 - disposant de mesures de :
 - ❖ composition des PRO épandus
 - ❖ analyses initiales et finales : C et N organiques, pH du sol
 - ❖ composition des récoltes

Plan de l'exposé

- Présentation des notions de chimie des sols à la base des modèles testés
- Tour d'horizon d'essais de longue durée
- Résultats de l'évaluation des modèles sur 2 essais de longue durée :
 - QualiAgro (INRA)
 - La Jaillièrè (ARVALIS)
- Discussion et conclusions

Présentation des notions de chimie des sols à la base des modèles testés

⇒ Calcul de l'effet potentiel d'un PRO sur le statut acido-basique du sol.

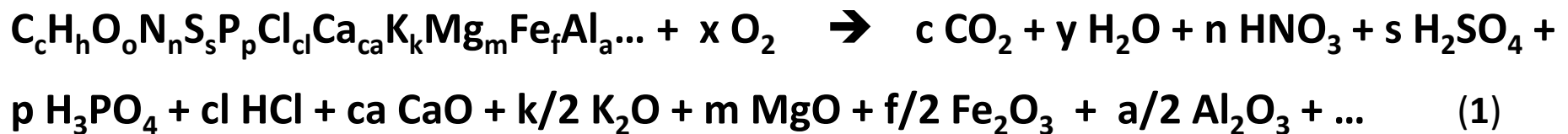
■ 1^{ère} démarche :

Effet potentiel des PRO sur le sol en ne considérant que le **système « PRO et sol »** (sans plante)

→ **1^{ère} Hypothèse de calcul "simplificatrice"** :

Tout est minéralisé en conditions aérobies, donc oxydé.

Ce qui peut s'écrire avec la **réaction (1) : minéralisation/solubilisation totale aérobie** :



Les produits obtenus après minéralisation totale s'associent de la manière suivante :

A. Turpin

- Les cations à O^{2-} → **CaO**
- Les anions à H^+ → **HNO₃**

Présentation des notions de chimie des sols à la base des modèles testés

→ 2^{ème} hypothèse de calcul "simplificatrice" :

- Les produits restent dans le sol amendé - sauf CO_2 ↑
- HNO_3 se dissocie totalement au pH du sol et donne 1 proton
- H_2SO_4 et H_3PO_4 se dissocient également
 - ↳ Mais le nombre de protons engendrés varie selon le pH
- Pour les sols de pH eau > 5,5 (transformation du phosphore en phosphate de calcium)
 - 1 H_2SO_4 donne → 2 H^+
 - 1 H_3PO_4 donne → 2,5 H^+
- CaO , MgO , K_2O , Na_2O : leur dissolution complète produit 2 OH^- ⇔ neutralise 2 protons

1 mole de Ca ou de Mg
2 moles de K, ou 2 moles de Na } correspondent à [→ en valeur neutralisante, 1 mole de CaO
→ soit 0,0561 kg CaO

- Fe et Al : cités pour mémoire dans l'équation (1)

↳ En milieux à pH > 5,5 → les oxydes formés sont insolubles → pas d'influence sur le SAB

Présentation des notions de chimie des sols à la base des modèles testés

- **Dans l'hypothèse 2** : → pas de volatilisation de NH_3 , ni H_2S
→ pas de dénitrification, ni désulfatation
↳ 2 phénomènes qui s'opposent :
- Le 1^{er} génère des H^+
- Le 2nd consomme des H^+

■ 1^{er} mode de calcul : Minéralisation **totale**

- Connaissant la composition chimique du PRO
- En appliquant les 2 hypothèses précédentes
- Calcul possible de l'effet potentiel d'un PRO sur le SAB du sol.

■ 2^{ème} mode de calcul : Minéralisation **partielle**

→ Adaptation du calcul :

- Une partie seulement de la Matière Organique (MO) du PRO est minéralisée
- Le reste est stocké dans le sol → Calcul d'un coefficient de minéralisation de la MO du PRO

Estimation de la proportion de MO du PRO stockée :

- Soit estimation avec ISMO * → composition du PRO + fraction Carbone org. minéralisée à 3j
- Soit mesurée au champ (expérimentation : stock de Carbone Org. initial et fin d'essai)

* *indice de stabilité des matières organiques*

Présentation des notions de chimie des sols à la base des modèles testés

■ Suite : 2^{ème} mode de calcul : Minéralisation **partielle**

➔ Application du même coef. de minéralisation du C org. à l'ensemble des éléments du PRO

Les PRO contiennent une fraction minérale variable :

- **K** et **Mg** → très rapidement solubilisés

- **Ca** →

- Calcium provenant de CaCO_3
- Calcium contenu dans les molécules organiques (parois celluloseuses des végétaux ...)
 - ↳ Equation (1) ne les différencie pas
 - Problématique seulement si CaCO_3 était à dissolution très lente
- Calcium des minéraux insolubles (feldspaths) → théoriquement à soustraire du calcul VN

- **Phosphore (P)** : sous formes minérale et organique

→ P minéral : largement dominant

→ P organique : 7 à 36 % pour les PRO utilisés dans les 2 essais longue durée

→ Minéralisation du P organique difficile à estimer

↳ Un seul coefficient de minéralisation adopté → **coef. de minéralisation du C org.**

Hypothèse que : $\left[\begin{array}{c} \text{C} \\ \text{N} \\ \text{S} \end{array} \right]$ org. des PRO sont minéralisés et stockés dans les mêmes proportions

