



Une méta-analyse pour évaluer l'impact des pratiques agricoles sur les émissions de gaz à effet de serre

Aurore Philibert & David Makowski

INRA, UMR Agronomie, Thiverval-Grignon
17 juin 2011, AppliBUGS, Paris



Contexte

Emissions de gaz à effets de serre

Coefficient d'émission du GIEC

Equation du GIEC

$$\text{Emission de gaz à effet de serre} = \text{Activity Data (AD)} * \text{Emission factor (EF)}$$

AD = informations sur l'activité humaine (e.g., fertilisation)

EF = coefficients qui permettent de quantifier les émissions ou les absorptions par unité d'activité



- Protoxyde d'azote
- Puissant gaz à effet de serre
- Environ 35% des émissions de N_2O sont d'origine agricole (FAO & IFA, 2003)

Facteur d'émission EF_1

EQUATION 11.1

DIRECT N_2O EMISSIONS FROM MANAGED SOILS (TIER 1)

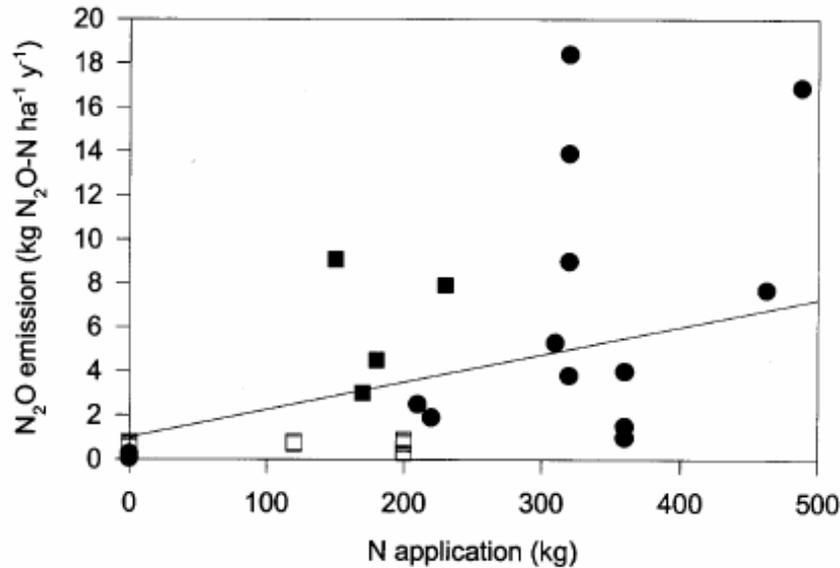
$$N_2O_{Direct-N} = N_2O-N_{Ninputs} + N_2O-N_{OS} + N_2O-N_{PRP}$$

$$N_2O-N_{Ninputs} = \left[\left[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \cdot EF_1 \right] + \left[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR} \cdot EF_{1FR} \right] \right]$$

EF_1 = la quantité de N_2O émise par les différentes applications d'engrais azoté synthétiques et organiques dans les sols, (y compris les résidus de culture et la minéralisation du carbone organique du sol dans les sols minéraux en raison du changement d'affectation ou de gestion)

≈ Pourcentage d'engrais azoté transformé en N_2O

Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories



$$N_2O = 1 + 0.0125 \times \text{Dose}$$

Facteur d'émission : **1.25%**
(Bouwman, 1996)

TABLE 4.17
UPDATED DEFAULT EMISSION FACTORS TO ESTIMATE DIRECT N₂O EMISSIONS FROM AGRICULTURAL SOILS

Emission Factor	IPCC Default Value (EF ₁ in kg N ₂ O-N/kg N) (EF ₂ in kg N ₂ O-N/ha-yr)	Updated Default Value (EF ₁ in kg N ₂ O-N/kg N) (EF ₂ in kg N ₂ O-N/ha-yr)
EF ₁ for F _{SN}	1.25%	No Change
EF ₁ for F _{SN} when applied to fields already receiving organic fertiliser/animal manure (applied or grazing)	1.25%	No Change
EF ₁ for F _{AM}	1.25%	No Change
EF ₁ for F _{BN}	1.25%	No Change
EF ₁ for F _{CR}	1.25%	No Change
EF ₂ for Mid-Latitude Organic Soils	5	8
EF ₂ for Tropical Organic Soils	10	16

Source: IPCC Guidelines, Klemetsson *et al.* (1999), Clayton *et al.* (1997).

Workbook (Volume 2)
§Agriculture Pages 21-40

2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse gas inventories

Recalculé par Stehfest and Bouwman (2006) à **1%** avec une gamme d'incertitude de 0.003-0.03

TABLE 11.1
DEFAULT EMISSION FACTORS TO ESTIMATE DIRECT N₂O EMISSIONS FROM MANAGED SOILS

Emission factor	Default value	Uncertainty range
EF ₁ for N additions from mineral fertilisers, organic amendments and crop residues, and N mineralised from mineral soil as a result of loss of soil carbon [kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹]	0.01	0.003 - 0.03
EF _{1FR} for flooded rice fields [kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹]	0.003	0.000 - 0.006
EF _{2CG, Temp} for temperate organic crop and grassland soils (kg N ₂ O-N ha ⁻¹)	8	2 - 24
EF _{2CG, Trop} for tropical organic crop and grassland soils (kg N ₂ O-N ha ⁻¹)	16	5 - 48
EF _{2F, Temp, Org R} for temperate and boreal organic nutrient rich forest soils (kg N ₂ O-N ha ⁻¹)	0.6	0.16 - 2.4
EF _{2F, Temp, Org P} for temperate and boreal organic nutrient poor forest soils (kg N ₂ O-N ha ⁻¹)	0.1	0.02 - 0.3
EF _{2F, Trop} for tropical organic forest soils (kg N ₂ O-N ha ⁻¹)	8	0 - 24
EF _{3PRP, CFP} for cattle (dairy, non-dairy and buffalo), poultry and pigs [kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹]	0.02	0.007 - 0.06
EF _{3PRP, SO} for sheep and 'other animals' [kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹]	0.01	0.003 - 0.03

Sources:
EF₁: Bouwman et al. 2002a,b; Stehfest & Bouwman, 2006; Novoa & Tejada, 2006 in press; EF_{1FR}: Akiyama et al., 2005; EF_{2CG, Temp}, EF_{2CG, Trop}, EF_{2F, Temp}: Klemmedtsson et al., 1999, IPCC Good Practice Guidance, 2000; EF_{2F, Temp}: Alm et al., 1999; Laine et al., 1996; Martikainen et al., 1995; Minkinen et al., 2002; Regina et al., 1996; Klemmedtsson et al., 2002; EF_{3, CFP}, EF_{3, SO}: de Klein, 2004.

