

# Méthodes de méta-analyse pour l'estimation des émissions de N<sub>2</sub>O par les sols agricoles

Aurore Philibert  
Applibugs : 20 décembre 2012

# Plan

- Qu'est-ce que la méta-analyse ?
- Pourquoi le N<sub>2</sub>O ?
- Utilisation de modèles hiérarchiques pour estimer les émissions de N<sub>2</sub>O
- Conclusions

# Plan

- Qu'est-ce que la méta-analyse ?
- Pourquoi le N<sub>2</sub>O ?
- Utilisation de modèles hiérarchiques pour estimer les émissions de N<sub>2</sub>O
- Conclusions

# Meta-analyse : définition

- Analyse **statistique** d'un large ensemble de résultats provenant d'études individuelles  
(Glass, 1976)

# Méta-analyse : démarche

1. Définir l'objectif et la variable d'intérêt

# Méta-analyse : démarche

## 1. Définir l'objectif et la variable d'intérêt

Ex : ratio entre les rendements en Agriculture Biologique et conventionnelle

# Méta-analyse : démarche

## 1. Définir l'objectif et la variable d'intérêt

Ex : ratio entre les rendements en Agriculture Biologique et conventionnelle

## 2. Synthèse de données publiées : identification, sélection et extraction des données

# Méta-analyse : démarche

## 1. Définir l'objectif et la variable d'intérêt

Ex : ratio entre les rendements en Agriculture Biologique et conventionnelle

## 2. Synthèse de données publiées : identification, sélection et extraction des données

Ex : tous les articles publiés comparant les rendements de cultures en Agriculture Biologique et en agriculture conventionnelle



# Méta-analyse : démarche

## 1. Définir l'objectif et la variable d'intérêt

Ex : ratio entre les rendements en Agriculture Biologique et conventionnelle

## 2. Synthèse de données publiées : identification, sélection et extraction des données

Ex : tous les articles publiés comparant les rendements de cultures en Agriculture Biologique et en agriculture conventionnelle

## 3. Evaluation du biais de publication

# Méta-analyse : démarche

## 1. Définir l'objectif et la variable d'intérêt

Ex : ratio entre les rendements en Agriculture Biologique et conventionnelle

## 2. Synthèse de données publiées : identification, sélection et extraction des données

Ex : tous les articles publiés comparant les rendements de cultures en Agriculture Biologique et en agriculture conventionnelle

## 3. Evaluation du biais de publication

## 4. Analyse statistique : variabilité inter-études, hétérogénéité des données,...

# Méta-analyse : démarche

## 1. Définir l'objectif et la variable d'intérêt

Ex : ratio entre les rendements en Agriculture Biologique et conventionnelle

## 2. Synthèse de données publiées : identification, sélection et extraction des données

Ex : tous les articles publiés comparant les rendements de cultures en Agriculture Biologique et en agriculture conventionnelle

## 3. Evaluation du biais de publication

## 4. Analyse statistique : variabilité inter-études, hétérogénéité des données,...


## 5. Présentation des résultats et du niveau d'incertitude

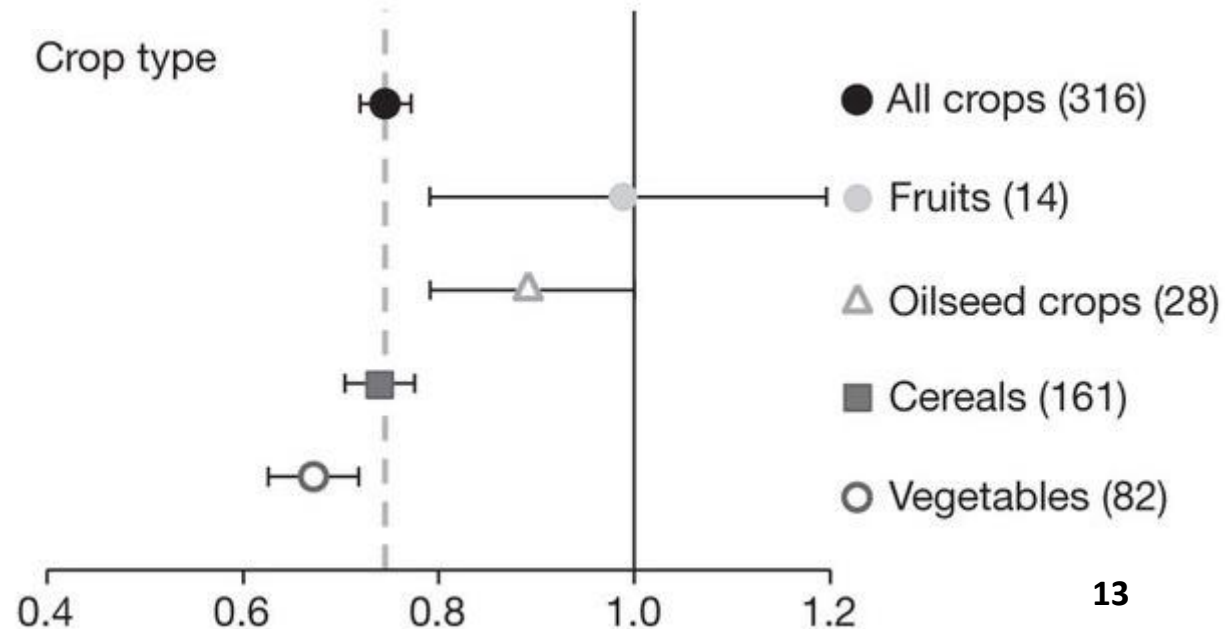
# Meta-analyse : Utilisation

- Première méta-analyse : en médecine Karl Pearson, 1904
- Médecine : 8 fois plus de méta-analyses publiées en 16 ans, de 1990 à 2006 (Sutton et Higgins, 2008)
- Ecologie : + 25% par an de méta-analyses publiées entre 1991 et 2008 (Cadotte et al., 2012)

# Méta-analyse : ex. d'application en agronomie

• Objectif :  
comparer les rendements des cultures en Agriculture Biologique vs conventionnelle

- Mesure :  $\frac{rdt_{bio}}{rdt_{conv}}$
- Intervalle de confiance à 95% : 



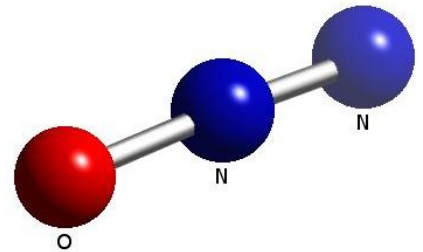
(Seufert et al., 2012)

# Plan

- Qu'est-ce que la méta-analyse ?
- Pourquoi le N<sub>2</sub>O ?
- Utilisation de modèles hiérarchiques pour estimer les émissions de N<sub>2</sub>O
- Conclusions

# Protoxyde d'azote - N<sub>2</sub>O

- Présent en faible quantité dans l'atmosphère
- Pouvoir de réchauffement 298 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub> sur une période de 100 ans (IPCC, 2007)
- Durée de vie dans l'atmosphère : 114 ans
- Puissant gaz à effet de serre



# Emissions de N<sub>2</sub>O - Agriculture

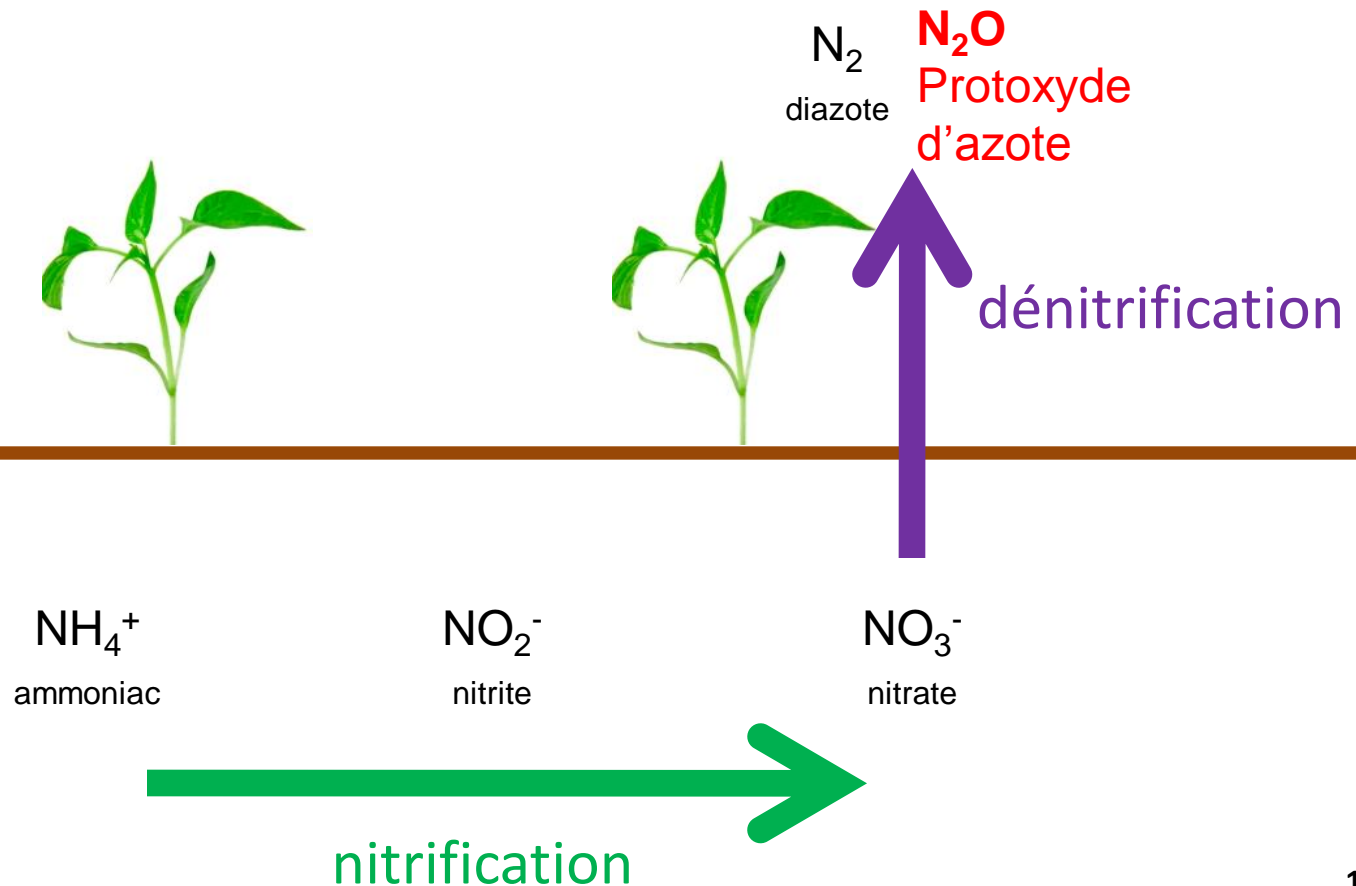
- Émissions N<sub>2</sub>O secteur agricole ≈ 60% des émissions de N<sub>2</sub>O dues aux activités humaines (IPCC, 2007)
- Émissions de N<sub>2</sub>O : principal levier de réduction des émissions de gaz à effet de serre résultant d'activités agricoles (Baumert et al., 2005)
- Caractéristique : forte variabilité spatiale et temporelle (Gu et al., 2012)