Présentation des notions de chimie des sols à la base des modèles testés

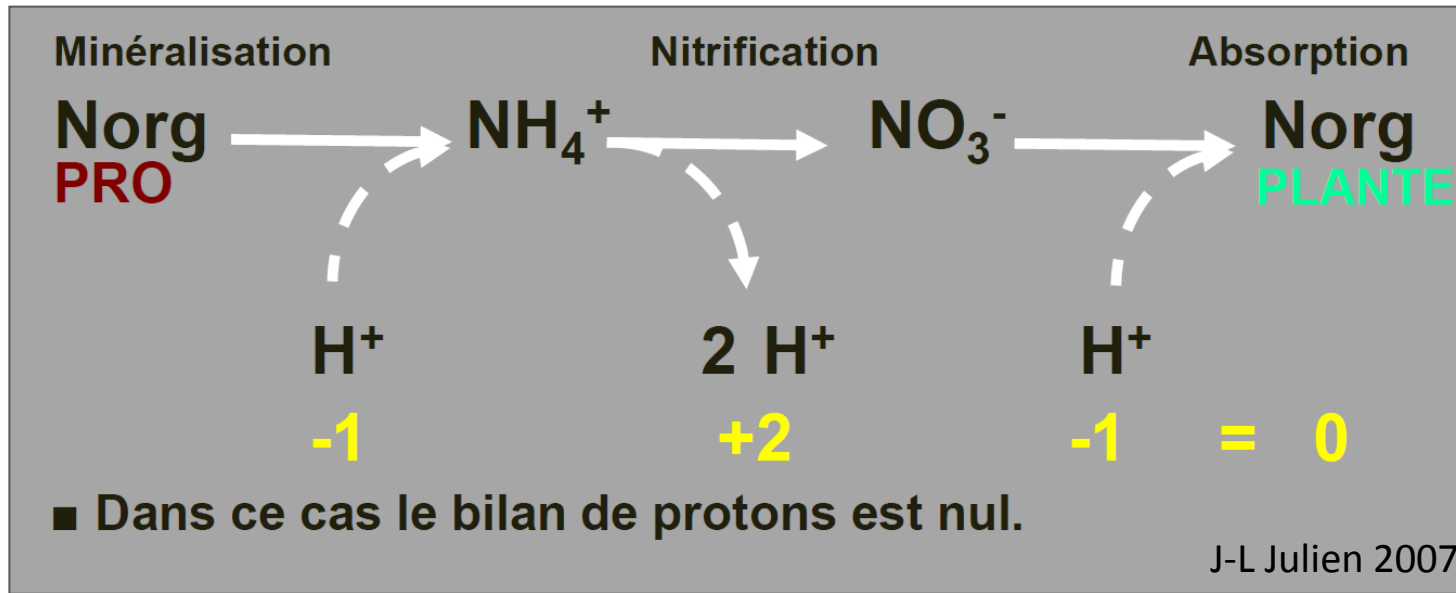
■ 2^{ème} démarche : prise en compte du système « PRO-sol-plante »

→ Application du 1^{er} modèle d'estimation de l'effet d'un PRO sur le SAB du sol :

→ Transformation du PRO dans le sol → équation (1) et minéralisation partielle basée sur le C org.

➡ Introduction des échanges sol-plante dans le modèle :

- Si **N** et **S** → bien valorisés par la culture, leur effet sur le SAB est nul :

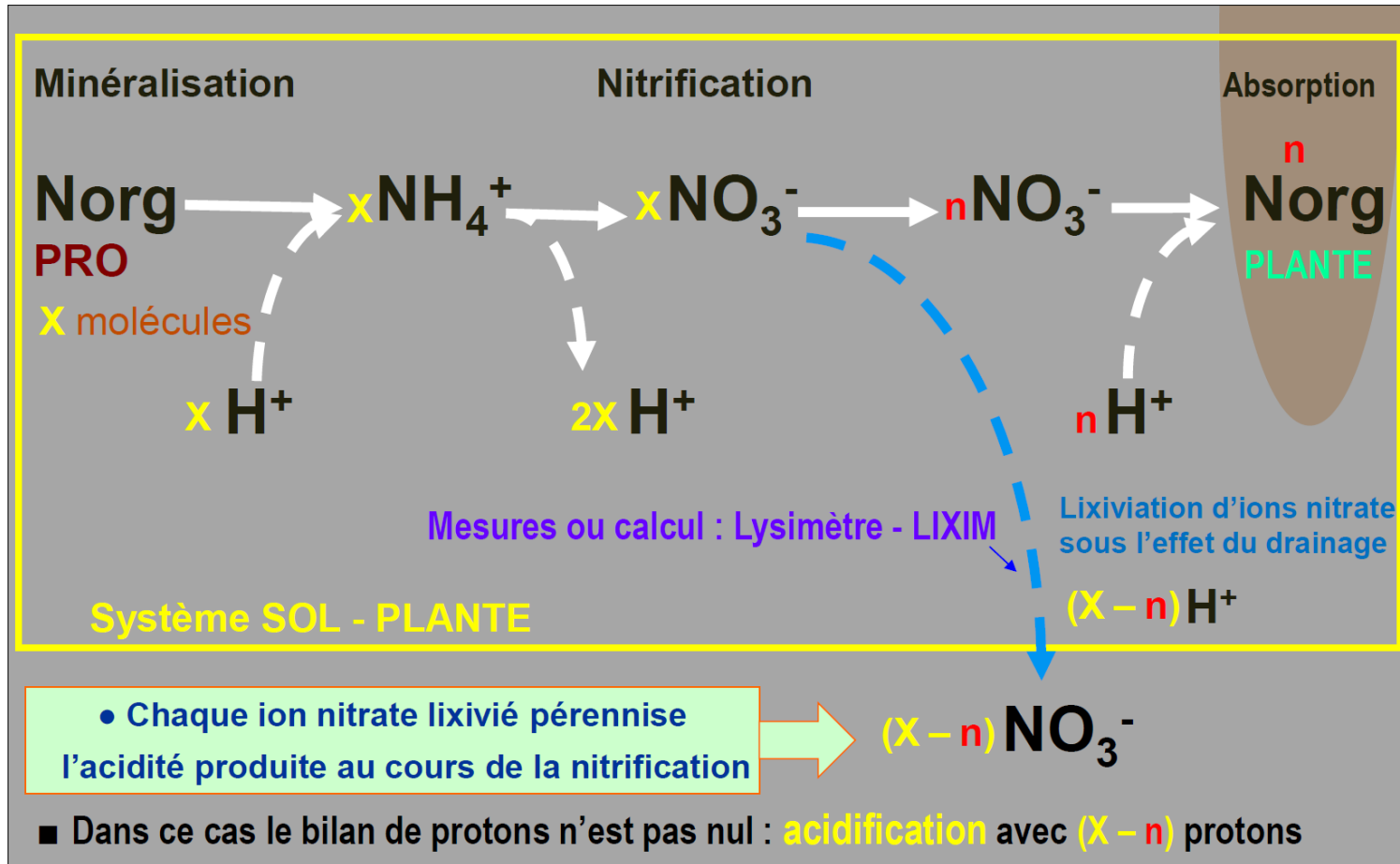


- Pour **S** : S org. PRO → SO₄²⁻ + 2H⁺ et l'absorption de SO₄²⁻ par la racine accompagnée de 2 H⁺