- Volume 4: Agriculture, forestry and other land use
- Chapitre 11: N₂O emissions from managed soils and CO₂ emission from lime and urea application

Notre objectif

- Ré-estimer le facteur d'émission (1%) avec une approche par modèles hiérarchiques fréquentistes et Bayésiens.
- Quantifier la variabilité inter-études ainsi que l'incertitude de ce facteur d'émission

Objectif secondaire

- Expliquer la variabilité du facteur d'émission avec d'autres variables explicatives
- Problème : variables explicatives avec des données manquantes

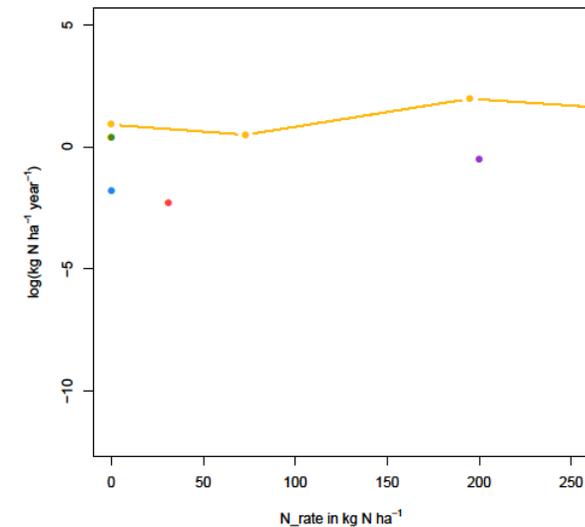
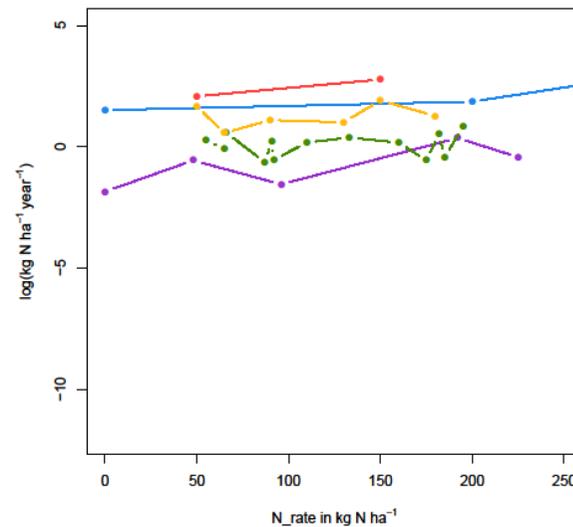
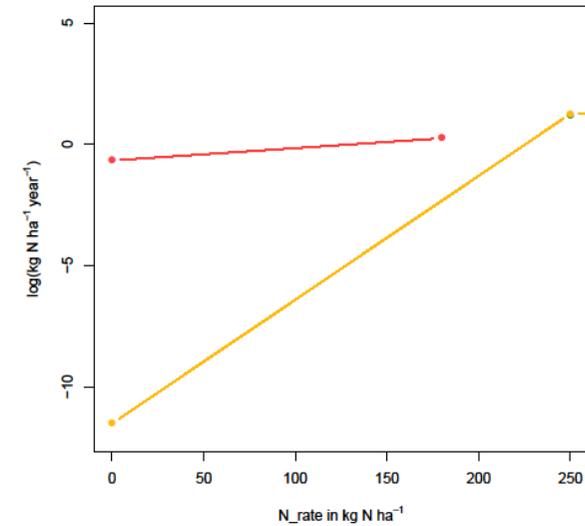
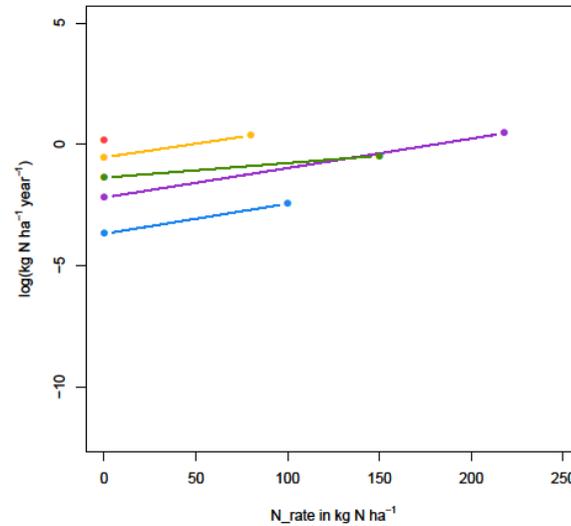
Jeu de données

(1067 observations – 210 études)

Nom variable	Type	Nombre données manquantes
Référence (numéro de l'étude)	qualitatif	0
Dose d'engrais azoté	quantitatif	0
Mesure de N ₂ O	quantitatif	0
Climat	qualitatif	0
Type de sol (plusieurs)	qualitatif/ quantitatif	> 0
Précipitation annuelle	quantitatif	750
Type de culture	qualitatif	31
Type d'engrais azoté	qualitatif	308
Durée d'expérimentation	qualitatif	0
Méthode de mesure de N ₂ O	qualitatif	0
Fréquence de mesure de N ₂ O	qualitatif	108

Quelques données

- Abcisse: Dose d'engrais azoté en kg N ha^{-1}
- Ordonnée: $\log(\text{émission de N}_2\text{O en kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1})$
- Plusieurs répétitions des doses d'engrais dans une même étude (non montrées ici)



