

# Analyse des effets du type et du niveau de fertilisation sur l'évolution du rendement fourrager et sur la teneur en Azote et la CEC des sols à la Réunion

**Lore LE PABIC**

**Encadrants:** Emmanuel TILLARD, Paulo SALGADO



**Ensaï**

18 octobre 2013

## Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

### 1 Introduction

### 2 Le rendement fourrager

- Description des données
- Trois structures de covariance usuelles
- Le site de SICALAIT
- Les quatre sites
- Interprétation agronomique des résultats

### 3 La teneur en Azote et la CEC des sols

- Description des données
- La stratégie de modélisation
- Le modèle de la teneur en Azote
- Le modèle de la CEC

### 4 Conclusion

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

## 1 Introduction

## 2 Le rendement fourrager

- Description des données
- Trois structures de covariance usuelles
- Le site de SICALAIT
- Les quatre sites
- Interprétation agronomique des résultats

## 3 La teneur en Azote et la CEC des sols

- Description des données
- La stratégie de modélisation
- Le modèle de la teneur en Azote
- Le modèle de la CEC

## 4 Conclusion

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

## Objectifs

Évaluer les effets à moyen et long terme des fertilisations :

- sur **le rendement fourrager** ;
- sur **la composition chimique du sol (teneur en Azote) et la CEC.**

⇒ Un suivi de parcelles prairiales mis en place depuis 2004.

## Dispositif expérimental

- **Dix modalités de fertilisation** : organique, minérale ou mixte ;
- **Quatre sites** : représentatifs de la diversité agro-écologique des prairies à la Réunion.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Des fertilisations organiques, minérales et/ou mixtes.

## Descriptif

Code	Nom	Descriptif (par coupe)	Type
F1	Témoin	0 fumure	néant
F2	M70	70 kg engrais minéral	minéral
F3	L40	40 m <sup>3</sup> lisier	organique
F4	L40M30	40 m <sup>3</sup> lisier + 30 kg engrais minéral	mixte
F5	L70	70 m <sup>3</sup> lisier	organique
F6	C7.2	7,2 t compost	organique
F7	C7.2M56	7,2 t compost + 56 kg engrais minéral	mixte
F8	C12	12 t compost	organique
F9	C12M48	12 t compost + 48 kg engrais minéral	mixte
F10	M120	120 kg N engrais minéral	minéral

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Lieu/site	Altitude (m)	Pluviométrie (mm)	Sol	Espèces fourragères
St Joseph	10	1000-1500	Sableux	Chloris
Mont-Vert	800	1000-1500	Andosol	Kikuyu
Plaine des Cafres	1600	1500-2000	Andosol	Ray-Gras, dactyle, brome
Plaine des palmistes	1200	4000-5000	Andosol	Ray-Gras, dactyle, brome



FIGURE : Visualisation de l'emplacement géographique des sites.

## Principes de la planification

- *Répétitions* : trois blocs par site ;
- *Randomisation* : allocation aléatoire des dix fertilisations sur chaque bloc ;
- *Contrôle de l'erreur* : réduction de la part non-contrôlée de l'expérience.

Bloc	Parcelle	Fertilisation
B1	P1	6
	P2	2
	P3	8
	P4	3
	P5	1
	P6	9
	P7	4
	P8	10
	P9	5
	P10	7

Bloc	Parcelle	Fertilisation
B2	P11	9
	P12	1
	P13	10
	P14	5
	P15	4
	P16	8
	P17	2
	P18	6
	P19	7
	P20	3

Bloc	Parcelle	Fertilisation
B3	P21	3
	P22	2
	P23	4
	P24	7
	P25	9
	P26	6
	P27	8
	P28	10
	P29	1
	P30	5

FIGURE : Représentation schématique du plan pour un site.

→ 30 micro-parcelles par site.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Cinq à huit coupes par an pour chaque micro-parcelle. Après chaque coupe :

- 1 Récolte et pesée des quantités de Matière Verte (MV) ;
- 2 Prélèvement d'un échantillon de fourrage ;
- 3 Fertilisation de la parcelle ;
- 4 Séchage des échantillons et calcul du taux de Matière Sèche (MS) ;
- 5 Analyse de la composition des échantillons de fourrage.

Prélèvement et analyse d'un échantillon de sol sur chaque micro-parcelle (1 fois/an).