Présentation des notions de chimie des sols à la base des modèles testés

■ 3^{ème} mode de calcul : prise en compte de la **lixiviation des nitrates** provenant des PRO

Si **N** et **S** issus du PRO sont mal valorisés par la culture → lixiviation d'une fraction de NO_3^- et SO_4^{2-}



JL Julien 2007

Présentation des notions de chimie des sols à la base des modèles testés

■ 4^{ème} mode de calcul : prise en compte des exportations par les cultures

➔ Exportations par les cultures :

- Alcalinité = Σ cations absorbés - Σ anions absorbés

- Alcalinité = $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+) - (\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$

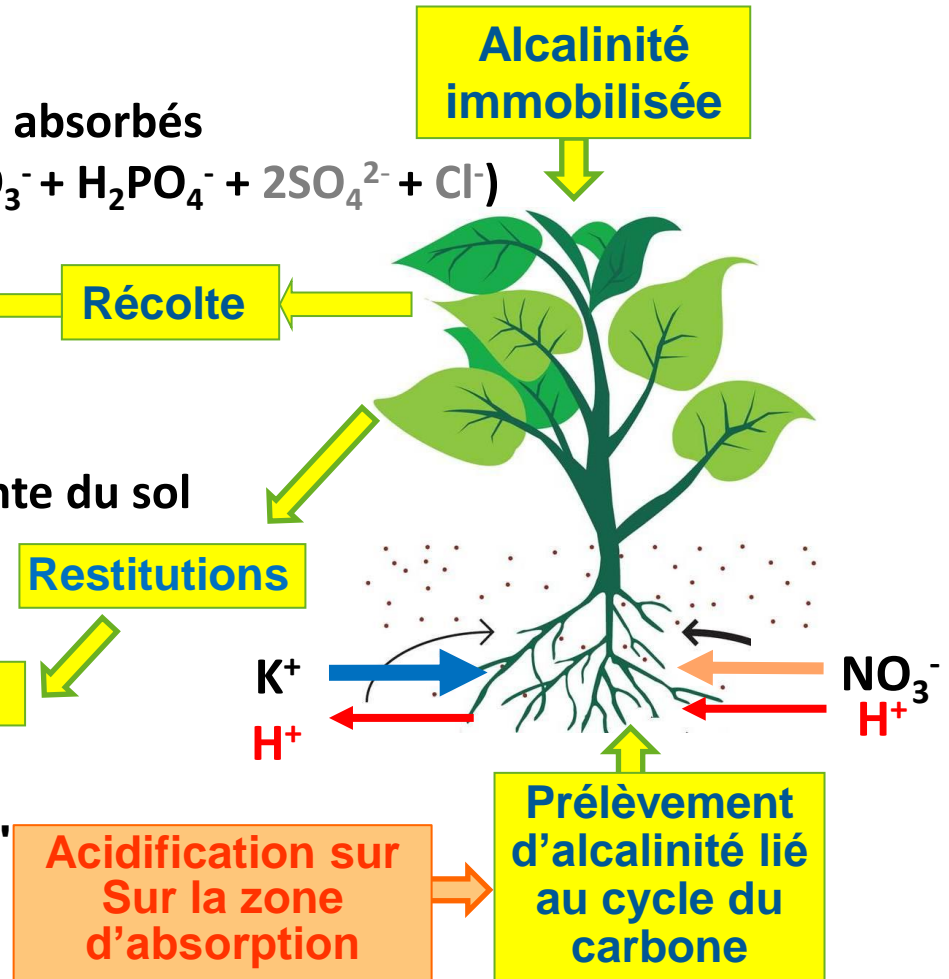
➔ Exportations = alcalinité exportée

➔ correspond à une acidification équivalente du sol

➔ Exprimé en $\text{kmolc} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$

Retour d'alcalinité au sol

➔ La partie restituée (pailles, racines...) reste dans le système "SOL - PLANTE" et n'entre pas dans le calcul.



Les essais de longue durée français

Mauron (56)
ITCF, CA56, INRA
1975 – 1981
LP

Le Rheu (35)
ARVALIS
1995 – 2006
2 essais
FB, CB et FP, CP

QualiAgro Feucherolles (78)
INRA-VEOLIA
1999 - 2015
2 essais (N optimal ou réduit)
FB, DVB, OMR, BIO