# Emissions de $N_2O$

- Dues aux processus de nitrification et dénitrification

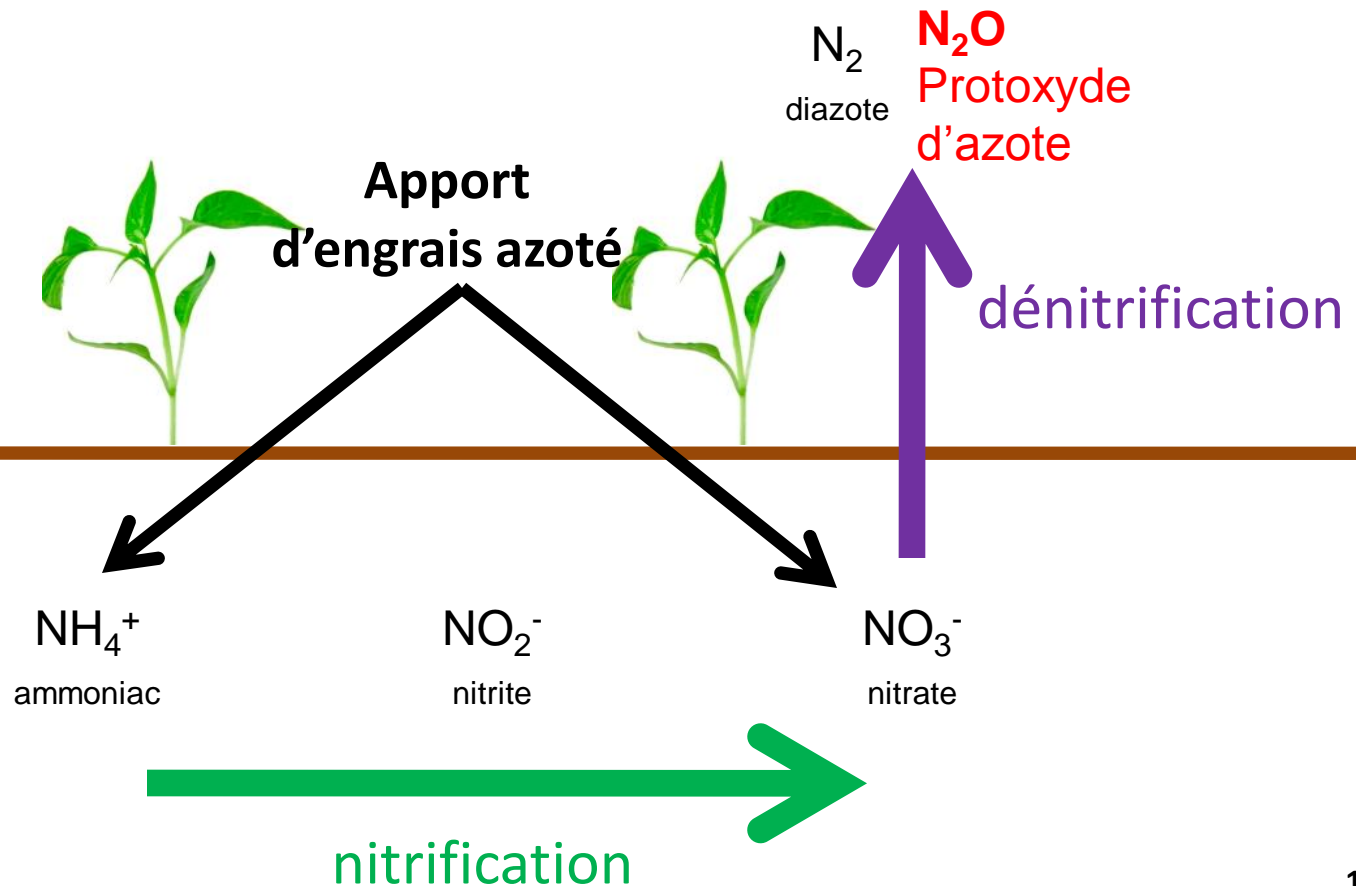
(Hénault et al., 2012)



# Emissions de $N_2O$ – Fertilisation N

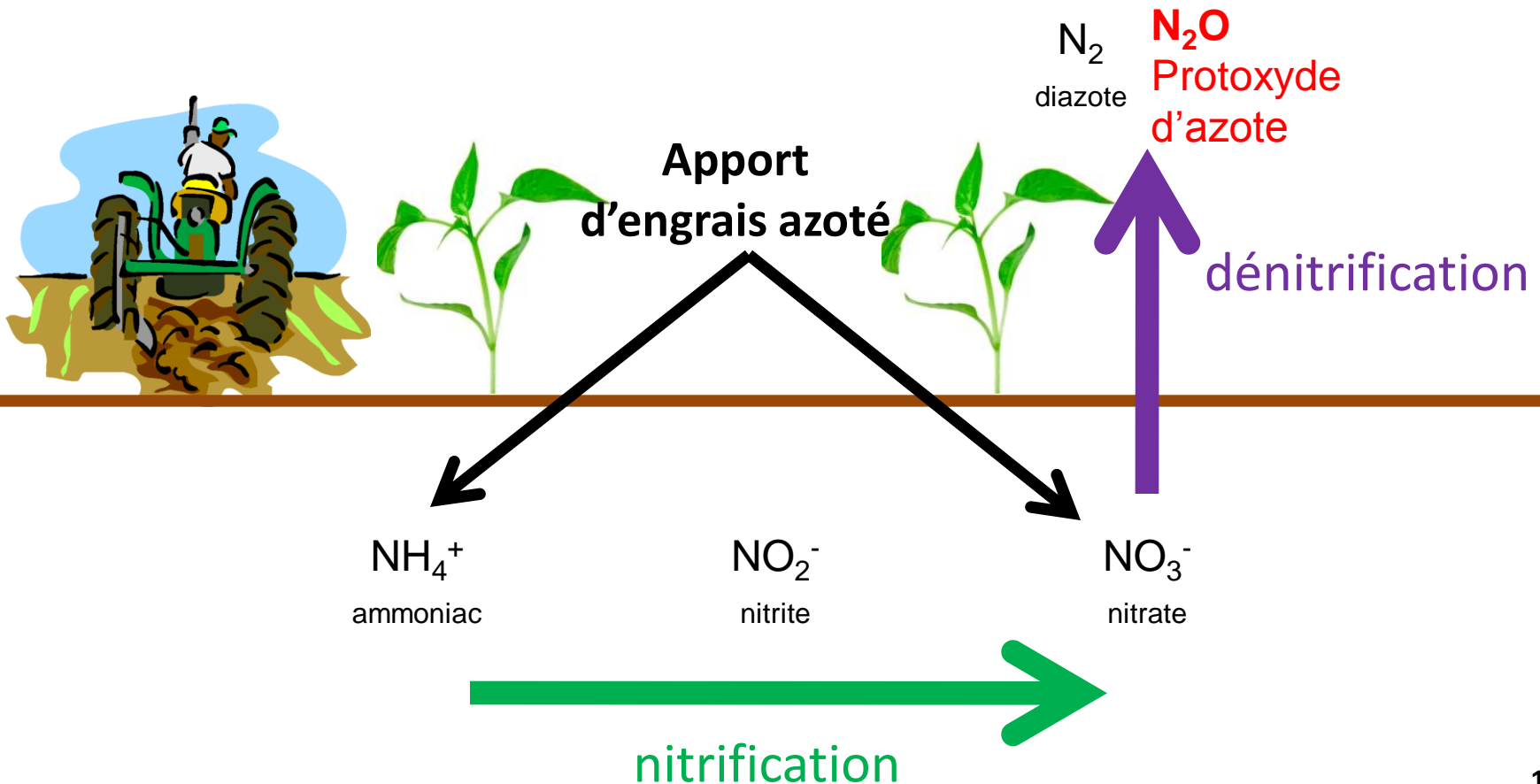
- Principal facteur : fertilisation azotée (N)

(Davidson, 2009; Mosier et al., 1998; Snyder et al., 2009)



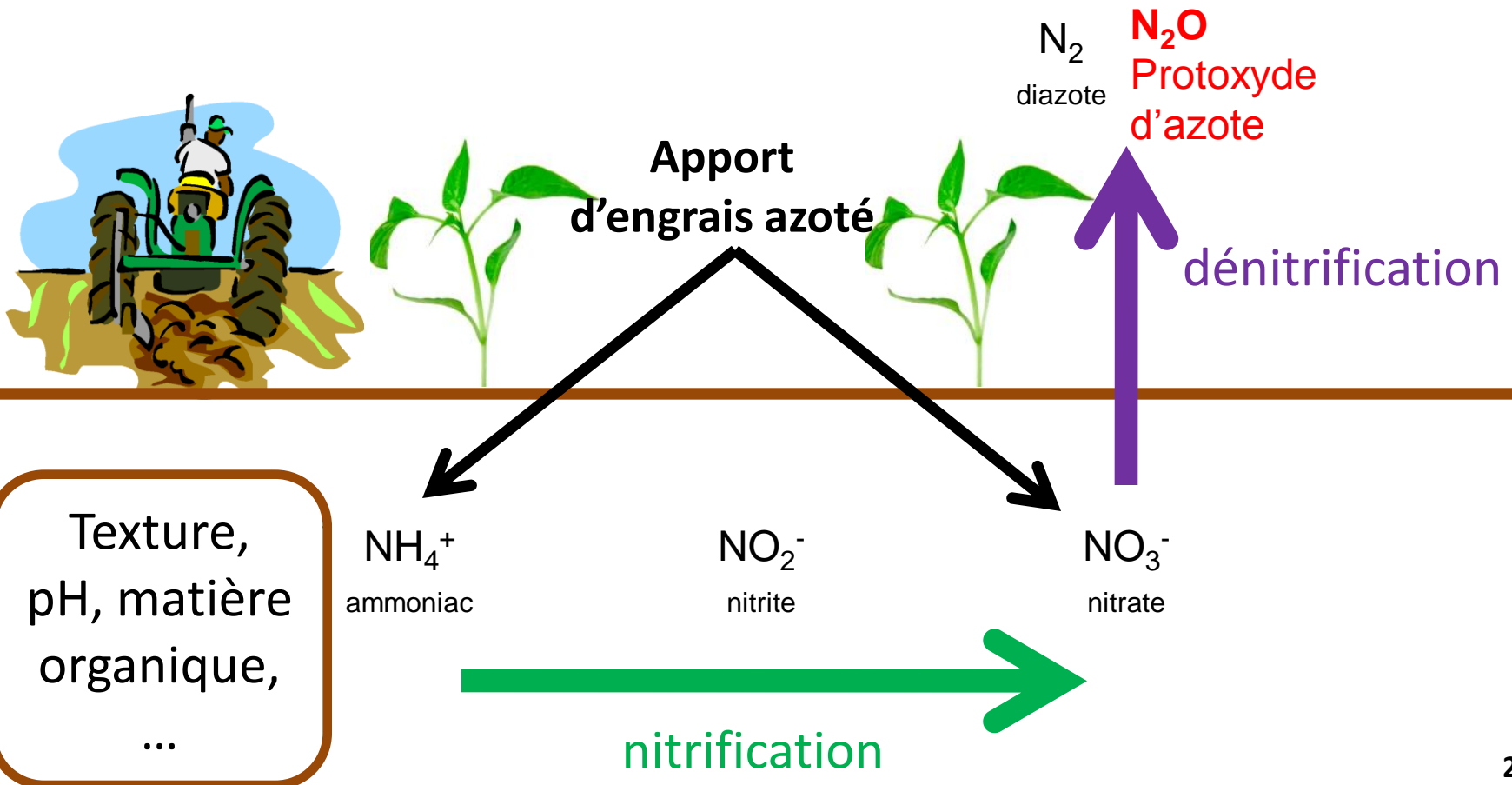
# Emissions de $N_2O$ – Pratiques

- Effet d'autres choix techniques :  
ex : labour (Rochette, 2008), ...



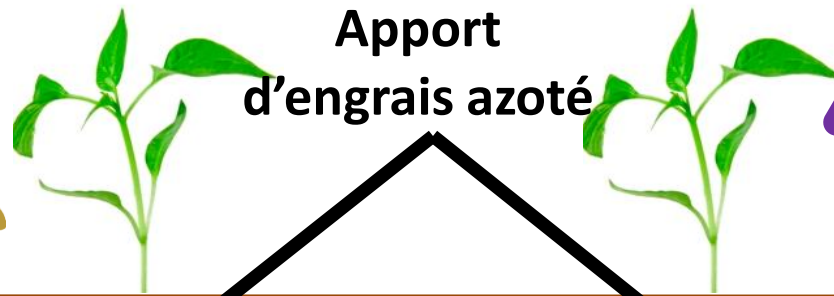
# Emissions de $N_2O$ – Sol

- Effet des caractéristiques de sol



# Emissions de $N_2O$ – Climat

- Effet du climat :  
précipitations (Skiba et Smith, 2000),...



Apport  
d'engrais azoté

$N_2$   
diazote

$N_2O$   
Protoxyde  
d'azote

dénitrification

Texture,  
pH, matière  
organique,  
...

$NH_4^+$   
ammoniac

$NO_2^-$   
nitrite

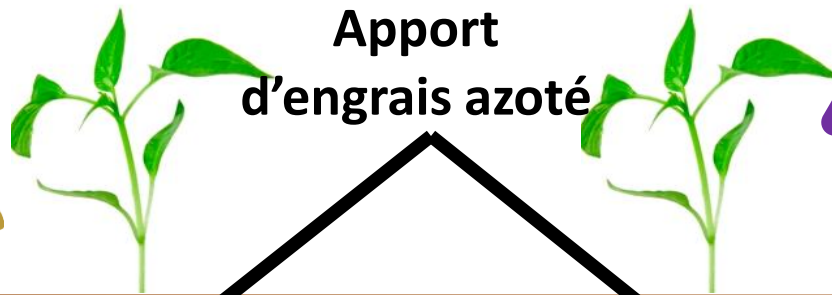
$NO_3^-$   
nitrate

nitrification

# Emissions de N<sub>2</sub>O – Protocole

- Effet du protocole expérimental

Durée d'expé, nb de mesures, ...



Apport  
d'engrais azoté

N<sub>2</sub>  
diazote

N<sub>2</sub>O  
Protoxyde  
d'azote

dénitrification

Texture,  
pH, matière  
organique,  
...