Modèles hiérarchiques fréquentistes et Bayésiens

Modèles mixtes (1)

$$Y_{ijk} = \alpha_{0i} + \alpha_{1i} \times d_{ij} + \varepsilon_{ijk},$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2) \text{ iid}$$

log(émission de N₂O)

dose d'engrais azoté

i = étude,

j = dose d'engrais azoté,

k = répétition de la dose d'engrais azoté dans une étude

$$\alpha_{0i} \sim N(\mu_{\alpha 0}, \sigma_{\alpha 0}^2)$$

$$\alpha_{1i} \sim N(\mu_{\alpha 1}, \sigma_{\alpha 1}^2)$$

$$\text{cov}(\alpha_{0i}, \alpha_{1i}) = c$$

Modèles mixtes (2)

Numéro du modèle	α_0	α_1	Variable explicative: Dose d'engrais d_{ij}
Modèle 1	fixe	-	non
Modèle 2	fixe	fixe	oui
Modèle 3	aléatoire	-	non
Modèle 4	aléatoire	fixe	oui
Modèle 5	aléatoire	aléatoire	oui

Modèles mixtes (3)

Numéro du modèle	α_0	α_1	Variable explicative: Dose d'engrais d_{ij}
Modèle 1	fixe	-	non
Modèle 2	fixe	fixe	oui
Modèle 3	aléatoire	-	non
Modèle 4	aléatoire	fixe	oui
Modèle 5	aléatoire	aléatoire	oui

	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4	Modèle 5
AIC	4097.7	3912.1	3504.65	3291.33	3255.56
BIC	4107.63	3927.04	3519.57	3311.21	3285.38

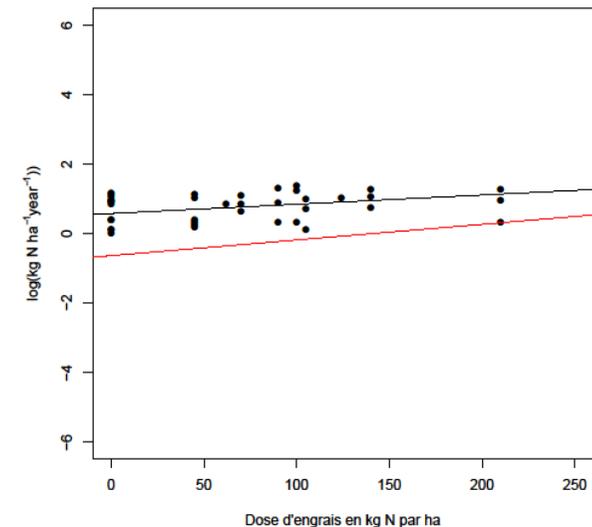
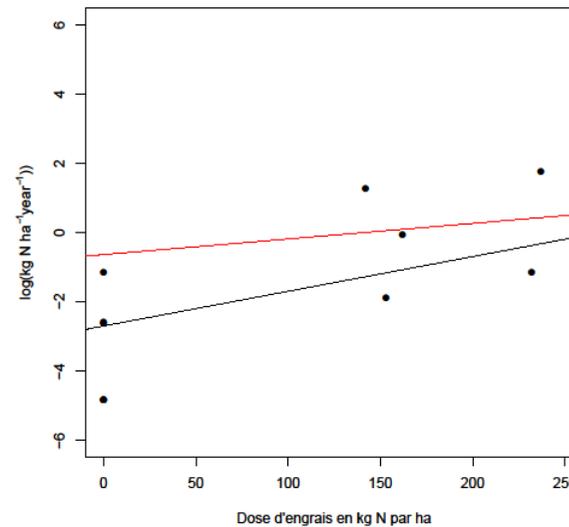
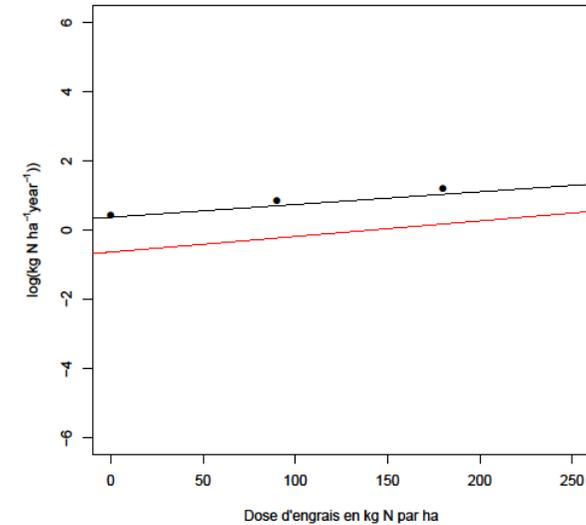
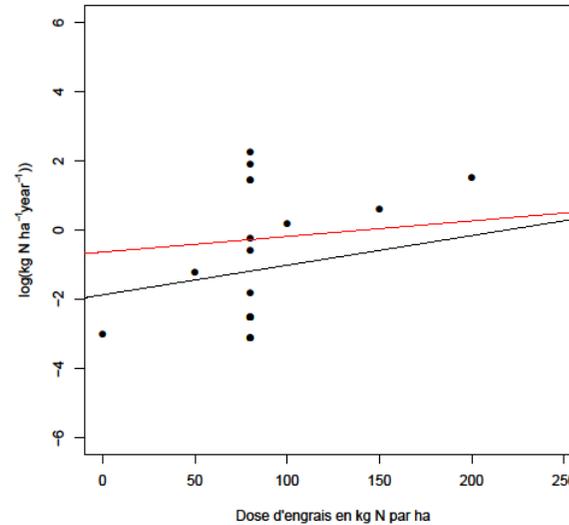
Ajustement du modèle 5 sur quatre études