La Jaillière (44)
ARVALIS
1995-2006
2 essais
FB, FP, FV, CB, CP, CV

Brindas (69)
SERAIL
1995-2004
FB, CDV, CTV, CBE

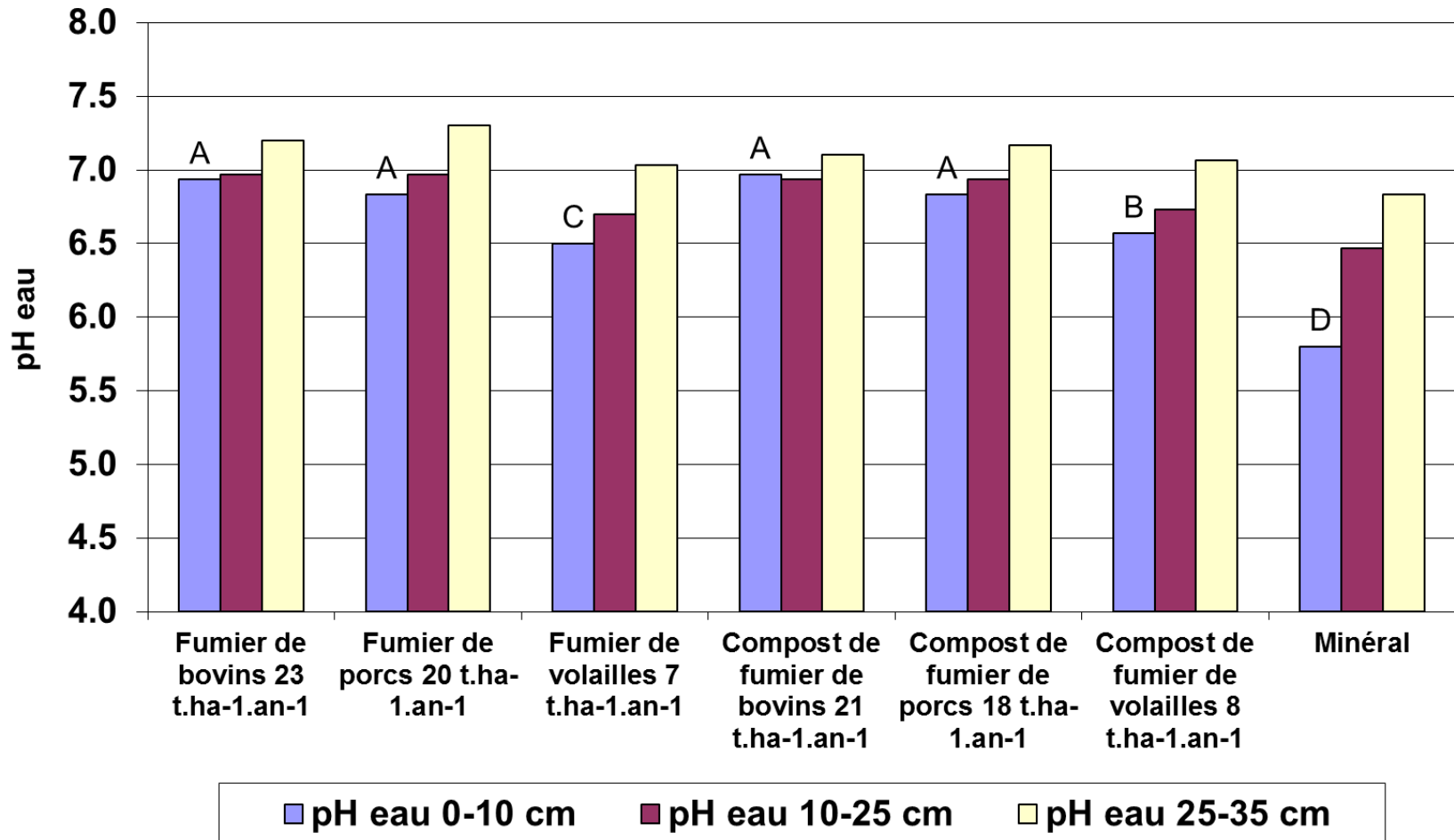
La Jaillière (44)
ARVALIS
1983-1992
FB, LB

Jeu les Bois (3)
ARVALIS, OIER des Bordes
1999 – 2007
2 essais
FB, CB, FV, LP

FB, FP, FV: fumier bovins, porcins, volailles
CB, CV, CP: fumier composté de bovins, porcins, volailles
LB, LP: lisiers de bovins, porcins
DVB: compost déchets verts + boues
OMR: composts ordures ménagères résiduelles
BIO: composts de biodéchets
CDV: composts de déchets verts
CTV: compost de tourteaux végétaux (café)
CBE: compost de bois et écorce enrichi en FV et LP

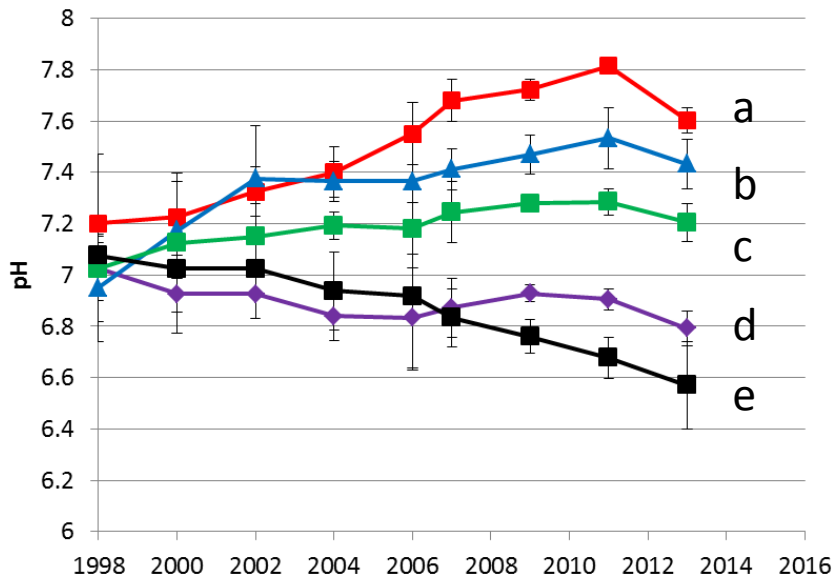
- Maïs en continu
- ◆ Colza - blé
- ◆ Maïs - blé
- ▲ Prairie

La Jaillière essai en RGA (1995-2006): bilan analytique 2006



Essai QualiAgro: suivi pH eau entre 1998 et 2013

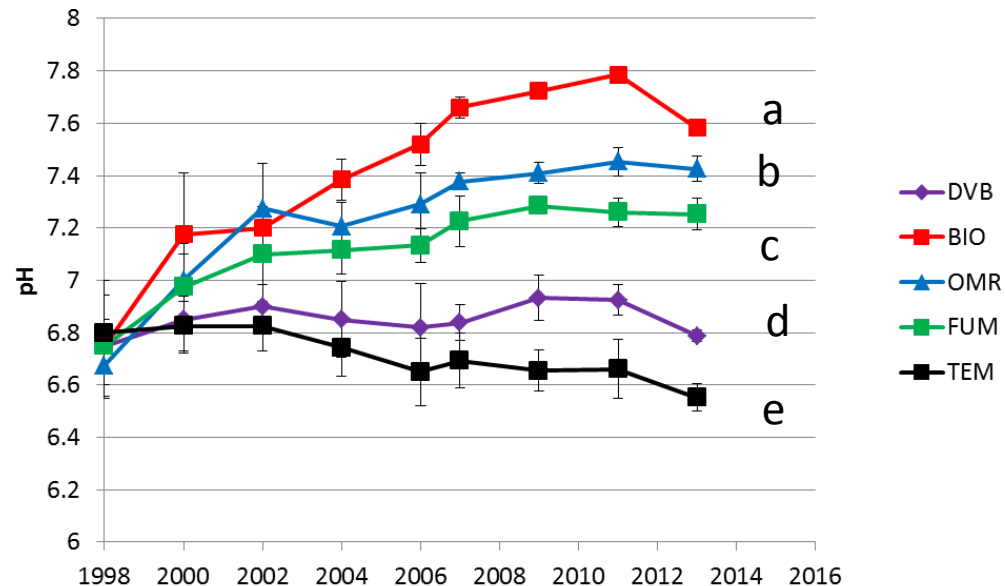
Traitements complémentés en N



86 kg N/ha sur maïs
et 125 sur blé (Sol 390)