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>  
ammoniac

NO<sub>2</sub><sup>-</sup>  
nitrite

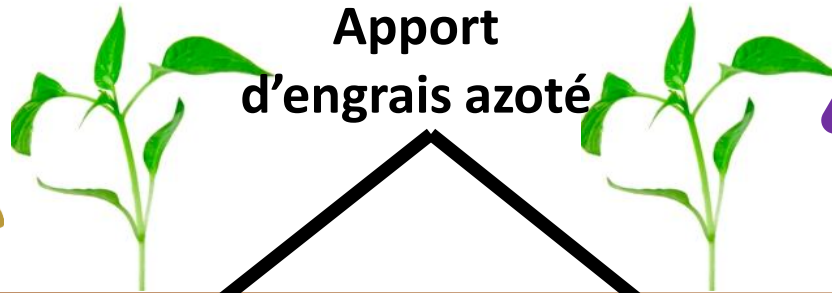
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>  
nitrate

nitrification

# Emissions de $N_2O$ – Type de culture

- Effet du type de culture

Durée d'expé, nb de mesures, ...



Apport  
d'engrais azoté

$N_2$   
diazote

$N_2O$   
Protoxyde  
d'azote

dénitrification

Texture,  
pH, matière  
organique,  
...

$NH_4^+$   
ammoniac

$NO_2^-$   
nitrite

$NO_3^-$   
nitrate

Légumineuse,  
céréale,...

nitrification

# Plan

- Qu'est-ce que la méta-analyse ?
- Pourquoi le N<sub>2</sub>O ?
- Utilisation de modèles hiérarchiques pour estimer les émissions de N<sub>2</sub>O
- Conclusions



# Trois parties

1. Modèles hiérarchiques **sans** la dose d'azote apportée pour les cultures de **légumineuses**
2. Modèles hiérarchiques **avec** la dose d'azote apportée pour une large gamme de cultures
3. Modèles hiérarchiques **avec** la dose d'azote apportée, ajustés aux **caractéristiques locales** (climat, type de sol,...)

# Trois parties

1. Modèles hiérarchiques **sans** la dose d'azote apportée pour les cultures de **légumineuses**
2. Modèles hiérarchiques **avec** la dose d'azote apportée pour une large gamme de cultures
3. Modèles hiérarchiques **avec** la dose d'azote apportée, ajustés aux **caractéristiques locales** (climat, type de sol,...)

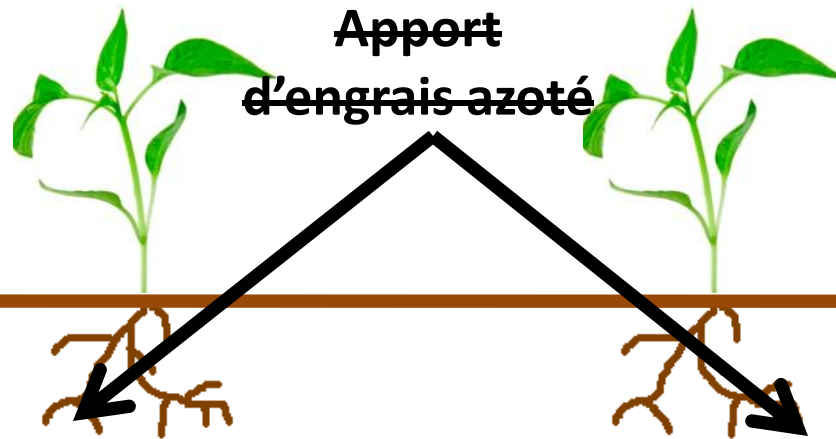
# Emissions de $N_2O$ - Légumineuses

- Fixation de l'azote atmosphérique

$N_2$   
(azote dans  
l'atmosphère)

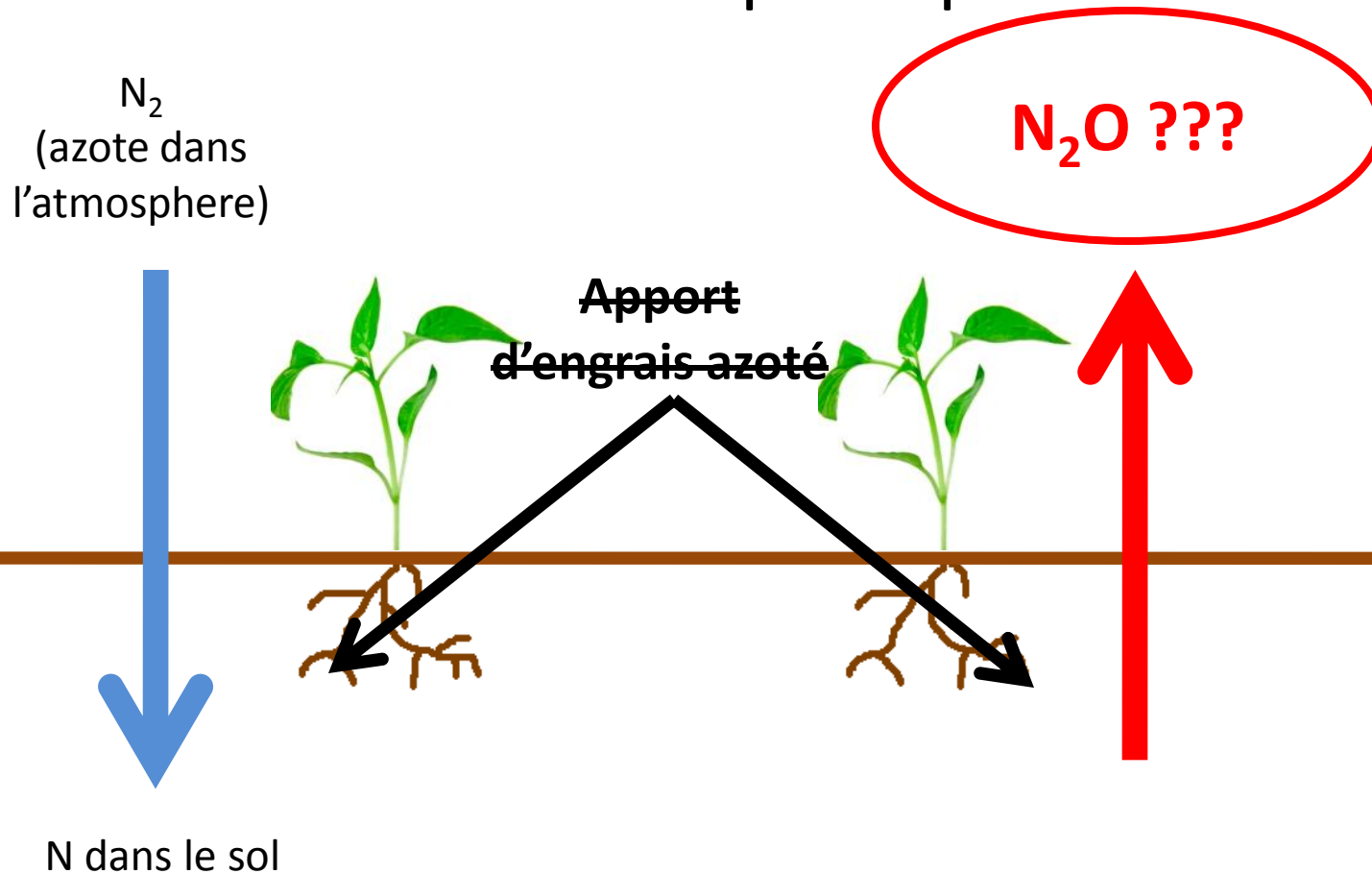


N dans le sol



# Emissions de $N_2O$ - Légumineuses

- Fixation de l'azote atmosphérique



# Questions

- *Les émissions dépendent-elles du type de légumineuse ?*
- *Existe-t-il un effet du site d'expérimentation ?*

# Données : Rochette et Janzen (2005)

1 to 5 obs. par site

Variables explicatives

kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>

Reference	Location	Crop	N <sub>2</sub> O emission
Duxbury et al. (1982)	New York, USA	Alfalfa	2.3
Duxbury et al. (1982)	New York, USA	Alfalfa	4.2
MacKenzie et al. (1998)	Montréal, Canada	Alfalfa	2
MacKenzie et al. (1998)	Montréal, Canada	Alfalfa	2.83
MacKenzie et al. (1998)	Montréal, Canada	Alfalfa	4.57
Robertson et al. (2000)	East Lansing, USA	Alfalfa	3.5
Rochette et al. (2004)	Québec City Canada	Alfalfa	1.45
Rochette et al. (2004)	Québec City Canada	Alfalfa	1.35
Rochette et al. (2004)	Québec City Canada	Alfalfa	0.91
Rochette et al. (2004)	Québec City Canada	Alfalfa	0.67
Rochette et al. (2004)	Québec City Canada	Alfalfa	1.12
Wagner-Riddle et al. (1997)	Guelph. Canada	Alfalfa	1.1
Wagner-Riddle et al. (1997)	Guelph. Canada	Alfalfa	0.8
Kaiser et al. (1998)	Braunschweig, Germany	Clover	0.96
Simek et al. (2004)	Ceske Budejovice, Czech Republic	Clover	0.9
Van der Weerden et al. (1999)	Canterbury, New Zealand	Clover	0.5
Ellert	Lethbridge, Canada	Alfalfa	1.122

**Rochette et Janzen : moyenne de 1,8**

# Modèles utilisés

- 8 modèles testés

		Effet culture	∅ effet culture
Inférence fréquentiste	Effet site	Modèle 1	Modèle 2
	∅ effet site	Modèle 3	Modèle 4
Inférence bayésienne	Effet site	Modèle 5	Modèle 6
	∅ effet site	Modèle 7	Modèle 8

# Modèles utilisés

- 8 modèles testés

		Effet culture	∅ effet culture
Inférence fréquentiste	Effet site	<b>MODELE 1</b>	Modèle 2
	∅ effet site	Modèle 3	Modèle 4
Inférence bayésienne	Effet site	Modèle 5	Modèle 6
	∅ effet site	Modèle 7	Modèle 8



# Modèle 1 : effet culture et effet site

$$\log(Y_{ij}) = \mu + \alpha X_{ij} + b_i + \varepsilon_{ij}$$

$Y_{ij}$  = émission de  $N_2O$  en  $kg\ N\ ha^{-1}\ an^{-1}$

$X_{ij}$  = 1 pour le trèfle et 0 pour la luzerne

<b>Effet culture :</b>	$\mu + \alpha$ (émission trèfle)
	$\mu$ (émission luzerne)

$i=1,\dots,9$  sites

$j=1,\dots,n_i$  nombre d'observations par site,  $n_i \in [1;5]$

**Effet site aléatoire :**  $b_i \sim N(0, \sigma^2)$

**Residus :**  $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \tau^2)$  iid

# Modèles utilisés

- 8 modèles testés

		Effet culture	∅ effet culture
Inférence fréquentiste	Effet site	Modèle 1	Modèle 2
	∅ effet site	Modèle 3	Modèle 4
Inférence bayésienne	Effet site	<b>MODELE 5</b>	Modèle 6
	∅ effet site	Modèle 7	Modèle 8

# Modèle 5 : Inférence bayésienne

$$\log(Y_{ij}) = \mu + \alpha X_{ij} + b_i + \varepsilon_{ij}$$

$Y_{ij}$  = émission de  $N_2O$  en  $kg\ N\ ha^{-1}\ an^{-1}$

$X_{ij}$  = 1 pour le trèfle et 0 pour la luzerne

$i=1, \dots, 9$  sites

Effet culture :  $\begin{cases} \mu + \alpha & (\text{émission trèfle}) \\ \mu & (\text{émission luzerne}) \end{cases}$

$j=1, \dots, n_i$  nombre d'observations par site,  $n_i \in [1;5]$

Residus :  $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \tau^2)$  iid

Effet site aléatoire :  $b_i \sim N(0, \sigma^2)$

**Information a priori:**

$$(1/\tau^2), (1/\sigma^2) \sim \text{Gamma}(1000, 1000); \mu, \alpha \sim N(0, 1000)$$

# Estimation

- Logiciels :

- Inférence fréquentiste : R (package glm et lme)
- Inférence bayésienne avec WinBUGS

- Markov Chain Monte Carlo :

- Chaines: 3
- Itérations: 20 000 à 200 000 selon le modèle

# Résultats : Critères sélection

		Culture	Ø culture
fréquentiste	Effet site	<b>MODELE 1</b>	Modèle 2
	Ø effet site	Modèle 3	Modèle 4
bayésienne	Effet site	<b>MODELE 5</b>	Modèle 6
	Ø effet site	Modèle 7	Modèle 8

- Inférence fréquentiste : AIC et BIC

		<i>Modèle 1</i>	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
Critères	AIC	<b>32,67</b>	34,60	36,94	38,78
	BIC	<b>35,51</b>	36,92	39,06	40,33