Sommaire

Introduction

**Le  
rendement  
fourrager**

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

## 1 Introduction

## 2 Le rendement fourrager

- Description des données
- Trois structures de covariance usuelles
- Le site de SICALAIT
- Les quatre sites
- Interprétation agronomique des résultats

## 3 La teneur en Azote et la CEC des sols

- Description des données
- La stratégie de modélisation
- Le modèle de la teneur en Azote
- Le modèle de la CEC

## 4 Conclusion

Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

Description des données

Trois structures de covariance usuelles

Le site de SICALAIT

Les quatre sites

Interprétation agronomique des résultats

La teneur en Azote et la CEC des sols

Conclusion

## Problématiques

- Comment le rendement fourrager moyen varie selon la fertilisation utilisée ?
- Les différences de rendement constatées évoluent-elles au cours des saisons ?

## La variable à expliquer Y

La quantité moyenne de biomasse fauchée par coupe et par saison, exprimée en kilogramme de Matière Sèche par hectare.

⇒ Normalisation de Y par transformation logarithmique.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Les variables explicatives de l'analyse :

- 1 le traitement de fertilisation (10 modalités)
- 2 le site ou les caractéristiques pédo-climatiques (4 modalités)
- 3 la saison (4 modalités)

## L'année biologique

- du 01/12 d'une année  $n$  au 30/11 de l'année  $n + 1$  ;
- quatres saisons :
  - la saison des pluies, du 01/12 au 28/02 ;
  - la fin de saison des pluies, du 01/03 au 31/05 ;
  - la saison fraîche, du 01/06 au 31/08 ;
  - la fin de saison fraîche, du 01/09 au 30/11.

⇒ Indépendance entre le site et l'intervalle de temps entre les coupes selon la saison.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Analyse préliminaire :

- Faible dépendance des rendements fourragers d'une année à une autre.

## L'unité expérimentale

La micro-parcelle observée sur une année.

⇒ Quatre observations de  $Y$  par unité.

⇒ Répétitions des mesures de rendement sur une même unité.

**Problème** : Présence de corrélations dans les données.

**Une solution** : Modéliser la structure de covariance  $R$ .

Sommaire

Introduction

Le rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Suppose que chaque variance et chaque covariance est unique.

## L'absence de structure

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{21} & \sigma_{31} & \sigma_{41} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \sigma_{32} & \sigma_{42} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_3^2 & \sigma_{43} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_4^2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

- Symétrique et définie positive.
- $\frac{T(T+1)}{2} = 10$  éléments à estimer.
- Structure la plus coûteuse en calculs.

Variance et covariance constantes : deux paramètres à estimer.

## Structure en symétrie composée

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 + \sigma_2^2 & \sigma_2^2 & \sigma_2^2 & \sigma_2^2 \\ \sigma_2^2 & \sigma_1^2 + \sigma_2^2 & \sigma_2^2 & \sigma_2^2 \\ \sigma_2^2 & \sigma_2^2 & \sigma_1^2 + \sigma_2^2 & \sigma_2^2 \\ \sigma_2^2 & \sigma_2^2 & \sigma_2^2 & \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

## Autre écriture

$$R = \sigma^2 \begin{pmatrix} 1 & \rho & \rho & \rho \\ \rho & 1 & \rho & \rho \\ \rho & \rho & 1 & \rho \\ \rho & \rho & \rho & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

où  $\rho = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  la corrélation entre deux mesures et  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ .

Sommaire

Introduction

Le rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Permet de tenir compte des écarts entre les mesures.

## Structure AR(1)

$$R = \sigma^2 \begin{pmatrix} 1 & \rho & \rho^2 & \rho^3 \\ \rho & 1 & \rho & \rho^2 \\ \rho^2 & \rho & 1 & \rho \\ \rho^3 & \rho^2 & \rho & 1 \end{pmatrix}, \text{ avec } |\rho| \leq 1. \quad (4)$$

- Variance homogène  $\sigma^2$ .
- Corrélation inversement proportionnelle à l'écart entre les deux instants :

$$\text{cor}(Y_t, Y_{t'}) = \begin{cases} 1 & \text{si } t = t' \\ \rho^{|t-t'|} & \text{sinon.} \end{cases}$$

- Deux paramètres à estimer.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Deux facteurs : la fertilisation  $F$  et la saison  $T$ .

## ANOVA à deux facteurs

$$\log(Y_{ijt}) = \mu + \alpha_j + \gamma_t + \varepsilon_{ijt}, \quad (5)$$

- $\alpha_j$  effet du niveau  $j$  du facteur  $F$  ;
- $\gamma_t$  effet du niveau  $t$  du facteur  $T$ .