DVB: compost déchets verts + boues
BIO: composts de biodéchets

N min faible ou nul

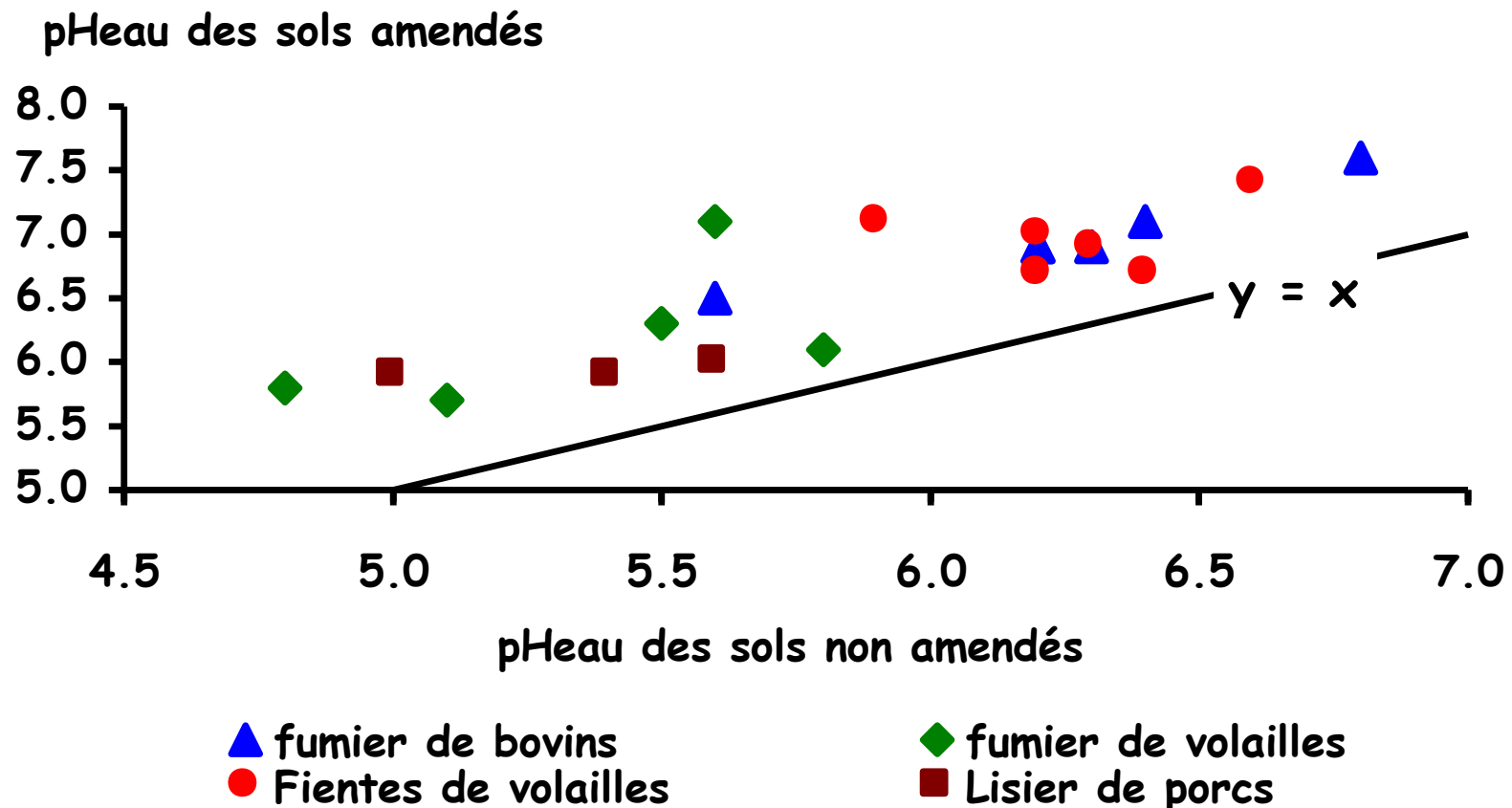


0 kg N/ha sur maïs
et 56 sur blé (Sol 390)

OMR: composts ordures ménagères résiduelles
FUM: fumier de bovins

Des effets alcalinisant des PRO largement cités dans les publications internationales

Effet de 10 à 25 ans d'apports d'amendements organiques sur le pH des sols dans le Nord Est des USA (Sharpley et al ., 2004)



Conclusions sur les essais de longue durée

- Effet pH par rapport au témoin toujours positif ou nul
- Effets types de PRO
 - $FB \sim FP > FV$
 - Fumiers \sim composts
- Effets variables selon sites d'essais: composition, type de sol, rotation et pratiques culturales (N)
- Proportionnel aux doses apportées
- Pas d'interaction avec fertilisation azotée minérale (pour doses $N \leq$ dose optimale)

Démarche d'évaluation des modèles sur 2 essais de longue durée : QualiAgro (INRA), La Jaillière (ARVALIS)

Modèle testé	Données utilisées
Modèle minéralisation totale	Composition des PRO (N, S, P, K, Ca, Mg)
Modèle de minéralisation partielle N et S des PRO selon bilan stockage C	Composition des PRO (N, S, P, K, Ca, Mg) Part du C des PRO, stockée dans le sol
Modèle de Julien et al., 2007	Composition des PRO (N, S, P, K, Ca, Mg) Part de l'azote des PRO lixiviée
Modèle de Julien et al. et exportations	Composition des PRO (N, S, P, K, Ca, Mg) Part de l'azote des PRO lixiviée Exportations de N, S, P, K, Ca, Mg par les récoltes