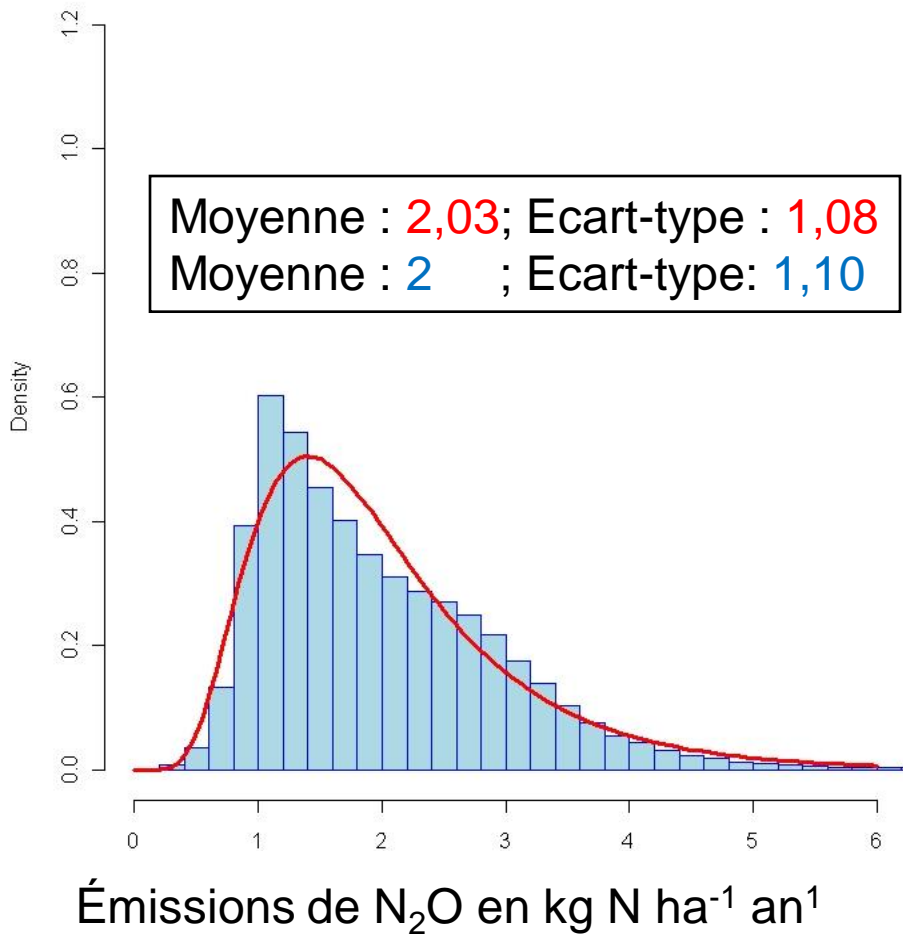
- Inférence bayésienne : DIC

		<i>Modèle 5</i>	Modèle 6	Modèle 7	Modèle 8
Critère	DIC	<b>24,66</b>	25,96	35,16	37,10

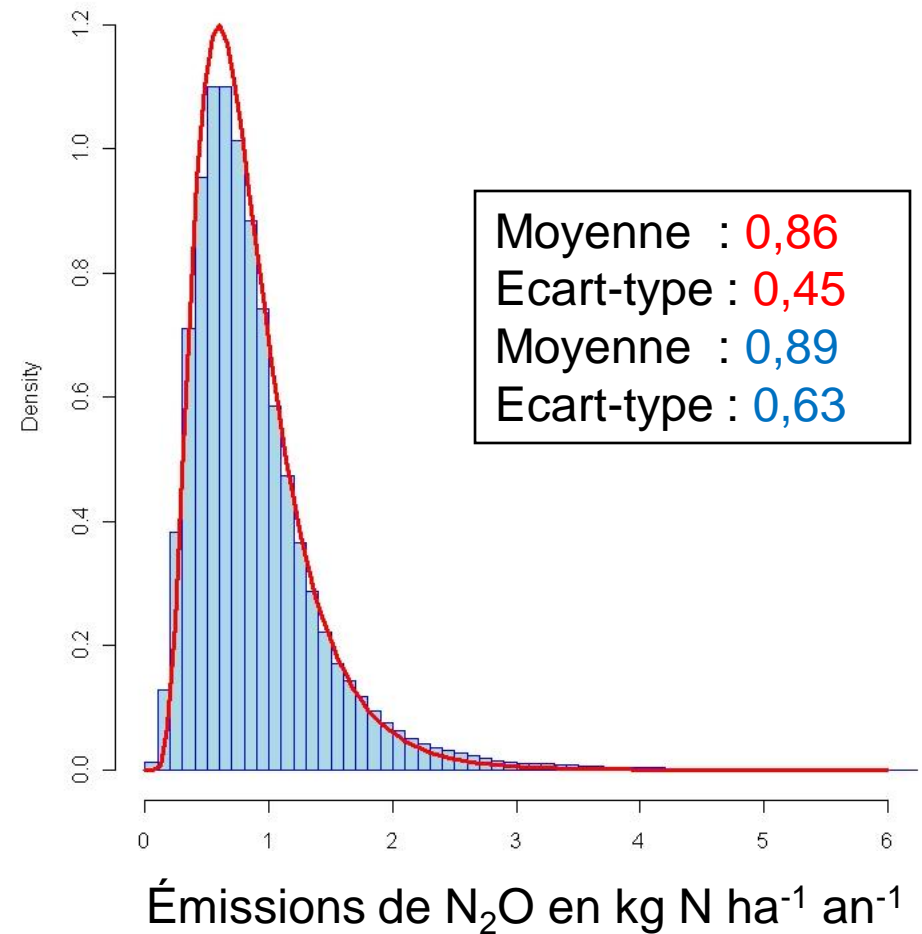
# Résultats : Courbe distribution

		Culture	Ø culture
fréquentiste	Effet site	<b>MODELE 1</b>	Modèle 2
	Ø effet site	Modèle 3	Modèle 4
bayésienne	Effet site	<b>MODELE 5</b>	Modèle 6
	Ø effet site	Modèle 7	Modèle 8

Modèle 5 et Modèle 1 pour la luzerne



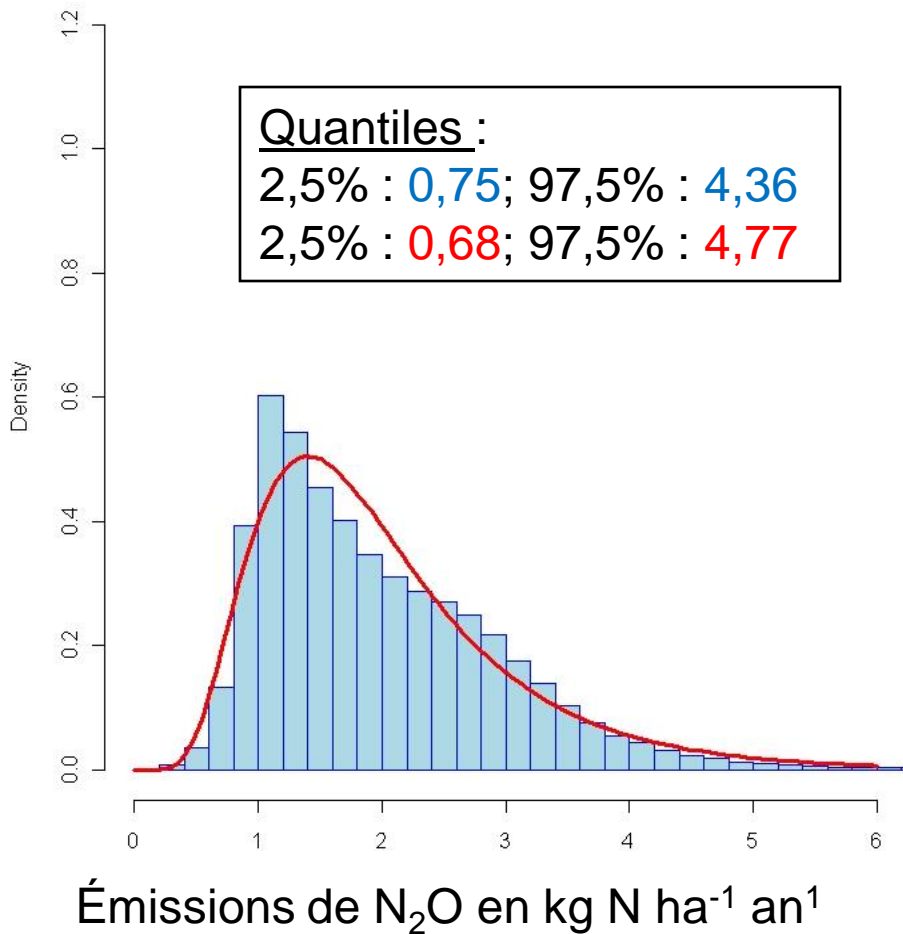
Modèle 5 et Modèle 1 pour le trèfle



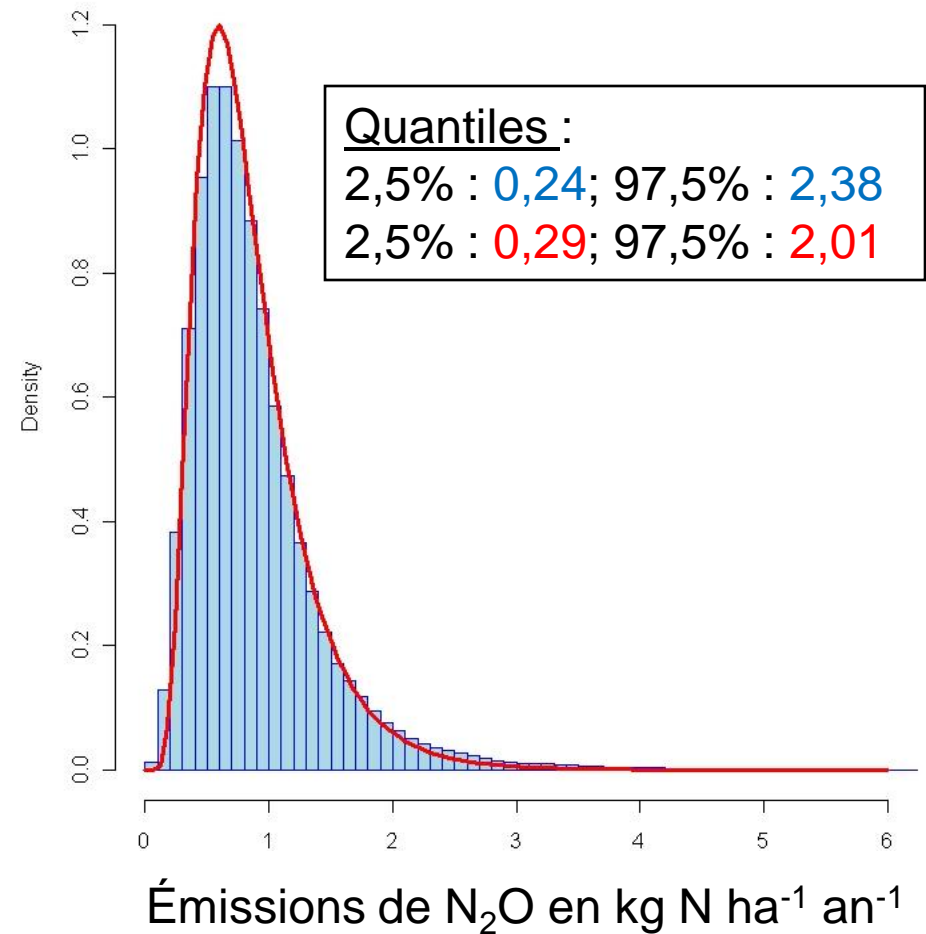
# Résultats : Quantiles

		Culture	Ø culture
fréquentiste	Effet site	<b>MODELE 1</b>	Modèle 2
	Ø effet site	Modèle 3	Modèle 4
bayésienne	Effet site	<b>MODELE 5</b>	Modèle 6
	Ø effet site	Modèle 7	Modèle 8