- Abcisse: Dose d'engrais azoté en kg N ha^{-1}

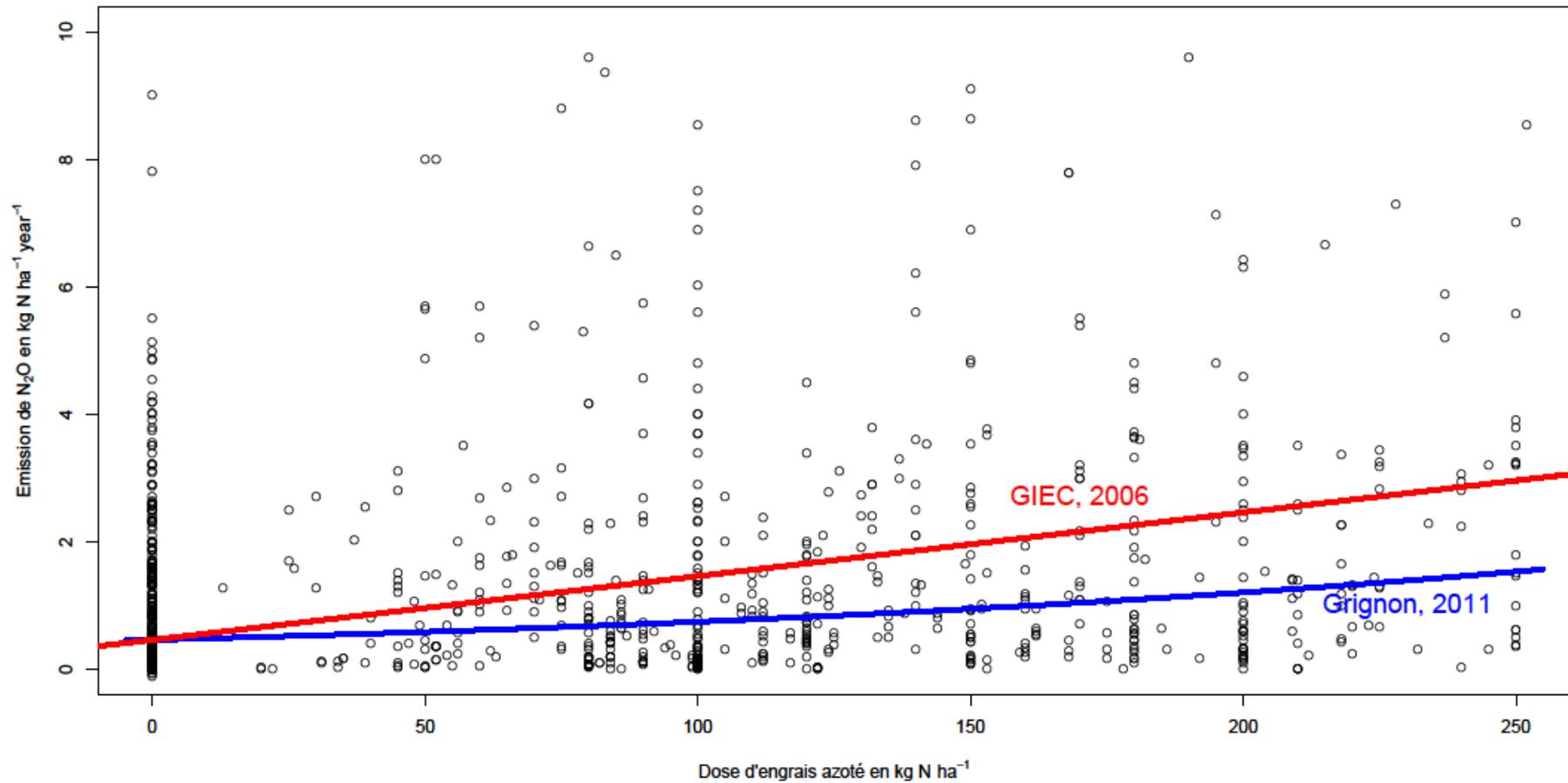
- Ordonnée: $\log(\text{émission de } \text{N}_2\text{O en } \text{kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1})$

- Courbe rouge: estimation moyenne du modèle

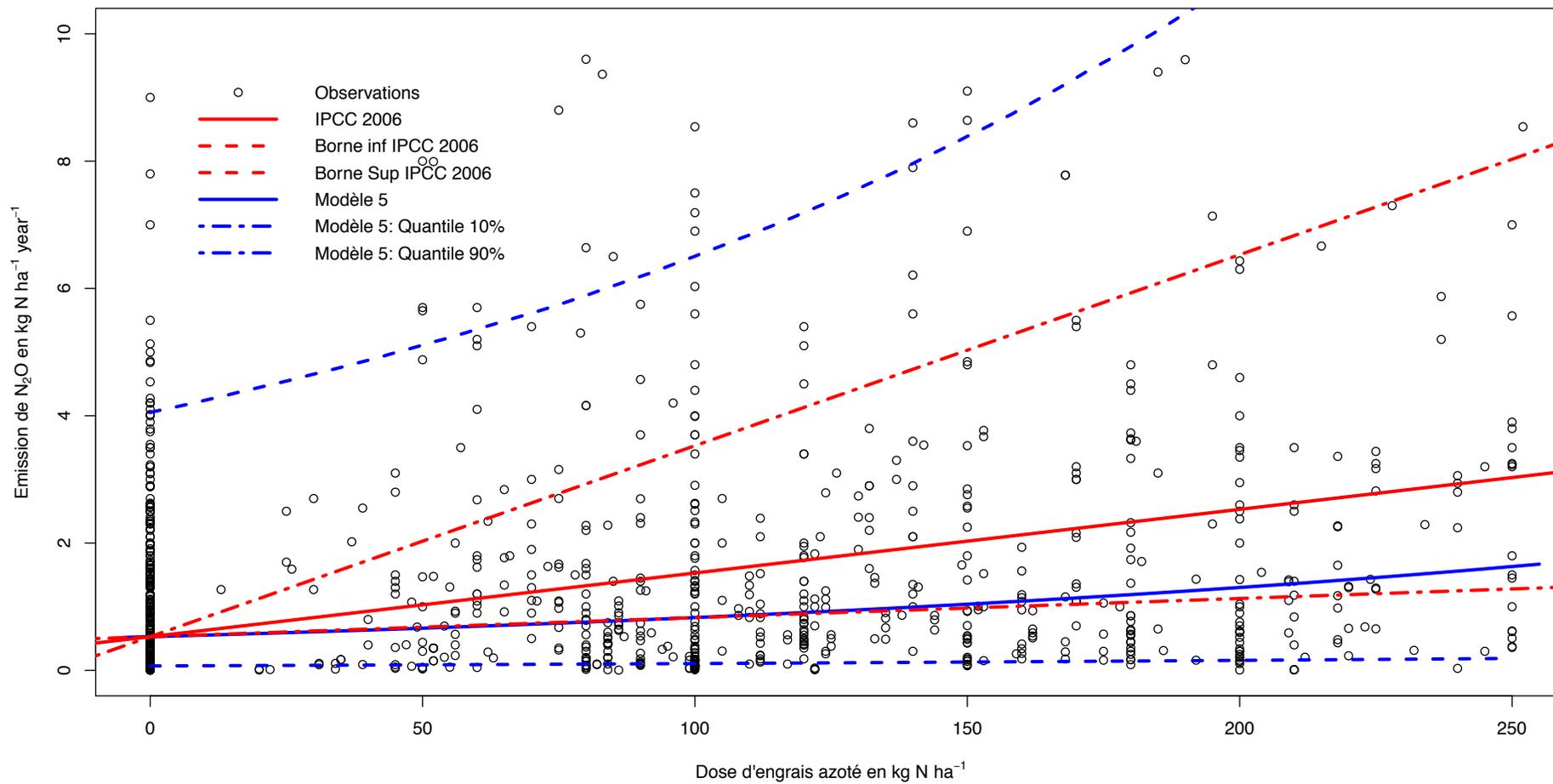
- Courbe noire: estimation du modèle pour chaque étude