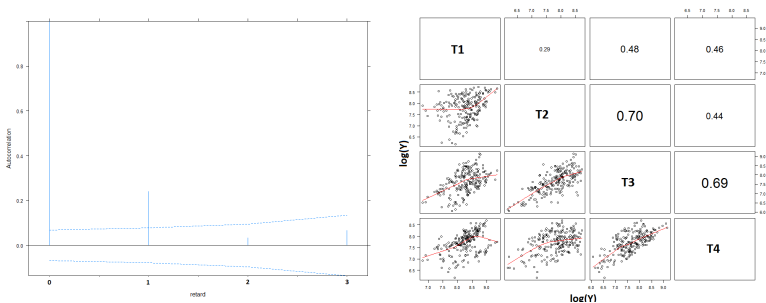
⇒ Absence d'effet de l'interaction  $(\alpha\gamma)_{jt}$  :  
effet de la fertilisation constant d'une saison à une autre.



## Problème 1

Suppose l'**indépendance** des observations :  $cor(Y_t, Y_{t'}) = 0, \forall t, t'$ .

⇒ Forte corrélation entre deux saisons successives.



**FIGURE :** Fonction d'autocorrélation empirique des résidus standardisés. Matrice des corrélations selon les saisons.

## Problème 2

Suppose l'**homogénéité** des variances :  $var(Y_{ijt}) = \sigma^2, \forall i, j, t.$

⇒ Rejet de l'hypothèse d'égalité des variances saisonnières (Levene, Bartlett).

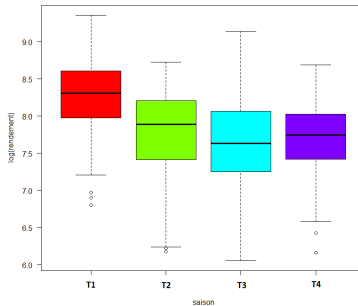


FIGURE : Dispersion des observations du  $\log(Y)$  par saison.

Sommaire

Introduction

Le rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

## Le modèle à effets fixes pour données répétées

On pose :

$$\log(Y_{ijt}) = \mu_{jt} + U_{ijt}, \quad (6)$$

avec

$$\mu_{jt} = \mu + \alpha_j + \gamma_t,$$

et  $U_{ijt}$  est la  $t$ -ième composante du vecteur  $U_{ij}$ , où  $U_{ij} \sim \mathcal{N}_T(0, R)$ .

⇒ Choix de la structure de  $R$  : critère AIC.

## Structure retenue

Structure AR(1) et hétérogénéité saisonnière.

⇒ Cinq paramètres à estimer :  $\rho$  et  $\sigma_t$  pour  $t = 1, \dots, 4$ .

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

## Validité du modèle

- Corrélation intra-sujet totalement expliquée ;
- Homogénéité des variances résiduelles ;
- Normalité des résidus.

## Résultats

- $\hat{\rho} = 0.225$
- $\hat{\sigma}_1 = 0.377, \hat{\sigma}_2 = 0.432, \hat{\sigma}_3 = 0.411, \hat{\sigma}_4 = 0.361.$

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Trois facteurs : la fertilisation  $F$ , la saison  $T$  et le site  $S$ .

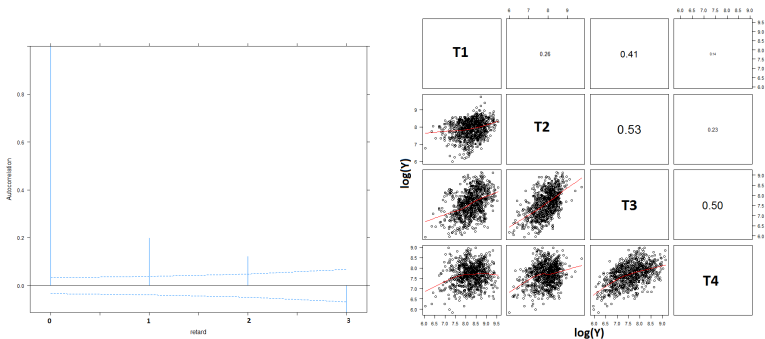
## ANOVA à trois facteurs

$$\log(Y_{ijkt}) = \mu + \alpha_j + \gamma_t + \theta_k + (\alpha\theta)_{jk} + (\gamma\theta)_{tk} + \varepsilon_{ijkt} \quad (7)$$

- $(\alpha\theta)_{jk}$  effet de l'interaction entre la fertilisation  $j$  et le site  $k$  ;
- $(\gamma\theta)_{tk}$  effet de l'interaction entre la saison  $t$  et le site  $k$ .