Modèle 5 et Modèle 1 pour la luzerne

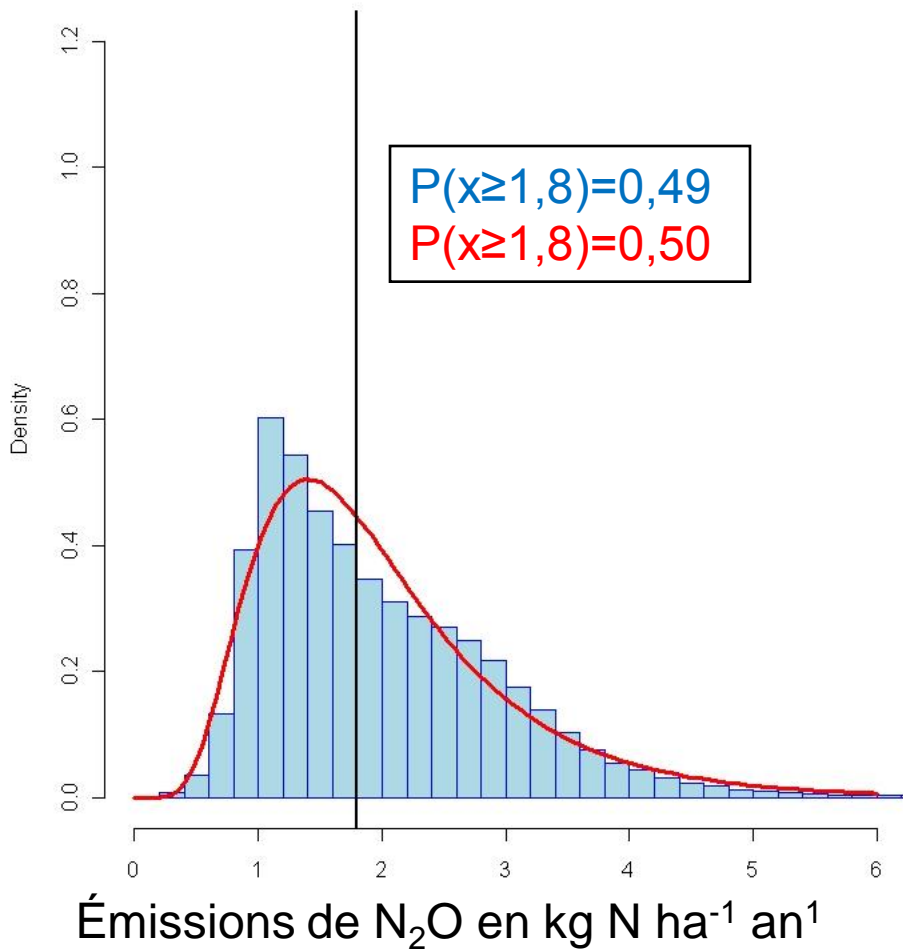


Modèle 5 et Modèle 1 pour le trèfle

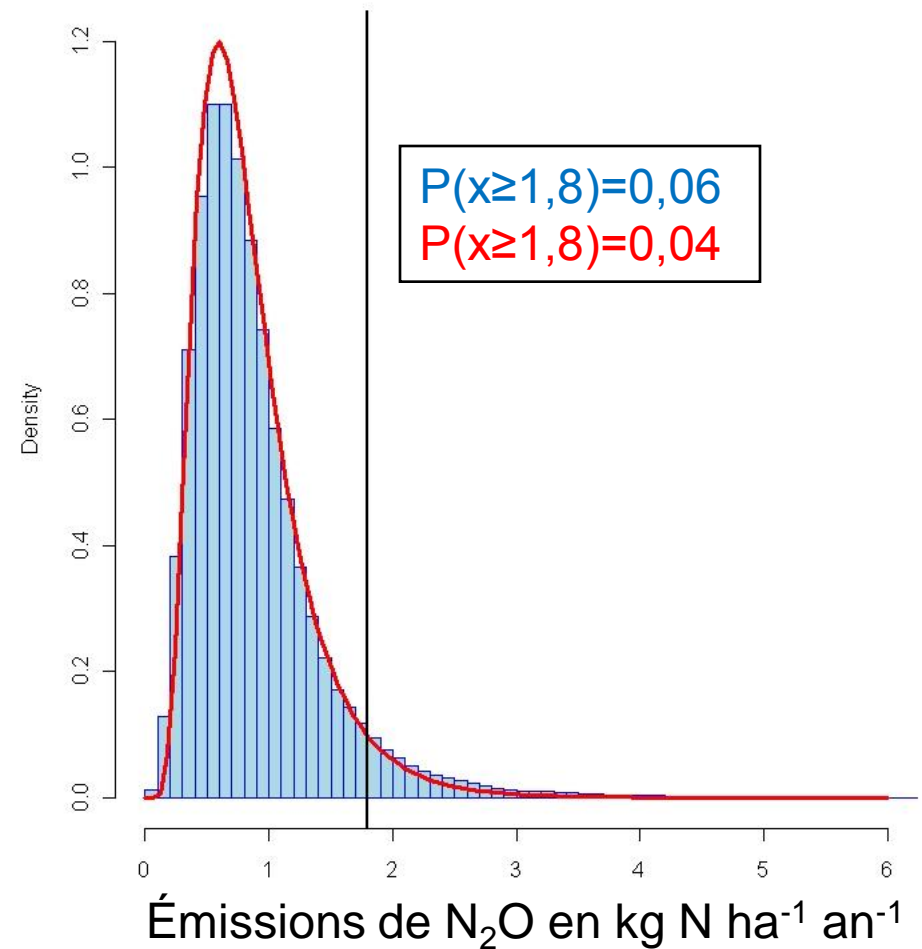


# Comparaison avec Rochette et Janzen

Modèle 5 et Modèle 1 pour la luzerne



Modèle 5 et Modèle 1 pour le trèfle





# Conclusions

- *Les émissions dépendent-elles du type de légumineuse ?*

➔ Oui : émissions moyenne de  $\text{N}_2\text{O}$  ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ )

- Luzerne : 2 Intervalle de confiance à 95% [0,75-4,36]
- Trèfle : 0,9 Intervalle de confiance à 95% [0,24-2,38]

- *Existe-t-il un effet du site d'expérimentation ?*

➔ Oui : forte variabilité inter-site

- Possible confusion d'effet avec le continent

# Trois parties

1. Modèles hiérarchiques **sans** la dose d'azote apportée pour les cultures de **légumineuses**
2. Modèles hiérarchiques **avec** la dose d'azote apportée pour une large gamme de cultures
3. Modèles hiérarchiques **avec** la dose d'azote apportée, ajustés aux **caractéristiques locales** (climat, type de sol,...)

# Méthode d'estimation - GIEC

- GIEC : **G**roupe d'experts **I**ntergouvernemental sur l'**E**volution du **C**limat (IPCC : Intergovernmental Panel on **C**limate **C**hange)



Emission  $N_2O$  =

Facteur d'émission (EF) \* Données d'activités (AD)

**AD** = mesure d'activités humaines (ex: dose d'engrais azoté)

**EF** = % données d'activités transformées en  $N_2O$

# Relation N<sub>2</sub>O - N

$$Y = EF * X$$

- Équation la + utilisée
- Forme linéaire
- EF constant

- Y = émission de N<sub>2</sub>O (kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)
  - EF = facteur d'émission
  - X = dose d'engrais synthétique et organique azoté (kg N ha<sup>-1</sup>)
- 
- GIEC 1999 : EF = 1,25% (Bouwman, 1996)
  - GIEC 2006 : EF = 1% (Stehfest et Bouwman, 2006)
- Gamme d'incertitude : 0,3% - 3%

# Questions

- ***Forme de la relation : linéaire ou exponentielle ?***  
(Hoben et al., 2011; Ma et al., 2010; Millar et al., 2011)
- ***Quelle méthode statistique est la plus adaptée ?***
- ***La gamme d'incertitude du GIEC est-elle pertinente ?***

# Relation N<sub>2</sub>O - N

$$Y = EF * X$$

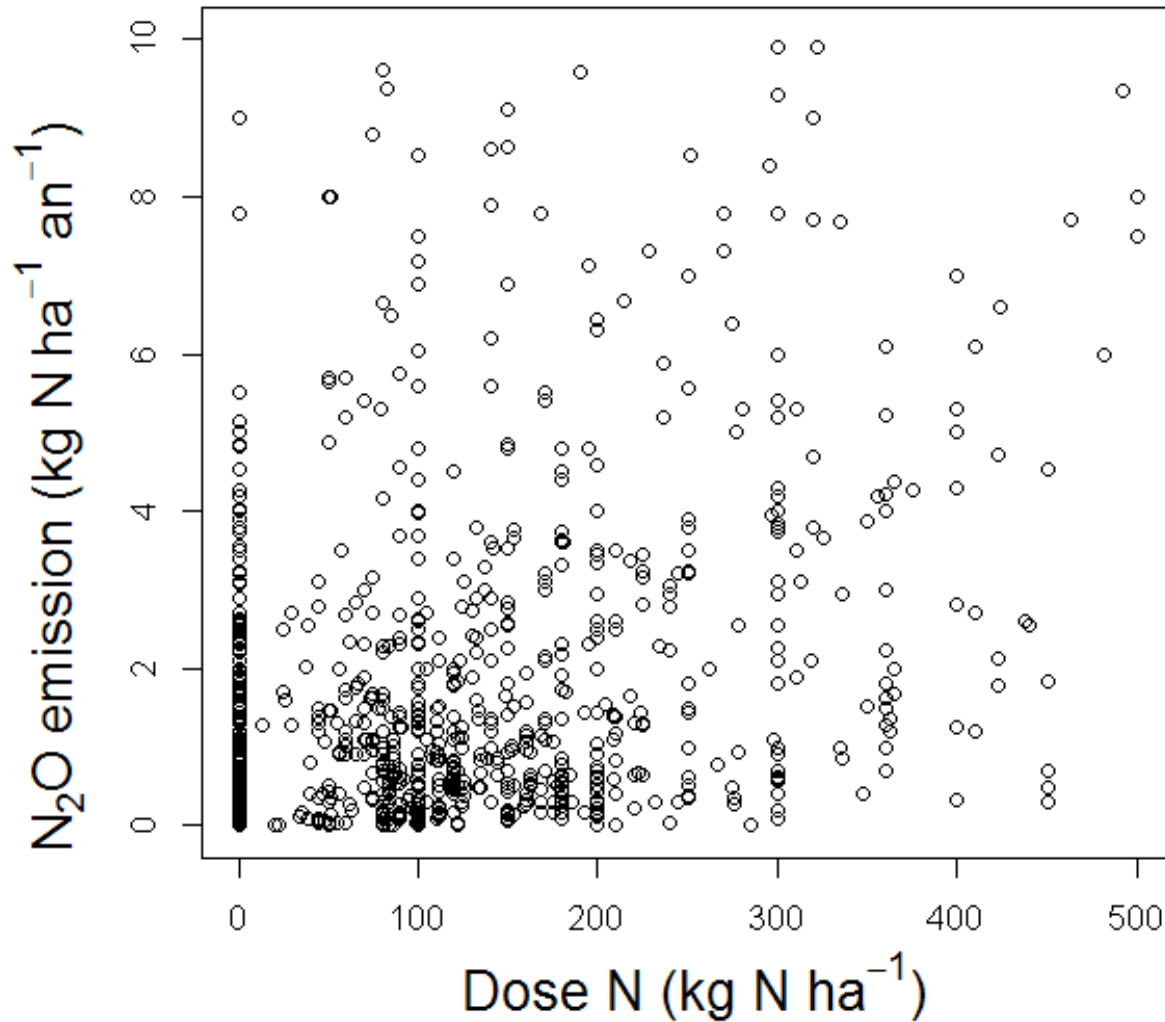
- Niveau 1
- Forme linéaire
- EF constant

- Y = émission de N<sub>2</sub>O (kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)
  - EF = facteur d'émission
  - X = dose d'engrais synthétique et organique azoté (kg N ha<sup>-1</sup>)
- 
- GIEC 1999 : EF = 1,25% (Bouwman, 1996)
  - GIEC 2006 : EF = 1% (**Stehfest et Bouwman, 2006**)
- Gamme d'incertitude : 0,3% - 3%