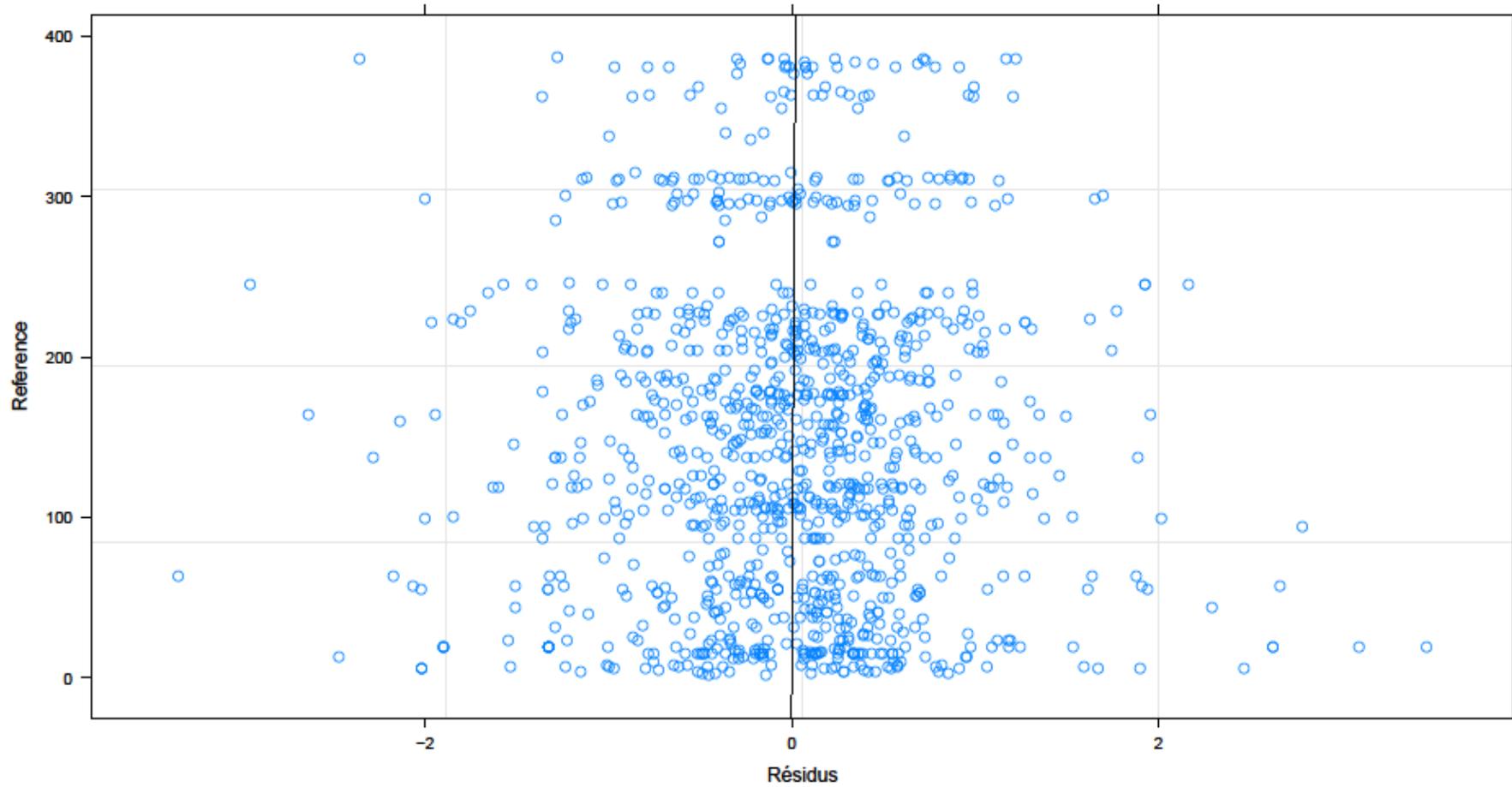
Emission moyenne du modèle 5 vs. Emission du GIEC