Démarche d'évaluation des modèles sur 2 essais de longue durée

Confrontation aux VN à apporter, évaluées a posteriori à partir des D(pH) mesurés au champ

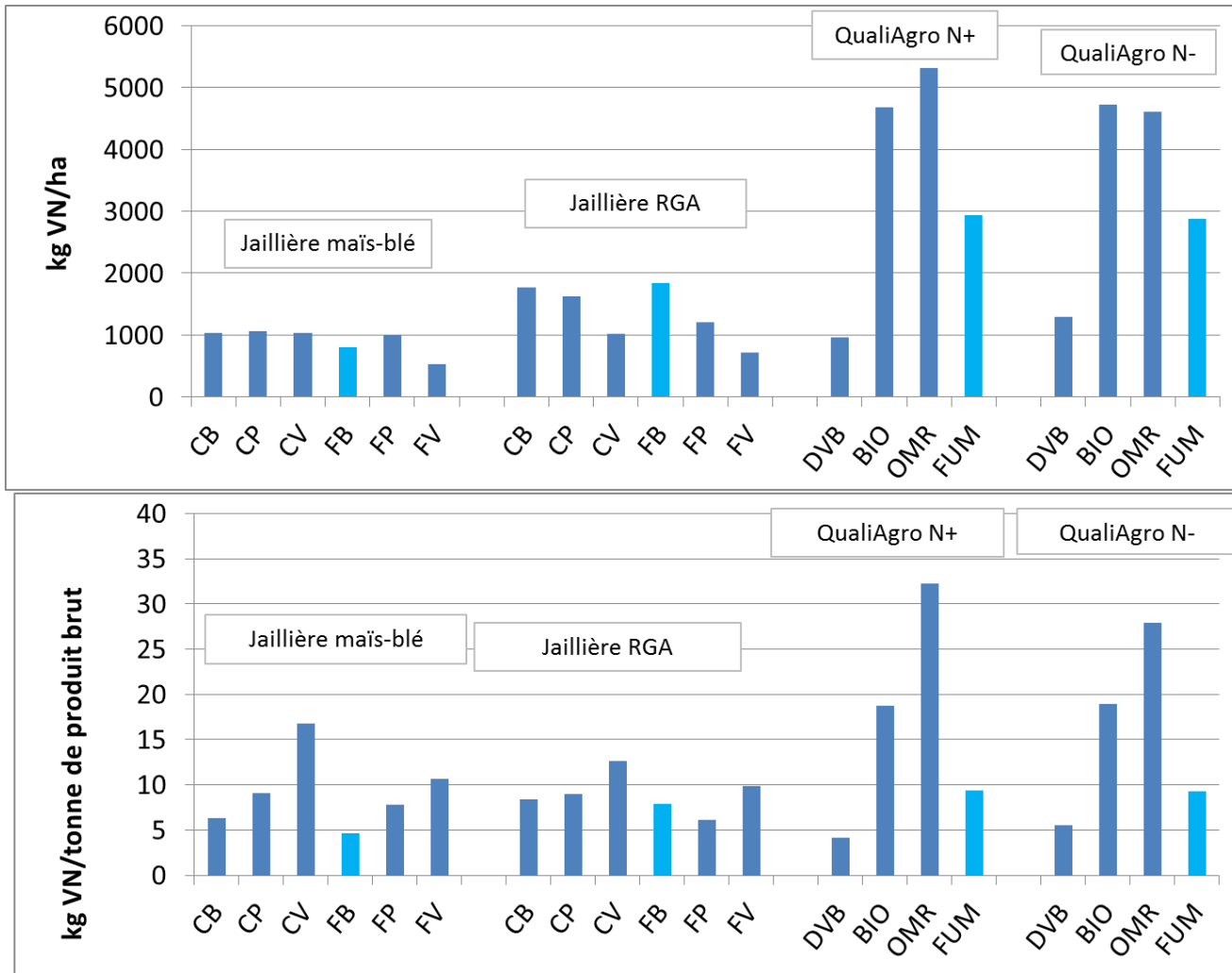
La formule de Rémy (COMIFER, 2009; brochure Chaulage) estime la quantité d'équivalent CaO nécessaire pour « redresser » le pH d'un horizon « amendé », caractérisé par sa masse de terre fine en tonnes par ha (PTF), ses teneurs en Argile et en MO (‰)

Besoin.En.Base =

$$55.10^{-6} \times (ARG + 5 \times MO) \times (\exp(pH_s/1,5) - \exp(pH_i/1,5)) \times PTF$$

avec pH_s = pH souhaité (final), pH_i = pH initial

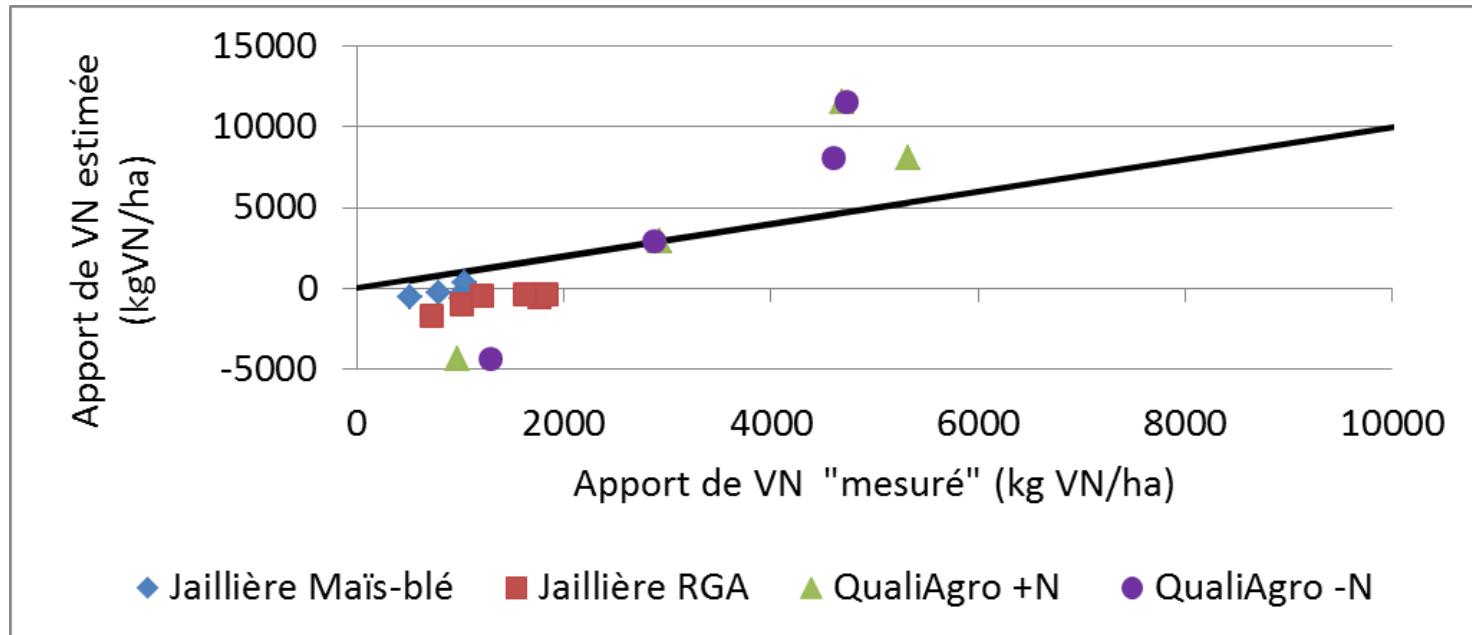
« $Vn_{\text{mesuré}}$ » des PRO : calculé à partir de la formule de Rémy et des mesures de pH eau