# Données

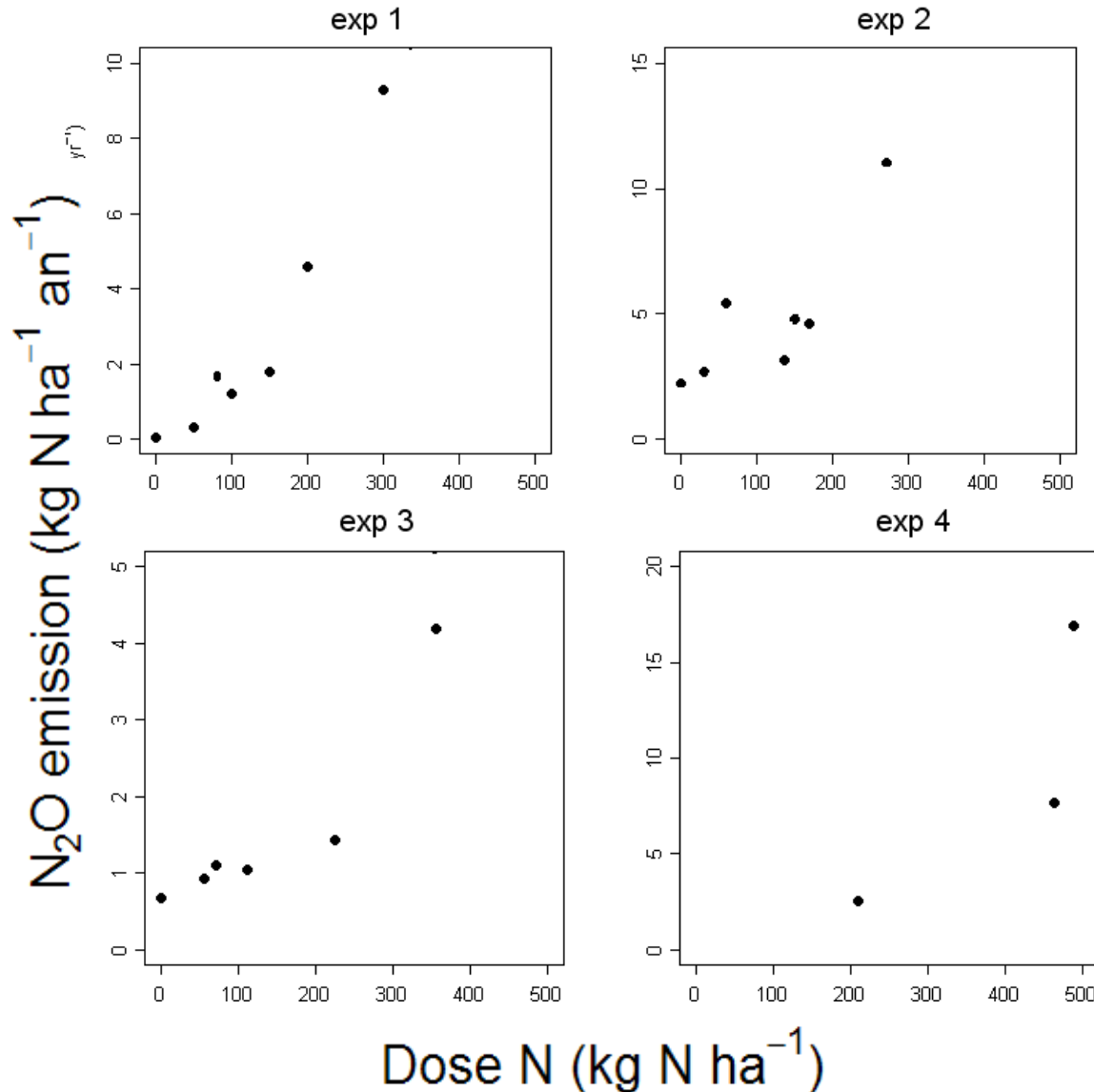
- Base de données : Stehfest et Bouwman (2006)
  - 985 mesures d'émissions de  $N_2O$
  - 203 publications de 1979 à 2004
  - issues d'expérimentations en sols cultivés
  - sur 4 continents
  - plusieurs doses d'azote apporté testées par expé
- Mêmes données que pour définir  $EF = 1\%$

# Données : Stehfest et Bouwman (2006)





# Données : Stehfest et Bouwman (2006)



Modèles à  
effets  
aléatoires

# Modèles

NL = exponentielle  
L = linéaire

N = effet azote  
0 = pas d'effet azote

F = param. fixe  
R = param. aléatoire

Nom	Linéaire	Dose N	Terme constant	Terme de régression
NL-N-FF	Non	Oui	Fixe	Fixe
NL-0-R	Non	Non	Aléatoire	-
NL-N-RF	Non	Oui	Aléatoire	Fixe
NL-N-FR	Non	Oui	Fixe	Aléatoire
NL-N-RR	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire
NL-N-RR-B	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire
L-0-F	Oui	Non	Fixe	-
L-N-FF	Oui	Oui	Fixe	Fixe
L-0-R	Oui	Non	Aléatoire	-
L-N-RF	Oui	Oui	Aléatoire	Fixe
L-N-FR	Oui	Oui	Fixe	Aléatoire
L-N-RR	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire
L-N-RR-B	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire

# Modèles

NL = exponentielle  
L = linéaire

N = effet azote  
0 = pas d'effet azote

F = param. fixe  
R = param. aléatoire

Nom	Linéaire	Dose N	Terme constant	Terme de régression
NL-N-FF	Non	Oui	Fixe	Fixe
NL-0-R	Non	Non	Aléatoire	-
NL-N-RF	Non	Oui	Aléatoire	Fixe
NL-N-FR	Non	Oui	Fixe	Aléatoire
NL-N-RR	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire
NL-N-RR-B	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire
L-0-F	Oui	Non	Fixe	-
L-N-FF	Oui	Oui	Fixe	Fixe
L-0-R	Oui	Non	Aléatoire	-
L-N-RF	Oui	Oui	Aléatoire	Fixe
L-N-FR	Oui	Oui	Fixe	Aléatoire
L-N-RR	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire
L-N-RR-B	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire

Inférence  
Bayésienne

# Modèles

NL = exponentielle

L = linéaire

N = effet azote

0 = pas d'effet azote

F = param. fixe

R = param. aléatoire

Nom	Linéaire	Dose N	Terme constant	Terme de régression
NL-N-FF	Non	Oui	Fixe	Fixe
NL-0-R	Non	Non	Aléatoire	-
NL-N-RF	Non	Oui	Aléatoire	Fixe
NL-N-FR	Non	Oui	Fixe	Aléatoire
NL-N-RR	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire
NL-N-RR-B	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire
L-0-F	Oui	Non	Fixe	-
L-N-FF	Oui	Oui	Fixe	Fixe
L-0-R	Oui	Non	Aléatoire	-
L-N-RF	Oui	Oui	Aléatoire	Fixe
L-N-FR	Oui	Oui	Fixe	Aléatoire
L-N-RR	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire
L-N-RR-B	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire

# Modèle NL-N-RR

Nom	Linéaire	Dose N	Terme constant	Terme de régression
NL-N-RR	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire

$$Y_{ijk} = \exp(\alpha_{0i} + \alpha_{1i} X_{ij}) + \varepsilon_{ijk}$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \tau^2)$$

$$\alpha_{0i} \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$$

$$\alpha_{1i} \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

- $Y_{ijk}$  émission de  $N_2O$  ( $kg\ N\ ha^{-1}\ an^{-1}$ ) de la  $i^{\text{ème}}$  expérimentation publiée ( $i=1 \dots 203$ ), la  $j^{\text{ème}}$  dose d'azote apportée ( $j=1 \dots N_j$ ), et le  $k^{\text{ème}}$  replicat ( $k=1 \dots K_{ij}$ )
  - $X_{ij}$  la  $j^{\text{ème}}$  dose d'azote apportée ( $kg\ N\ ha^{-1}\ an^{-1}$ ) de la  $i^{\text{ème}}$  expérimentation publiée
  - $\mu_0$  l'émission moyenne de base
  - $\alpha_{0i}$  l'émission de base spécifique à l'expérimentation publiée  $i$  (aléatoire)
  - $\mu_1$  l'effet moyen de la dose d'azote apportée
  - $\alpha_{1i}$  l'effet de la dose d'azote apportée spécifique à l'expérimentation publiée  $i$  (aléatoire)
  - $\varepsilon_{ijk}$  le terme d'erreur résiduelle
- $\alpha_{0i}$ ,  $\alpha_{1i}$  et  $\varepsilon_{ijk}$  iid.

# Modèle NL-N-RR-B

Nom	Linéaire	Dose N	Terme constant	Terme de régression
NL-N-RR-B	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire

$$Y_{ijk} = \exp(\alpha_{0i} + \alpha_{1i} X_{ij}) + \varepsilon_{ijk}$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \tau^2)$$

$$\alpha_{0i} \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$$

$$\alpha_{1i} \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

Information a priori :

$$\tau, \sigma_0, \sigma_1 \sim U(0, 100); \mu_0, \mu_1 \sim N(0, 1000)$$

# Estimation

- Logiciels :

- Inférence fréquentiste : R (package glm et lme)
- Inférence bayésienne avec WinBUGS

- Markov Chain Monte Carlo :

- 3 chaînes
- 100 000 itérations

# Résultats : Critères de sélection

Nom	Linéaire	Dose N	Terme constant	Terme régression	AIC	BIC	DIC
NL-N-FF	Non	Oui	Fixe	Fixe	5513,1	5527,8	-
NL-O-R	Non	Non	Aléatoire	-	5091,9	5106,5	-
NL-N-RF	Non	Oui	Aléatoire	Fixe	4553,9	4573,5	-
NL-N-FR	Non	Oui	Fixe	Aléatoire	4598,9	4618,5	-
NL-N-RR	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire	4482,7	4507,1	-
NL-N-RR-B	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire	-	-	4196,7
L-O-F	Oui	Non	Fixe	-	5653,9	5663,7	-
L-N-FF	Oui	Oui	Fixe	Fixe	5512,1	5526,8	-
L-O-R	Oui	Non	Aléatoire	-	5268,5	5283,2	-
L-N-RF	Oui	Oui	Aléatoire	Fixe	5117,4	5136,9	-
L-N-FR	Oui	Oui	Fixe	Aléatoire	4698,0	4717,5	-
L-N-RR	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire	4693,2	4717,6	-
L-N-RR-B	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire	-	-	4421,6



# Résultats : Critères de sélection

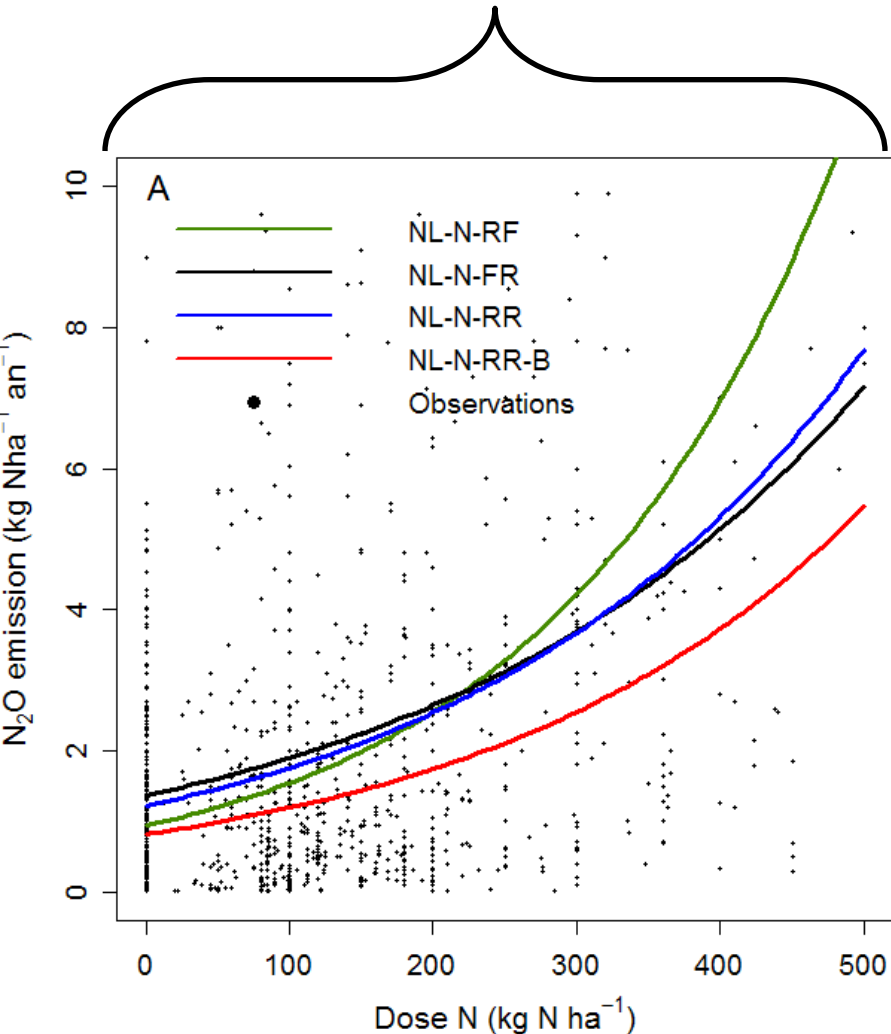
Nom	Linéaire	Dose N	Terme constant	Terme régression	AIC	BIC	DIC
NL-N-FF	Non	Oui	Fixe	Fixe	5513,1	5527,8	-
NL-O-R	Non	Non	Aléatoire	-	5091,9	5106,5	-
NL-N-RF	Non	Oui	Aléatoire	Fixe	4553,9	4573,5	-
NL-N-FR	Non	Oui	Fixe	Aléatoire	4598,9	4618,5	-
NL-N-RR	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire	4482,7	4507,1	-
NL-N-RR-B	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire	-	-	4196,7
L-O-F	Oui	Non	Fixe	-	5653,9	5663,7	-
L-N-FF	Oui	Oui	Fixe	Fixe	5512,1	5526,8	-
L-O-R	Oui	Non	Aléatoire	-	5268,5	5283,2	-
L-N-RF	Oui	Oui	Aléatoire	Fixe	5117,4	5136,9	-
L-N-FR	Oui	Oui	Fixe	Aléatoire	4698,0	4717,5	-
L-N-RR	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire	4693,2	4717,6	-
L-N-RR-B	Oui	Oui	Aléatoire	Aléatoire	-	-	4421,6