⇒ Absence d'effet de l'interaction  $(\alpha\gamma)_{jt}$ .

⇒ Corrélation importante entre deux saisons successives.



**FIGURE :** Fonction d'autocorrélation empirique des résidus standardisés. Matrice des corrélations selon les saisons.

Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

Description des données

Trois structures de covariance usuelles

Le site de SICALAIT

Les quatre sites

Interprétation agronomique des résultats

La teneur en Azote et la CEC des sols

Conclusion

⇒ Rejet de l'hypothèse d'égalité des variances par saison et par site (Levene, Bartlett).

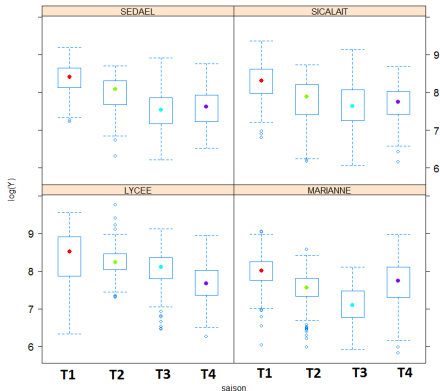


FIGURE : Dispersion des observations de  $\log(Y)$  par site et par saison.

Sommaire

Introduction

Le rendement  
fourrager

Description  
des données

Trois  
structures de  
covariance  
usuelles

Le site de  
SICALAIT

Les quatre  
sites

Interprétation  
agronomique  
des résultats

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

## Le modèle à effets fixes pour données répétées

On pose :

$$\log(Y_{ijkt}) = \mu_{jkt} + U_{ijkt}, \quad (8)$$

avec

$$\mu_{jkt} = \mu + \alpha_j + \gamma_t + \theta_k + (\alpha\theta)_{jk} + (\gamma\theta)_{tk},$$

et  $U_{ijkt}$  est la  $t$ -ième composante du vecteur  $U_{ijk}$ , où  $U_{ijk} \sim \mathcal{N}_T(0, R_k)$ .

⇒ Structure de variance-covariance  $R_k$  dépend du site  $k$ .

## Structure retenue

Structure AR(1) et hétérogénéité saisonnière intra-site.

⇒ 17 paramètres à estimer :  $\rho$  et  $\sigma_{k,t}$  pour  $k, t = 1, \dots, 4$ .



Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

Description des données

Trois structures de covariance usuelles

Le site de SICALAIT

Les quatre sites

Interprétation agronomique des résultats

La teneur en Azote et la CEC des sols

Conclusion

## Validité du modèle

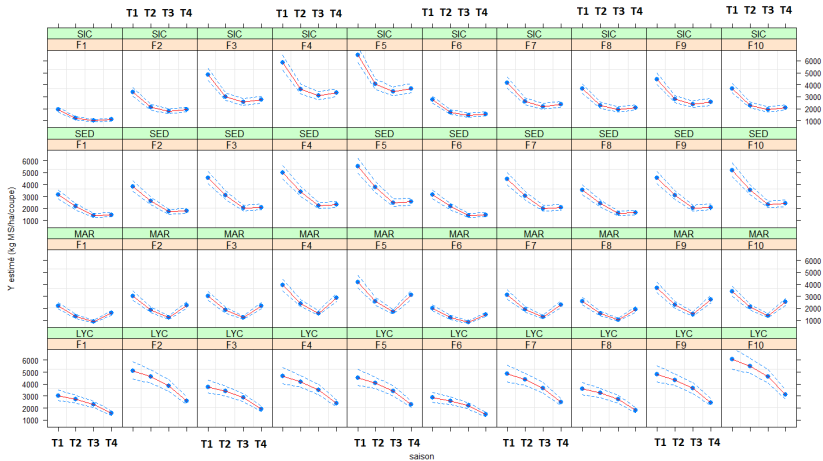
- Une grande partie de la corrélation intra-sujet expliquée ;
- Homogénéité des variances résiduelles ;
- Normalité des résidus.