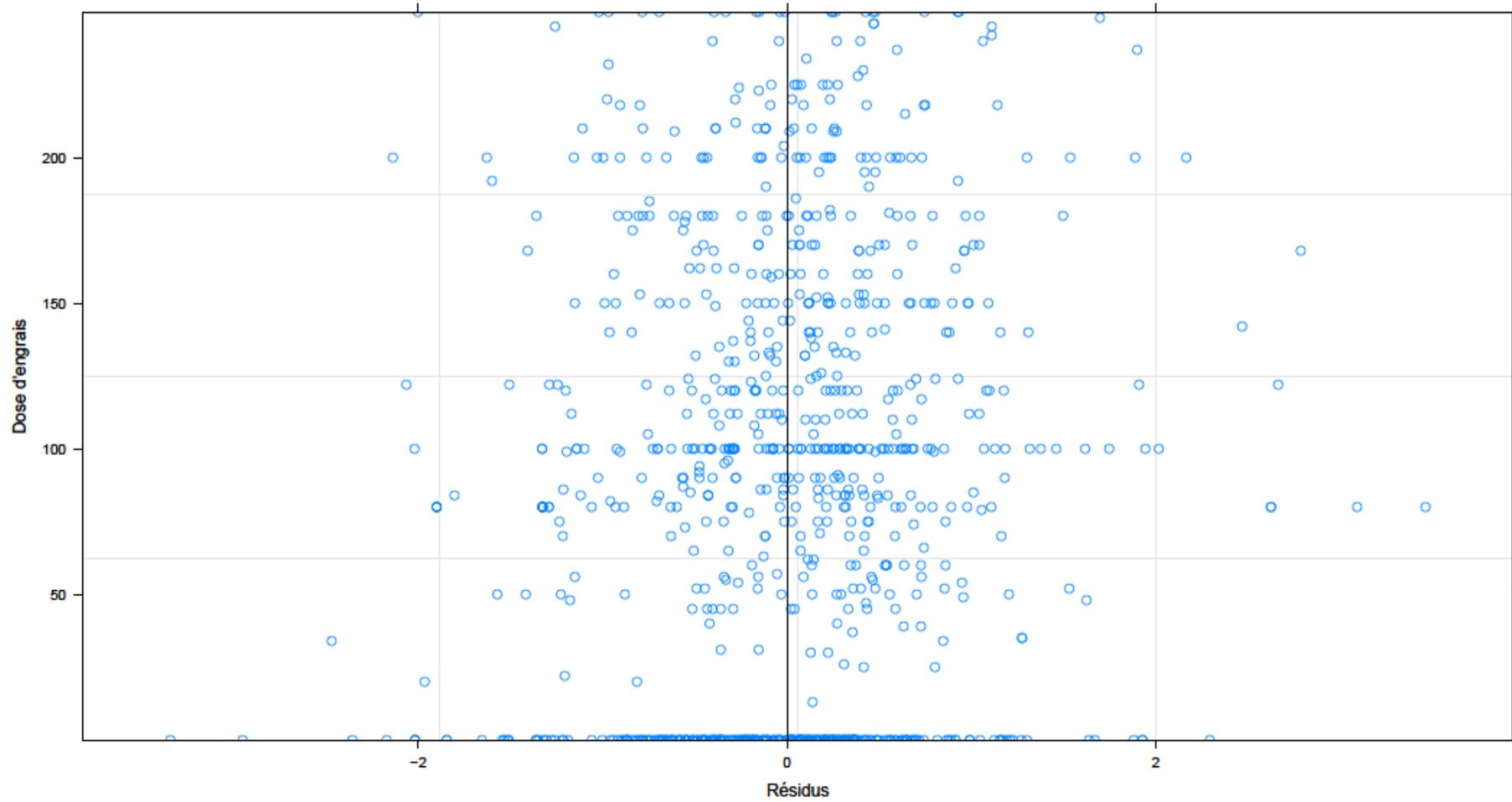
Incertitude Modèle 5 vs. GIEC



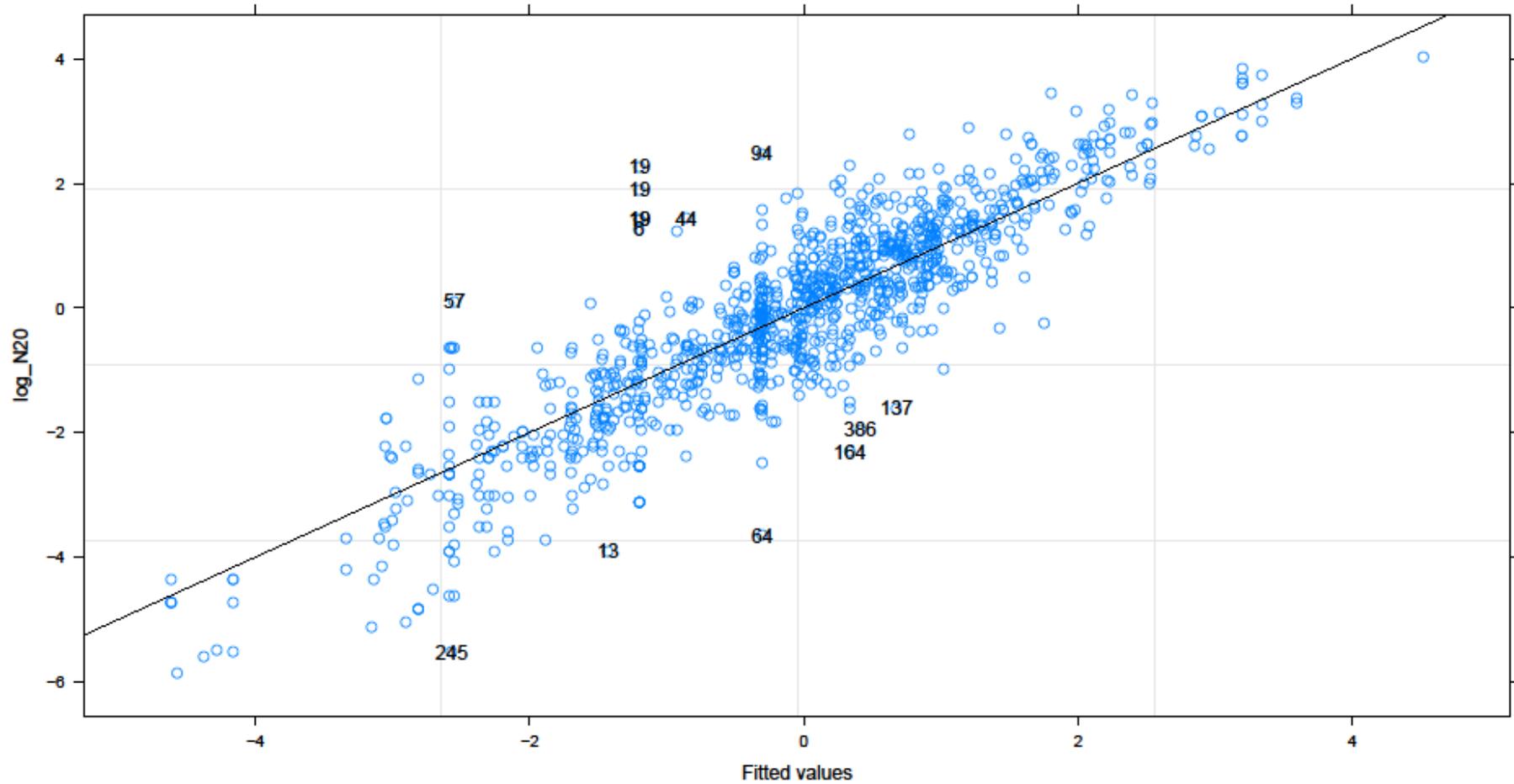
Résidus du modèle 5



Résidus du modèle 5



Modèle 5 vs. observations



Modèles Bayésiens (1)