AIC et BIC  
moins de  
10%  
supérieur  
au meilleur  
modèle  
(L et NL)

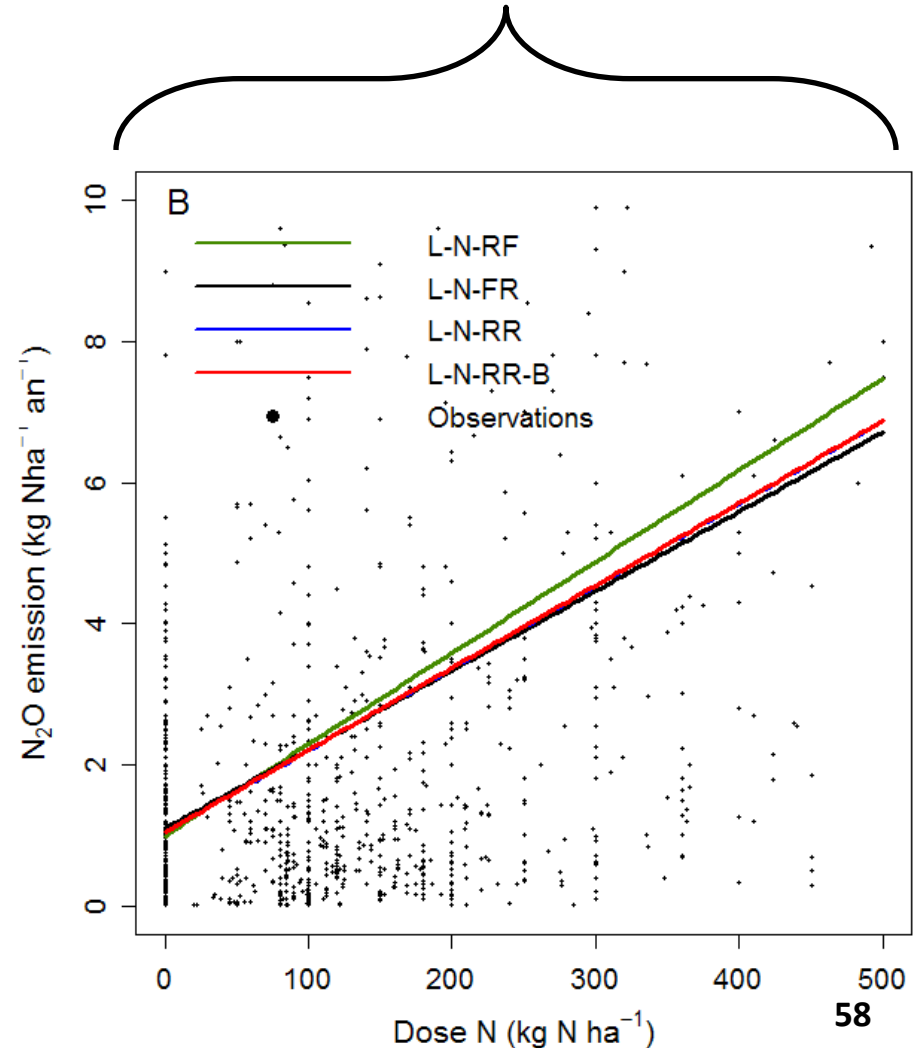
+ 2 en  
inférence  
Bayésienne

# Résultats : Gamme d'émission de N<sub>2</sub>O

## Modèles exponentiels



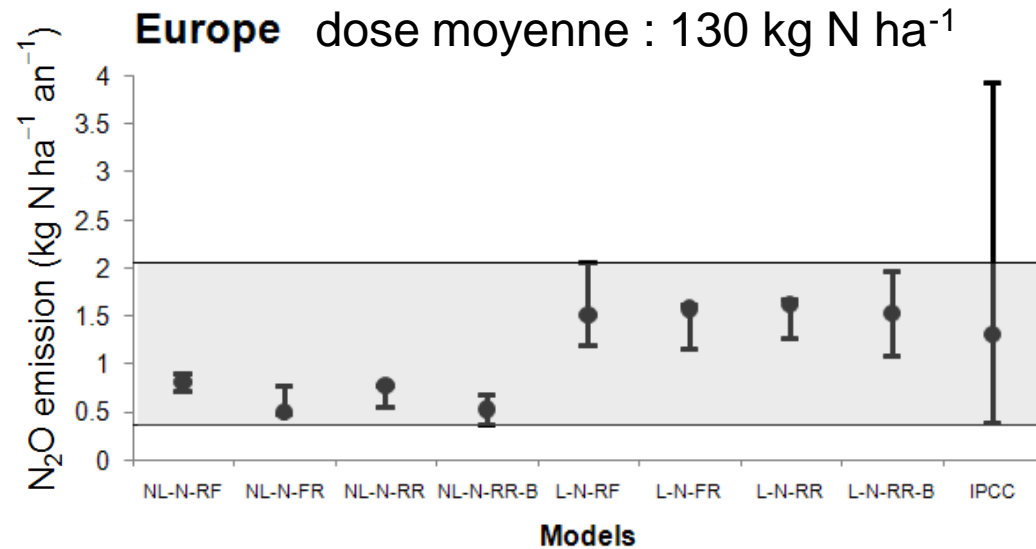
## Modèles linéaires



# Conséquences de la forme exponentielle

- Facteur d'émission croissant avec la dose

- Émissions de  $N_2O$  :
  - plus faibles pour des doses  $< 160 \text{ kg N ha}^{-1}$
  - plus fortes pour des doses  $> 160 \text{ kg N ha}^{-1}$



- Besoin des distributions spatiales et/ou temporelles des doses appliquées :

$$\exp(\text{moyenne}(X_i)) \neq \text{moyenne}(\exp(X_i))$$

# Conclusions

- *Forme de la relation : linéaire ou exponentielle ?*

➔ Forme exponentielle meilleure que linéaire

- *Quelle **méthode statistique** est la plus adaptée ?*

➔ Modèles avec paramètres aléatoires meilleurs

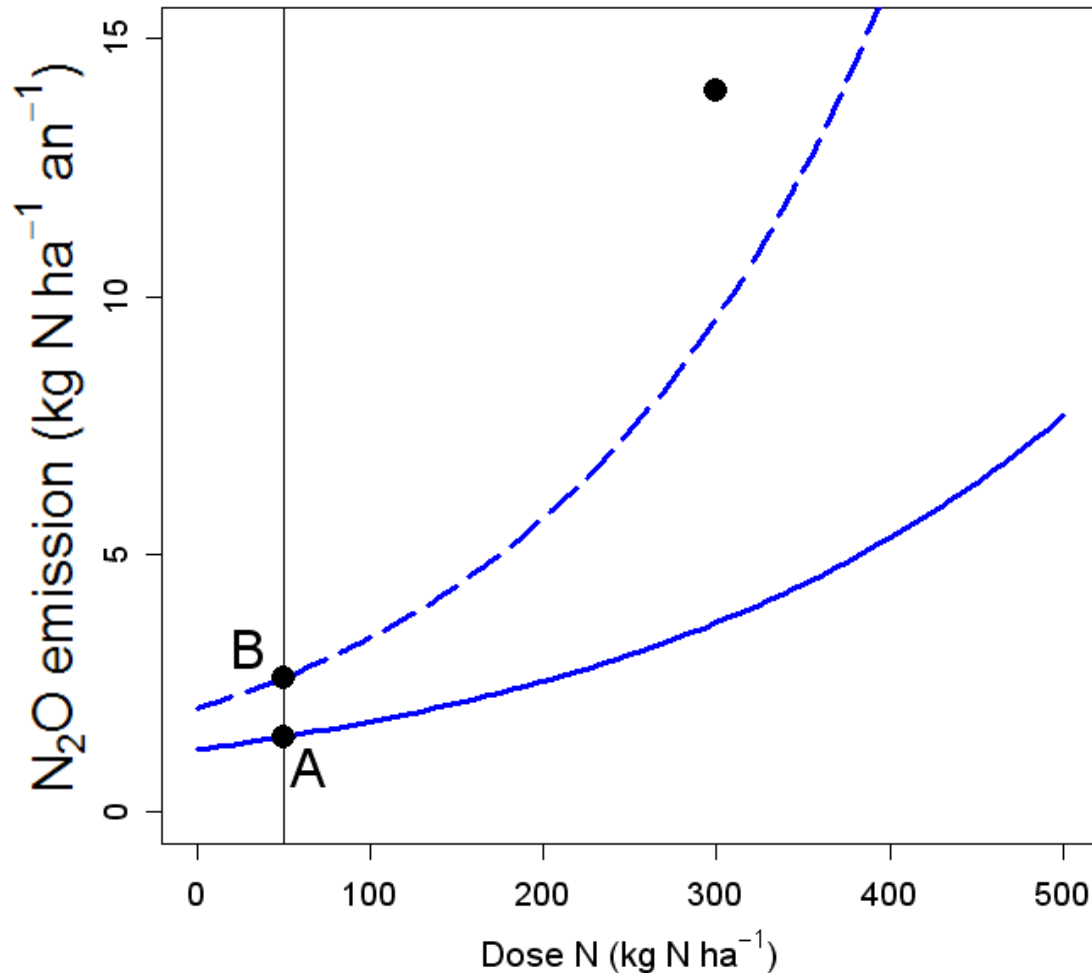
- *La gamme **d'incertitude** du GIEC est-elle pertinente ?*

➔ Pas pour la borne supérieure (non montré)

# Trois parties

1. Modèles hiérarchiques **sans** la dose d'azote apportée pour les cultures de **légumineuses**
2. Modèles hiérarchiques **avec** la dose d'azote apportée pour une large gamme de cultures
3. Modèles hiérarchiques **avec** la dose d'azote apportée, ajustés aux **caractéristiques locales** (climat, type de sol,...)

# Objectif



- Mesure de N<sub>2</sub>O disponible
- Courbe moyenne
- - Courbe ajustée au site
- A Prédiction moyenne
- B Prédiction ajustée au site

B meilleur que A ?

# Question

- *La prédiction spécifique au site (B) est-elle meilleure que la prédiction moyenne (A) ?*
- Selon :
  - Le nombre de mesures de N<sub>2</sub>O disponibles par site
  - La dose d'azote considérée par la prédiction de N<sub>2</sub>O
  - Le nombre total de sites disponibles
  - La méthode d'estimation utilisée

# Données - Modèles

- **Même base de données** : Stehfest et Bouwman (2006)
  - 985 mesures d'émissions de N<sub>2</sub>O
  - 203 publications de 1979 à 2004
  - issues d'expérimentations en sols cultivés
  - sur 4 continents
  - plusieurs doses d'azote apporté testées par expé
- **Modèles à effets aléatoires**

Nom	Linéaire	Dose N	Terme constant	Terme de régression	Inférence
NL-N-RR	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire	fréquentiste
NL-N-RR-B	Non	Oui	Aléatoire	Aléatoire	bayésienne



# Prédictions

- Modèle  $Y_{ijk} = \exp \left( \alpha_{0i} + \alpha_{1i} X_{ij} \right) + \varepsilon_{ijk}$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \tau^2) \quad \alpha_{0i} \sim N(\mu_0, \sigma_0^2) \quad \alpha_{1i} \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

- Prédiction moyenne **(A)** :  $Y_{avg} = \exp(\hat{\mu}_0 + \hat{\mu}_1 X)$

- Prédiction spécifique à un site **(B)** :

$$Y_{site}(X) = \exp(\hat{\alpha}_{0site} + \hat{\alpha}_{1site} X)$$

# Prédictions

- Modèle  $Y_{ijk} = \exp \left( \alpha_{0i} + \alpha_{1i} X_{ij} \right) + \varepsilon_{ijk}$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \tau^2) \quad \alpha_{0i} \sim N(\mu_0, \sigma_0^2) \quad \alpha_{1i} \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

- Prédiction moyenne **(A)** :  $Y_{avg(2)} = E[\exp(\mu_0 + \mu_1 X)]$

- Prédiction spécifique à un site **(B)** :

$$Y_{site(2)}(X) = E[\exp(\alpha_{0site} + \alpha_{1site} X) / \text{donnees}]$$

# Prédictions

- Modèle  $Y_{ijk} = \exp \left( \alpha_{0i} + \alpha_{1i} X_{ij} \right) + \varepsilon_{ijk}$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \tau^2) \quad \alpha_{0i} \sim N(\mu_0, \sigma_0^2) \quad \alpha_{1i} \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