## Résultats

- $\hat{\rho} = 0.232$

site $k$ / saison $j$	saison T1	saison T2	saison T3	saison T4
MAR. $\hat{\sigma}_{1,j}$	0.440	0.462	0.405	0.465
SED. $\hat{\sigma}_{2,j}$	0.383	0.497	0.494	0.379
SIC. $\hat{\sigma}_{3,j}$	0.378	0.434	0.412	0.361
LYC. $\hat{\sigma}_{4,j}$	0.734	0.357	0.433	0.421

- Sommaire
- Introduction
- Le rendement fourrager
- Description des données
- Trois structures de covariance usuelles
- Le site de SICALAIT
- Les quatre sites
- Interprétation agronomique des résultats
- La teneur en Azote et la CEC des sols
- Conclusion



**FIGURE :** Estimations du rendement en kg MS/ha/coupe par le modèle retenu pour chaque combinaison de modalités des facteurs.

Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

Description des données

Trois structures de covariance usuelles

Le site de SICALAIT

Les quatre sites

Interprétation agronomique des résultats

La teneur en Azote et la CEC des sols

Conclusion

⇒ Tout traitement confondu : rendements sup. lors de  $T1$  ( $\simeq 80\%$  pour SIC, SED et MAR).

## Saison des pluies $T1$

- $F2$  et  $F10$  : rendements au LYC.  $60\%$  sup. à SIC. ;
- $F5$  : rendements au LYC.  $30\%$  inf. à SIC. ;
- En moyenne : rendements au LYC.  $55\%$  sup. à MAR. ;
- rendements au LYC.  $\Leftrightarrow$  rendements à SED. ;

## SICALAIT

- Effet + des engrais p.r. témoin (2, 3 fois plus de biomasse, en moyenne) ;
- $F4$ ,  $F5$  :  $+60\%$  de rendement p.r. aux autres modalités ;
- $F6$  moins efficace mais  $44\%$  supérieur au témoin.

Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

Description des données

Trois structures de covariance usuelles

Le site de SICALAIT

Les quatre sites

Interprétation agronomique des résultats

La teneur en Azote et la CEC des sols

Conclusion

## SEDAEL et MARIANNE

- Pas d'effet de  $F6$  et  $F8$  visible à court terme ;
- $F4$ ,  $F5$ ,  $F10$  : +74% de rendement p.r. témoin ;
- $F4$  et  $F5$  à MAR. : +42% p.r. autres modalités.

⇒ SIC, SED, MAR : les lisiers se substituent à l'engrais minéral.

## LYCEE

- Effet + des engrais p.r. témoin (+54% en moy.) ;
- $F2$ ,  $F10$  : +84% de rendement p.r. témoin ;
- Mais pas de différence significative avec  $F7$  et  $F9$ .

⇒ LYC : le compost se substitue partiellement à l'engrais minéral.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

## 1 Introduction

## 2 Le rendement fourrager

- Description des données
- Trois structures de covariance usuelles
- Le site de SICALAIT
- Les quatre sites
- Interprétation agronomique des résultats

## 3 La teneur en Azote et la CEC des sols

- Description des données
- La stratégie de modélisation
- Le modèle de la teneur en Azote
- Le modèle de la CEC

## 4 Conclusion

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

## Problématique

- Comment évoluent la teneur en Azote et la CEC selon la fertilisation utilisée ?

## Les variables à expliquer *Ntot* et *CEC*

- La teneur annuelle en Azote du sol, en  $g\ N / kg\ sol$ .
- La Capacité d'Échange Cationique (CEC) annuelle, en  $meq / 100g\ sol$ .

⇒ Normalisation de *Ntot* par transformation logarithmique.

⇒ Normalisation de *CEC* par transformation en racine carrée.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

Les variables explicatives de l'analyse :

- 1 le traitement de fertilisation (10 modalités)
- 2 le site ou les caractéristiques pédo-climatiques (4 modalités)
- 3 l'année (de 0 à 6)

## L'unité expérimentale

La micro-parcelle d'un site.

⇒ 120 séries temporelles de 7 observations (2006 à 2012).

**Problème** : Non-linéarité de l'évolution de  $N_{tot}$  et de  $CEC$  dans le temps.

**Une solution** : Modèle additif semi-paramétrique.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

## Définition

$$y_i = X_i\beta + f_1(x_{1,i}) + f_2(x_{2,i}) + f_3(x_{3,i}, x_{4,i}) + \dots + \varepsilon_i, \quad (9)$$

- $X_i\beta$  la partie linéaire ;
- $f_j$  les fonctions de lissage.

- Effets partiels additifs ;
- Choix des splines cubiques de régression pénalisée.

⇒ Pénalité : réduit l'influence des coefficients associés aux noeuds.

⇒ Estimation REML de la pénalité  $\lambda$  :

- effets aléatoires (coeff. pénalisés) ;
- effets fixes (coeff. non-pénalisés).



Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

La teneur en Azote et la CEC des sols

Description des données

La stratégie de modélisation

Le modèle de la teneur en Azote

Le modèle de la CEC

Conclusion

## L'erreur absolue moyenne en pourcentage

$$MAPE(y, \hat{y}) = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|}.$$

## L'erreur quadratique moyenne intégrée

$$RMSE = \sqrt{\mathbb{E}(\mathbb{E}(Y|X) - Y)^2}.$$

- Modèles emboîtés : test du rapport de vraisemblance ;
- AIC, BIC sinon.

Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

La teneur en Azote et la CEC des sols

Description des données

La stratégie de modélisation

Le modèle de la teneur en Azote

Le modèle de la CEC

Conclusion

⇒ Comportement différent de la teneur en Azote selon le site.

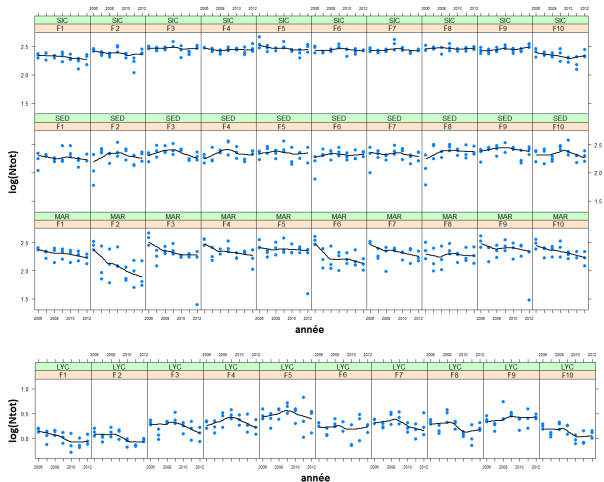


FIGURE :  $\log(N_{tot})$  dans le temps selon le site et la fertilisation, et courbe lissée loess.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

- Fonction de lissage temporel par site,  $f_{1j}$  ;
- Effet fixe de la fertilisation diffère selon le site (interactions).

## Le modèle retenu

$$\log(Ntot)_{ijt} = \mu + fert_i + site_j + (fert \times site)_{ij} + f_{1j}(annee_t) + \varepsilon_{ijt} \quad (10)$$

⇒ Noeuds à chaque pas de temps : interpolation lissée par la pénalité.

Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

La teneur en Azote et la CEC des sols

Description des données

La stratégie de modélisation

Le modèle de la teneur en Azote

Le modèle de la CEC

Conclusion

⇒ Autocorrélation des résidus pour une même série.

Condition de stationnarité : processus AR(1)

$$\varepsilon_{ijt} = \rho \varepsilon_{ij(t-1)} + u_{ijt},$$

où  $\mathbb{E}(u_{ijt}) = 0$ ,  $\mathbb{V}(u_{ijt}) = \sigma_u^2$ ,  $\text{cov}(u_{ijt}, u_{ijt'}) = 0$ , et  $|\rho| < 1$ , et ainsi :

$$\text{cor}(\varepsilon_{ijt}, \varepsilon_{ijt'}) = \begin{cases} 1 & \text{si } t = t' \\ \rho^{|t-t'|} & \text{sinon.} \end{cases}$$

⇒ Variabilité différente selon le site.

Hétérogénéité des variances intra-site

$$\mathbb{V}(\varepsilon_{ijt}) = \sigma_j^2, \text{ pour } j = 1, \dots, 4.$$

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

## Validité du modèle

- Homogénéité des variances résiduelles ;
- Normalité des résidus.

## Résultats

- $\hat{\rho} = 0.385$

AIC	RMSE	MAPE (%)	$R_{aj}^2$
-1132.33	0.86	8.14	0.985

Sommaire

Introduction

Le rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

Le comportement de l'évolution n'est pas le même sur les quatre sites, "toute fertilisation confondue".

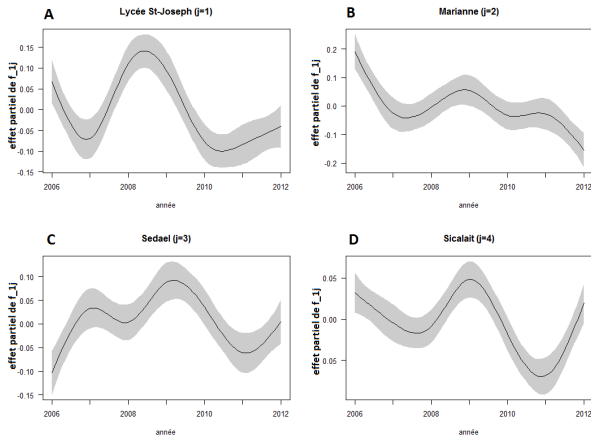


FIGURE : Les quatre fonctions de régression partielles estimées sur  $\log(N_{tot})$  selon l'année.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

- Stabilité de l'effet de la fertilisation sur la teneur en Azote du sol ;
- Variabilité de l'effet du site : climat.