VN mesurées plus importantes ($\Delta(\text{pH})$ plus grands) sur site Qualiagro avec composts DVB et OMR, puis FUM

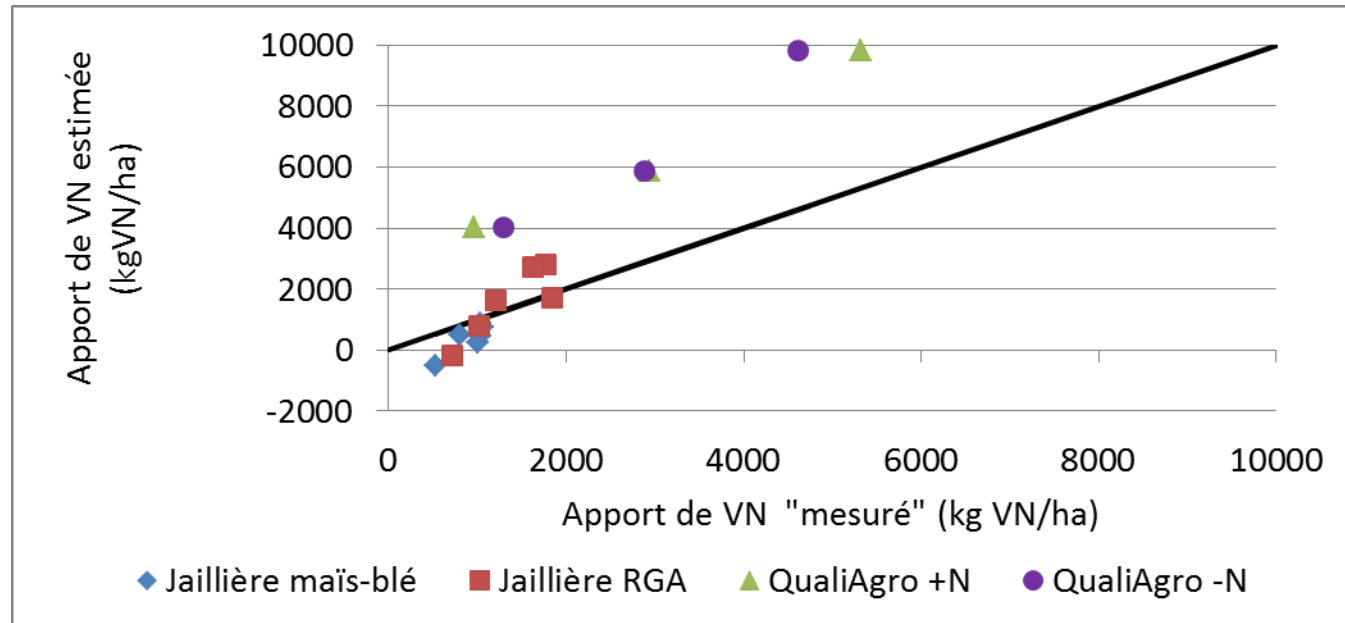
- Tonnages plus importants
- VN/tonne plus élevées

VN des PRO estimée selon hypothèse de minéralisation totale ($VN_{\text{estimée}1}$)



- Cohérence de classement des produits au sein de chaque essai
- Comportement spécifiques des sites
 - Jaillièrre: sous estimation
 - QualiAgro: surestimation (OMR, BIO) ou sous estimation (DVB) importantes

VN des PRO estimée selon hypothèse de minéralisation partielle de N et S selon bilan stockage de C ($VN_{\text{estimée}2}$)