$$Y_{ijk} = \alpha_{0i} + \alpha_{1i} \times d_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad \varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2) \text{ iid}$$

$$\alpha_{0i} \sim N(\mu_{\alpha 0}, \sigma_{\alpha 0}^2)$$

$$\alpha_{1i} \sim N(\mu_{\alpha 1}, \sigma_{\alpha 1}^2)$$

$$\text{cov}(\alpha_{0i}, \alpha_{1i}) = c$$

Distributions *a priori*

$$\mu_{\alpha 0}, \mu_{\alpha 1}, \alpha_0, \alpha_1 \sim N(0, 1000) \text{ iid} \quad - \text{Loi Normale}$$

$$\sigma, \sigma_{\alpha 0}, \sigma_{\alpha 1} \sim \text{Unif}(0, 100) \text{ iid} \quad - \text{Loi Uniforme}$$

Modèles Bayésiens (2)

Numéro du modèle	α_0	α_1	Variable explicative: Dose d'engrais d_{ij}
Modèle 1B	fixe	-	non
Modèle 2B	fixe	fixe	oui
Modèle 3B	aléatoire	-	non
Modèle 4B	aléatoire	fixe	oui
Modèle 5B	aléatoire	aléatoire	oui

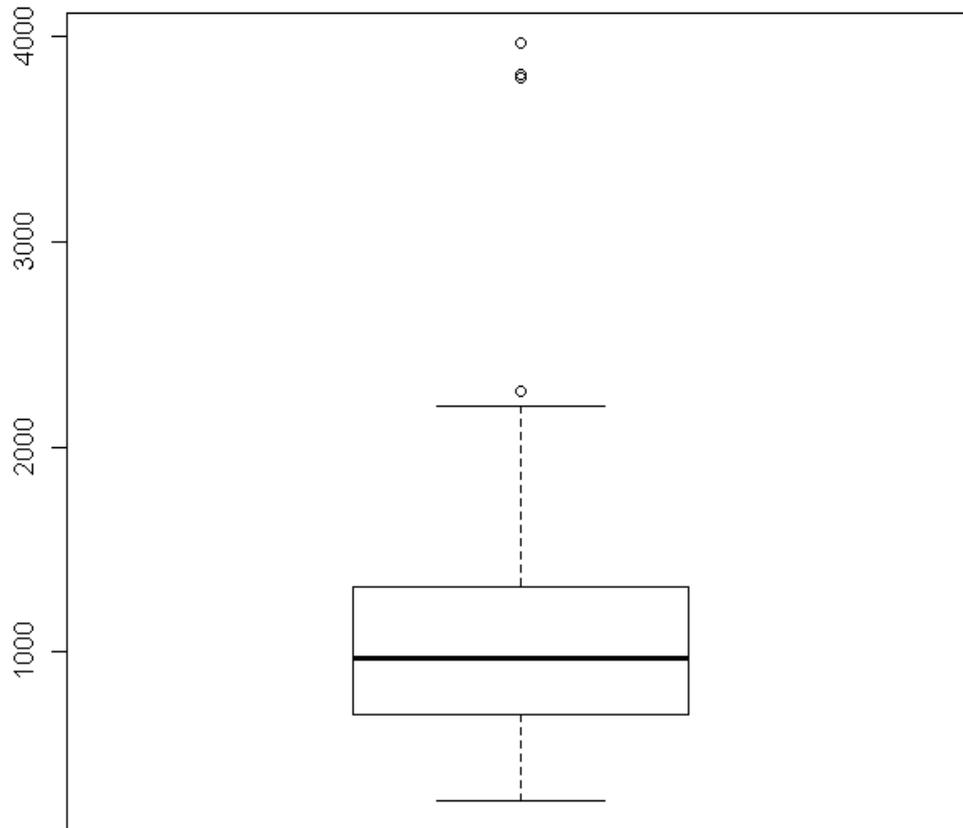
	Modèle 1B	Modèle 2B	Modèle 3B	Modèle 4B	Modèle 5B
DIC	4097.67	3912.13	3227.34	2991.85	2929.14

Valeurs des paramètres Bayésien vs. Fréquentiste

	Modèle 5	Modèle 5B
$\mu_{\alpha 0}$	-0.7732	-0.7594
$\mu_{\alpha 1}$	0.0048	0.00463
$\sigma_{\alpha 0}$	1.4713	1.318
$\sigma_{\alpha 1}$	0.0026	0.0022
σ	0.8540	0.8636

Ajout de la covariable « pluie » contenant des données manquantes

Covariable « pluie »



709 valeurs manquantes
sur 1067.

Modèles Bayésiens (2)

$$Y_{ijk} = \alpha_{0i} + \alpha_{1i} \times d_{ij} + \beta \times \text{Pluie}_i + \varepsilon_{ijk}, \quad \varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2) \text{ iid}$$

$$\text{Pluie}_i \sim N(\eta, \iota^2) \text{ iid}$$

$$\alpha_{0i} \sim N(\mu_{\alpha 0}, \sigma_{\alpha 0}^2)$$

$$\alpha_{1i} \sim N(\mu_{\alpha 1}, \sigma_{\alpha 1}^2)$$

$$\text{cov}(\alpha_{0i}, \alpha_{1i}) = c$$

A priori: $\mu_{\alpha 0}, \mu_{\alpha 1} \sim N(0, 100)$

$$\sigma, \sigma_{\alpha 0}, \sigma_{\alpha 1} \sim U(0, 100)$$

$$\beta, \eta \sim N(0, 10000)$$

$$\iota \sim U(0, 10000)$$

Modèle avec ajout de la covariable « pluie »