## LYCEE

Teneurs en Azote beaucoup plus faibles que SED, SIC et MAR (90% moins riches).

- Effets + des engrais organiques et mixtes p.r. témoin ;
- *F5* (lisier) la plus efficace, avec *F9* (compost+min.) ;
- Pas d'effet des engrais minéraux p.r. témoin (absence de stockage).

## MARIANNE

- Effets - des engrais, sauf *F5* et *F9* ;
- Pas de différences entre les engrais, sauf avec *F2*.

⇒ Diminution significative avec *F2* (minérale).

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

## SEDAEL

- Pas de différences entre les engrais, sauf avec *F9* ;
- Augmentation significative avec *F9* (compost+min.) p.r. au témoin.

⇒ Stockage de l'Azote organique.

## SICALAIT

- Effet + de tous les engrais p.r. témoin, sauf *F10* ;
- Effets les plus importants avec *F3* et *F5* (lisier), puis *F8* (compost) ;
- Pas de différences significatives entre *F3* et *F5* avec les engrais organiques et mixtes.

⇒ Augmentation simultanée de l'Azote du sol et du rendement avec le lisier.



Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

La teneur en Azote et la CEC des sols

Description des données

La stratégie de modélisation

Le modèle de la teneur en Azote

Le modèle de la CEC

Conclusion

⇒ Comportement différent de la CEC selon la fertilisation.

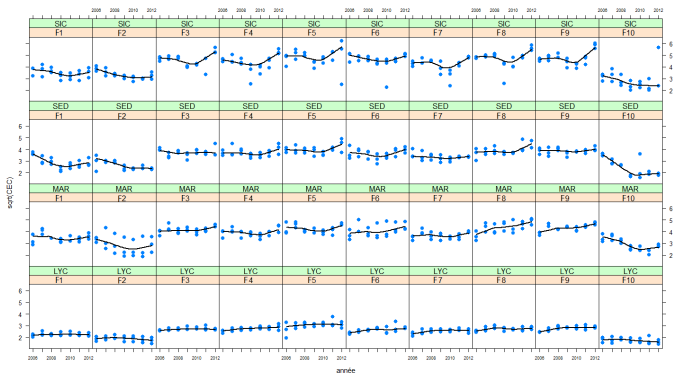


FIGURE :  $\sqrt{(CEC)}$  dans le temps selon le site et la fertilisation, et courbe lissée loess.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

- Fonction de lissage temporel par fertilisation,  $f_{2i}$  ;
- Effet fixe du site ;
- Pas d'effet croisé de la fertilisation et du site.

## Le modèle retenu

$$\sqrt{(CEC)_{ijt}} = \mu + fert_i + site_j + f_{2i}(annee_t) + \eta_{ijt} \quad (11)$$

⇒ Noeuds à chaque pas de temps : interpolation lissée par la pénalité.

Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

La teneur en Azote et la CEC des sols

Description des données

La stratégie de modélisation

Le modèle de la teneur en Azote

Le modèle de la CEC

Conclusion

⇒ Autocorrélation des résidus pour une même série.

Condition de stationnarité : processus AR(1)

$$\eta_{ijt} = \phi \eta_{ij(t-1)} + v_{ijt},$$

où  $\mathbb{E}(v_{ijt}) = 0$ ,  $\mathbb{V}(v_{ijt}) = \sigma_v^2$ ,  $\text{cov}(v_{ijt}, v_{ijt'}) = 0$ , et  $|\phi| < 1$ , et ainsi :

$$\text{cor}(\eta_{ijt}, \eta_{ijt'}) = \begin{cases} 1 & \text{si } t = t' \\ \phi^{|t-t'|} & \text{sinon.} \end{cases}$$

⇒ Variabilité différente selon le site.