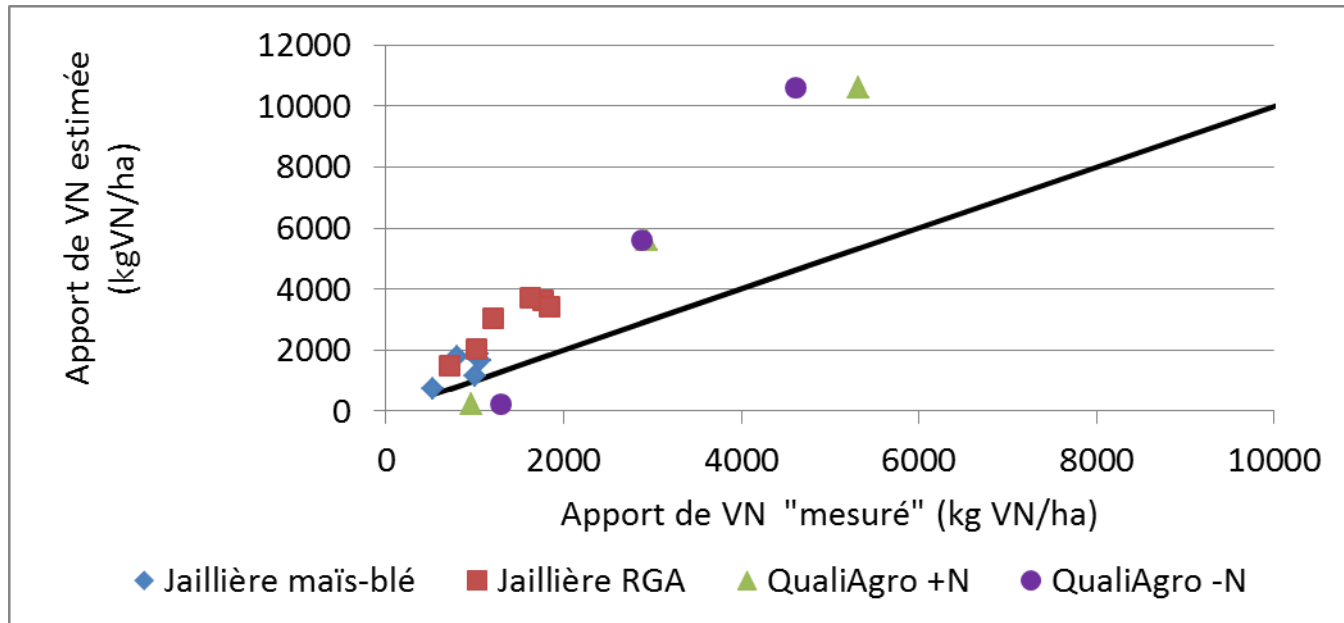


Biais: -2135
RMSE: 4213
Eff.: -1.6

- Cohérence de classement des produits au sein de chaque essai
- Comportement spécifiques des sites
 - Jaillièrre: estimation correcte
 - QualiAgro: surestimation

VN des PRO estimée avec modèle Julien et al. (2007)

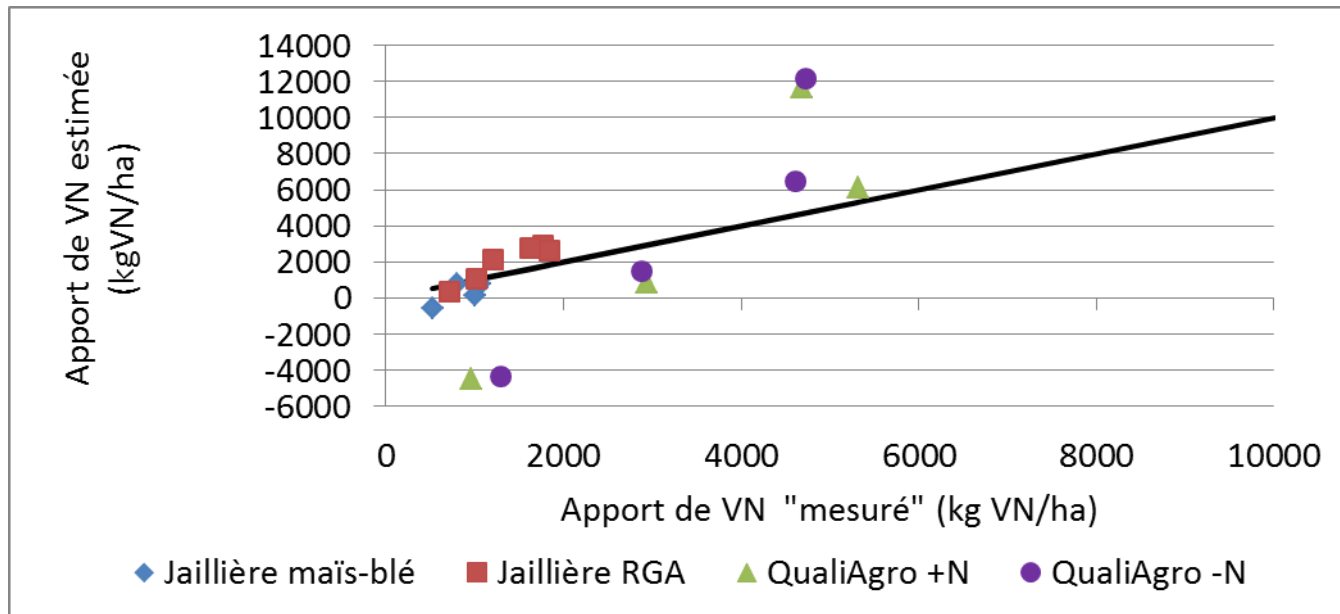
($VN_{\text{estimée}3}$)



Biais: -2488
RMSE: 4151
Eff.: -1.

- Cohérence de classement des produits au sein de chaque essai
- Comportement spécifiques des sites
 - Jaillièrè: surestimation
 - QualiAgro: surestimation sauf DVB

VN des PRO estimée avec modèle Julien et al. (2007) et exportations ($VN_{\text{estimée4}}$)



- Cohérence de classement des produits au sein de chaque essai
- Comportement spécifiques des sites
 - Jaillièrè: estimation correcte
 - QualiAgro: sous estimation DVB et sur estimation BIO

Discussion

- Aucun modèle n'est globalement satisfaisant
- Hypothèses simplificatrices
 - Minéralisation et dissolution totale de Ca, K, etc.
 - Absence de pertes gazeuses
 - Lixiviation seulement de NO_3^- (or lixiviation HCO_3^- induirait aussi acidification)
 - Bilan H^+ neutre de l'absorption de N si uniquement sous forme NO_3^- (absorption NH_4^+ négligée)

Conclusions

- **Diversité des VN des PRO sur les deux essais étudiés**
 - ✓ *VN des compost d'OMR et de Biodéchets plus élevée*
- **La composition des produits influence la VN**
 - *PRO riches en N: effet (-) sur VN*
 - *PRO riches en Ca, Mg, K: effet (+) sur VN*
- **VN semble peu influencée par fertilisation minérale N (mais dose \leq dose optimale)**
- **Variabilité de la VN/tonne de PB pour le fumier de bovins, faible entre essais (5 à 10 VN/tonne)**
- **Pas encore de modèle satisfaisant pour estimer la VN**
- **Poursuivre travaux sur le modèle intégrant:**
 - *Composition des PRO*
 - *Lixiviation N*
 - *Rotation (exportations par récoltes)*