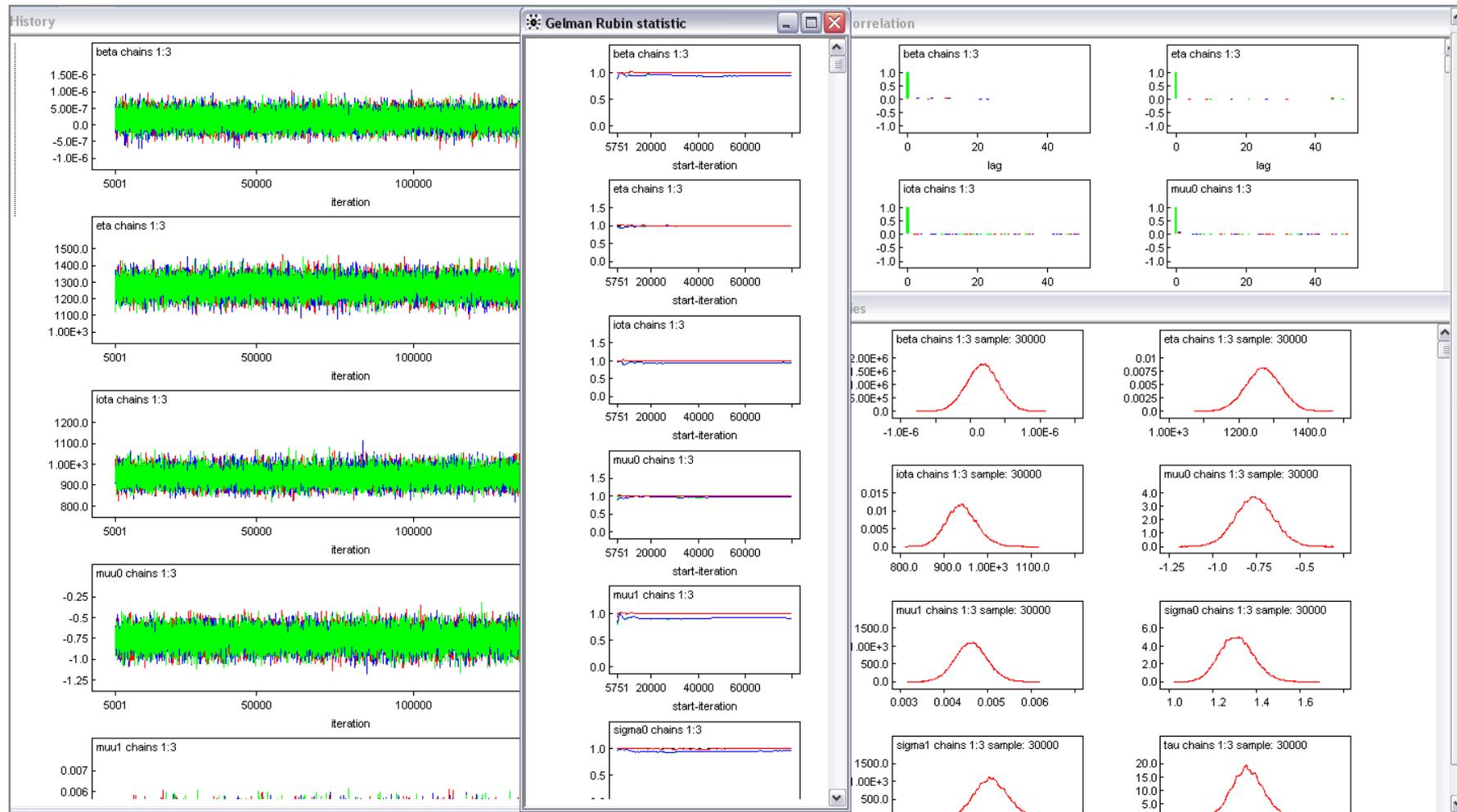
```
MODEL {  
  prec1<-1/(sigma1*sigma1)  
  prec0<-1/(sigma0*sigma0)  
  prectau<-1/(tau*tau)  
  preciota<-1/(iota*iota)  
  for (k in 1:Nreference) {  
    mu0[k]~dnorm(mu00,prec0);  
    mu1[k]~dnorm(mu01,prec1);  
  }  
  for( i in 1:Nobs) {  
    pluie[i]~dnorm(eta,preciota);  
    log_N20[i]~dnorm(mu[i],prectau);  
    mu[i]<-  
    mu0[reference[i]]+mu1[reference[i]]*NRate[i]+  
    beta*((pluie[i]-pluiebar)*NRate[i]);  
  }  
  mu00~dnorm(0,0.001);  
  mu01~dnorm(0,0.001);  
  tau~dunif(0,100);  
  sigma0~dunif(0,100);  
  sigma1~dunif(0,100);  
  beta~dnorm(0,0.00000001);  
  eta~dnorm(0,0.00000001);  
  iota~dunif(0,10000);  
}
```

Initialisation

list

(mu00=0,mu01=0,tau=1,sigma0=1,
sigma1=1,**beta=0,eta=0,iota=1**)

150 000 itérations avec
thin.samples(15)



DIC

Dbar = post.mean of -2logL; Dhat = -2LogL at post.mean of stochastic nodes

	Dbar	Dhat	pD	DIC
log_N20	2711.870	2494.960	216.914	2928.790
pluie	5916.520	5914.530	1.992	5918.510
total	8628.390	8409.490	218.905	8847.300

Node statistics

node	mean	sd	MC error	2.5%	median	97.5%	start	sample
beta	1.738E-7	2.274E-7	1.367E-9	-2.739E-7	1.757E-7	6.182E-7	5001	30000
eta	1271.0	49.92	0.2952	1171.0	1270.0	1368.0	5001	30000
iota	940.1	35.12	0.1915	873.7	939.1	1013.0	5001	30000
muu0	-0.7586	0.109	6.551E-4	-0.9722	-0.7595	-0.5431	5001	30000
muu1	0.00462	3.684E-4	2.743E-6	0.003906	0.004616	0.005357	5001	30000
sigma0	1.312	0.07931	4.669E-4	1.166	1.31	1.477	5001	30000
sigma1	0.002078	3.745E-4	3.442E-6	0.001369	0.002069	0.002838	5001	30000
tau	0.863	0.02208	1.386E-4	0.8207	0.8624	0.9077	5001	30000

Conclusions

- Modélisation de la variabilité inter études
- Différences importantes avec les valeurs utilisées par le GIEC
- Le Bayésien permet d' utiliser toutes nos observations en gérant les données manquantes des covariables.

Perspectives

- Covariables qualitatives
- Exemple: type de culture