Hétérogénéité des variances intra-site

$$\mathbb{V}(\eta_{ijt}) = \sigma_j^2, \text{ pour } j = 1, \dots, 4.$$

Sommaire

Introduction

Le rendement fourrager

La teneur en Azote et la CEC des sols

Description des données

La stratégie de modélisation

Le modèle de la teneur en Azote

Le modèle de la CEC

Conclusion

## Validité du modèle

- Homogénéité des variances résiduelles ;
- Normalité des résidus.

## Résultats

- $\hat{\phi} = 0.472$

AIC	RMSE	MAPE (%)	$R_{aj}^2$
771.86	3.27	20.89	0.833

- Sommaire
- Introduction
- Le rendement fourrager
- La teneur en Azote et la CEC des sols
- Description des données
- La stratégie de modélisation
- Le modèle de la teneur en Azote
- Le modèle de la CEC
- Conclusion

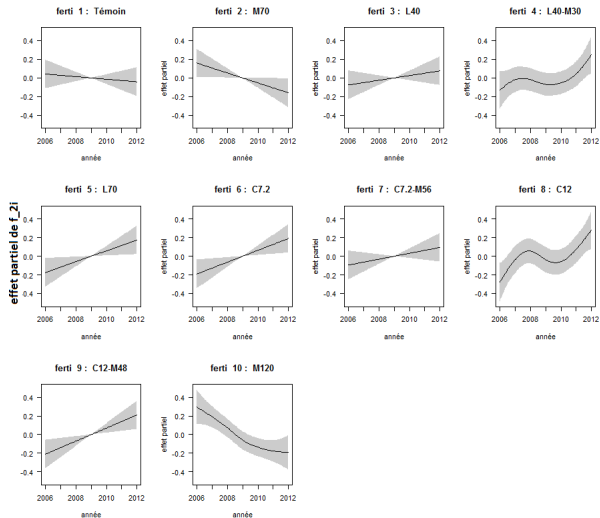


FIGURE : Fonctions de régression partielles estimées sur  $\sqrt{(CEC)}$  selon l'année. 44/50

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

Variabilité des effets de certaines fertilisations sur la CEC.

- Stabilité de  $F3$  (lisier),  $F4$  (lisier+min.) et  $F7$  (compost+min.) ;
- Tendance décroissante linéaire et quasi-linéaire avec  $F2$  et  $F10$  (minérales) ;
- Tendance croissante linéaire pour  $F5$  (lisier),  $F6$  (compost faible) et  $F9$  (compost élevé+min.) ;
- $F8$  (compost élevé) : augmentation en deux temps.

⇒ Augmentation de la CEC avec les engrais organiques.

⇒ Diminution avec les engrais minéraux.

Sommaire

Introduction

Le rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Description  
des données

La stratégie  
de  
modélisation

Le modèle  
de la teneur  
en Azote

Le modèle  
de la CEC

Conclusion

## Comparaisons des engrais

Effet de toutes les fertilisations p.r. au témoin :

- Effets - des fertilisations minérales (*F2* et *F10*) ;
- Effets + des engrais organiques et mixtes ;
- Supériorité de *F5* (lisier), *F8* (compost) et *F9* (compost élevé+min.).

## Comparaisons des sites

- CEC significativement inférieure au LYCEE ;
- CEC supérieure à SICALAIT p.r. aux autres sites ;

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

## 1 Introduction

## 2 Le rendement fourrager

- Description des données
- Trois structures de covariance usuelles
- Le site de SICALAIT
- Les quatre sites
- Interprétation agronomique des résultats

## 3 La teneur en Azote et la CEC des sols

- Description des données
- La stratégie de modélisation
- Le modèle de la teneur en Azote
- Le modèle de la CEC

## 4 Conclusion



Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

Comparaisons des fertilisations dans de bonnes conditions.

## Le rendement fourrager

- Andosols : substitution des engrais minéraux par du lisier ;
- Sableux : pas de différence entre le compost et les engrais minéraux.

## La teneur en Azote

- Supériorité des engrais de type lisier sur tous les sols ;
- Impact faible ou négatif des fertilisations minérales.

## La CEC

- Importance de l'effet positif des fertilisations organiques ;
- Diminution de la CEC avec les engrais minéraux.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

⇒ Engrais minéraux : impact négatif à plus long terme ?

## Améliorations possibles

- Modèle global : lien entre le rendement et la composition du sol ;
- Prise en compte des espèces fourragères (% de recouvrement) ;

⇒ Valorisation des effluents d'élevage : diminution de l'importation d'intrants pour l'agriculture.

Sommaire

Introduction

Le  
rendement  
fourrager

La teneur en  
Azote et la  
CEC des sols

Conclusion

# Merci pour votre attention.