- Prédiction moyenne **(A)** :  $Y_{avg(2)} = E[\exp(\mu_0 + \mu_1 X)]$

- Prédiction spécifique à un site **(B)** :

$$Y_{site(2)}(X) = E[\exp(\alpha_{0site} + \alpha_{1site} X) / \textit{donnees}]$$

- Temps calcul très long
- Résultats moins précis

# Calcul des prédictions

Etape 1 : **Suppression** d'un couple (dose/site)

Etape 2 : **Estimation** des paramètres du modèle sans les mesures supprimées à l'étape 1

Etape 3 : Calcul des **prédictions** moyennes et spécifiques au site pour le couple (dose/site) considéré à l'étape 1

# frequentiste / bayésien

— Prédiction moyenne

- - - Prédiction ajustée au site

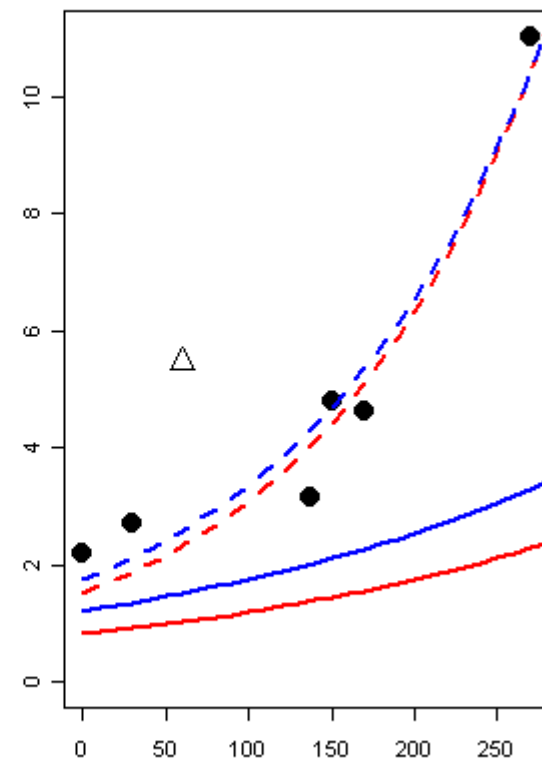
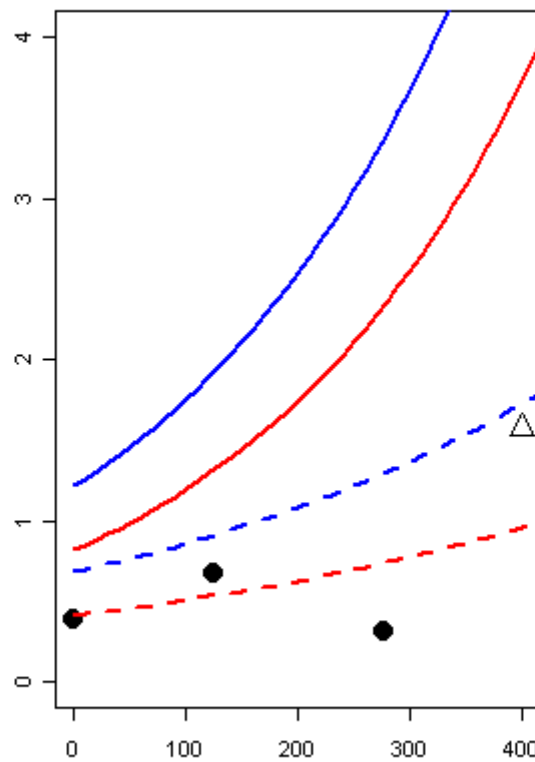
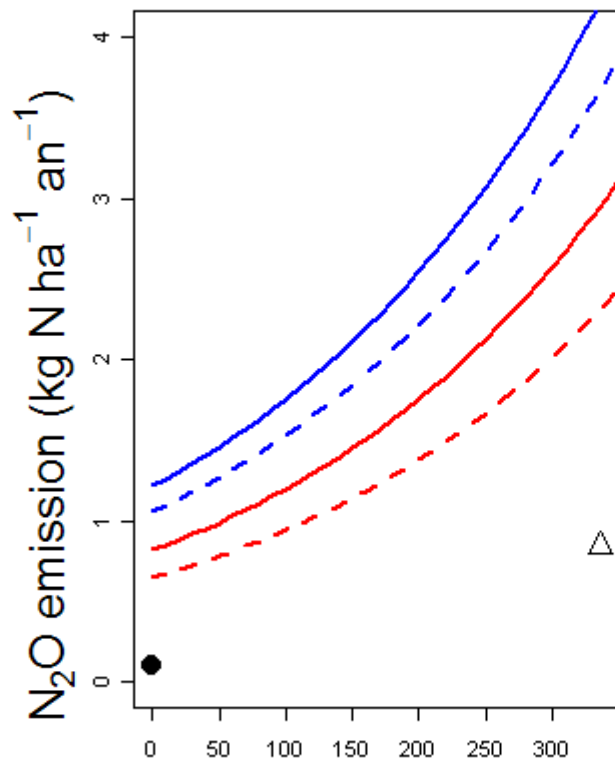
● mesures disponibles

△ (dose/site) supprimé

(a) Loc 139

(b) Loc 311

(c) Loc 87



Dose N (kg N ha<sup>-1</sup>)

# Evaluation des prédictions (1)

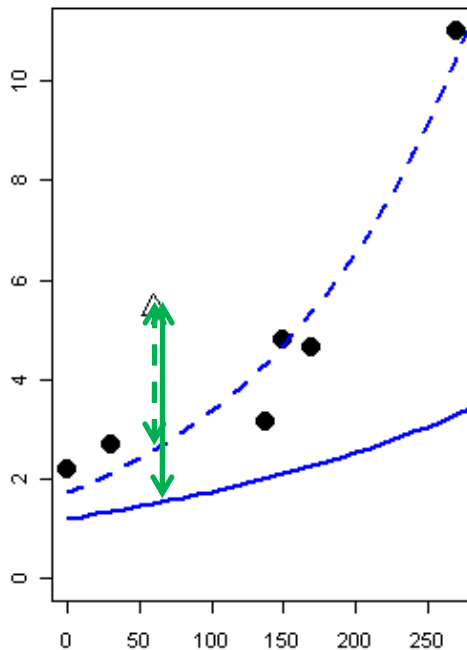
$$RMSEP_{site} = \sqrt{\sum_{i=1}^I [Y_{site}(X_i) - Y(X_i)]^2}$$

Prédiction **spécifique au site** - N<sub>2</sub>O observé

$$RMSEP_{avg} = \sqrt{\sum_{i=1}^I [Y_{avg}(X_i) - Y(X_i)]^2}$$

Prédiction **moyenne** - N<sub>2</sub>O observé

(c) Loc 87



## Inférence fréquentiste

Nb mesures dispo par site	RMSEP <sub>avg</sub> - RMSEP <sub>site</sub>	Nb predictions
1	+ 9 %	140
2	- 8 %	108
3, 4 ou 5	- 7 %	129
6 ou +	- 24 %	75

# Evaluation des prédictions (2)

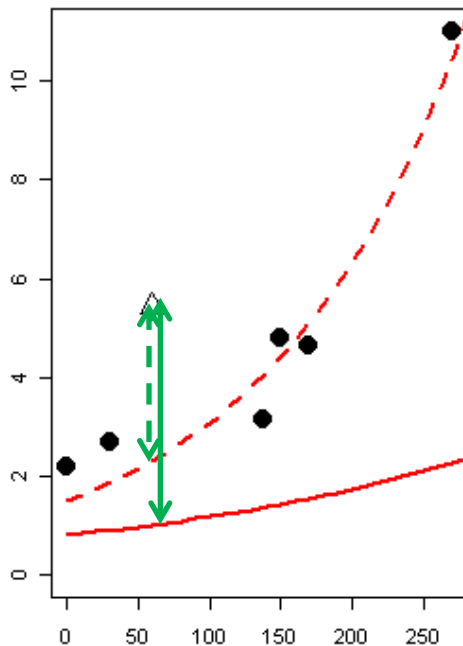
$$RMSEP_{site} = \sqrt{\sum_{i=1}^I [Y_{site}(X_i) - Y(X_i)]^2}$$

Prédiction **spécifique au site** - N<sub>2</sub>O observé

$$RMSEP_{avg} = \sqrt{\sum_{i=1}^I [Y_{avg}(X_i) - Y(X_i)]^2}$$

Prédiction **moyenne** - N<sub>2</sub>O observé

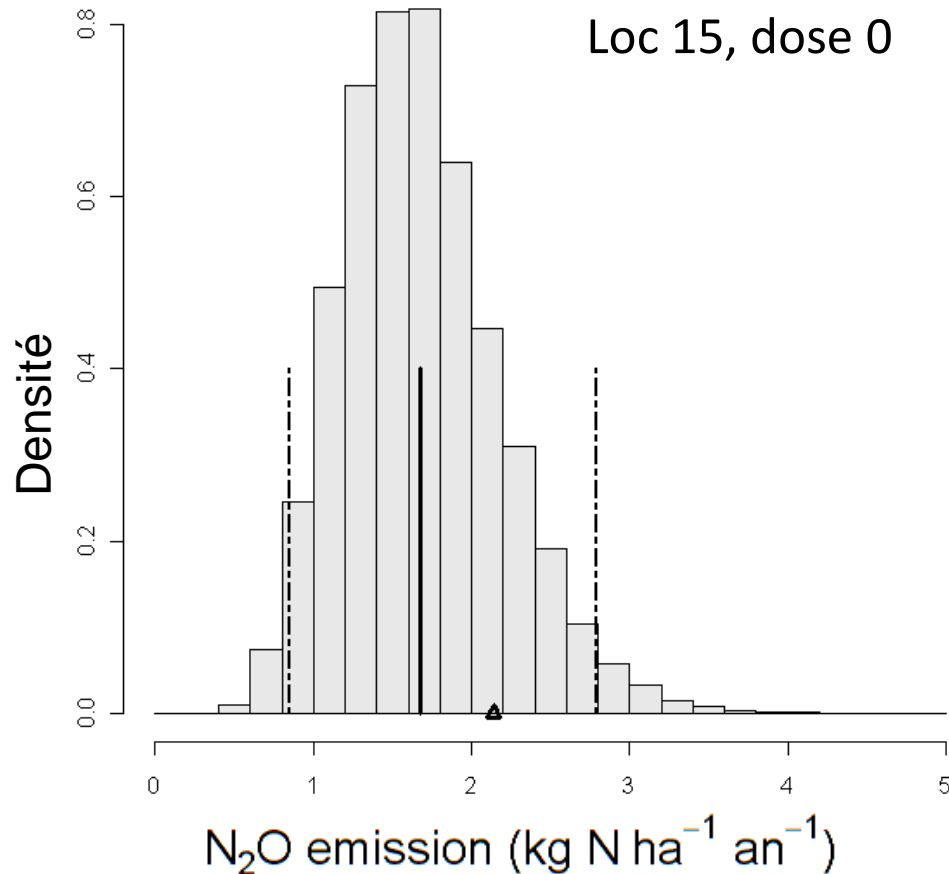
(c) Loc 87



## Inférence bayésienne

Nb mesures dispo par site	RMSEP <sub>avg</sub> - RMSEP <sub>site</sub>	Nb predictions
2	- 9 %	20
4	- 73 %	20
7 à 13	- 36 %	36

# Intérêt de l'approche bayésienne



- Prédiction d'une distribution d'émission de  $\text{N}_2\text{O}$
- Intervalle de crédibilité disponible



# Conclusions

- *La prédiction spécifique au site (B) est-elle **meilleure** que la prédiction moyenne (A) ?*

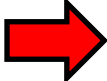
 **Oui** dans la majorité des cas

# Conclusions

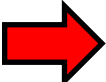
- *La prédiction spécifique au site (B) est-elle **meilleure** que la prédiction moyenne (A) ?*

 **Oui** dans la majorité des cas

- *Le nombre de mesures de  $N_2O$  disponibles par site*

 { Données réelles : **Oui** sauf quand 1 seule mesure disponible  
Données simulées : **Oui**

- *La dose d'azote considérée par la prédiction de  $N_2O$*

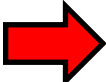
 { Données réelles : **Oui** sauf pour des doses  $> 200 \text{ kg N ha}^{-1}$   
Données simulées : **Oui**

# Conclusions

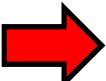
- *La prédiction spécifique au site (B) est-elle **meilleure** que la prédiction moyenne (A) ?*

 **Oui** dans la majorité des cas

- *Le nombre total de sites disponibles*

 Données simulées : **Oui** même sans augmentation par rapport aux données réelles

- *La méthode d'estimation utilisée*

 Données réelles : même niveau de précision entre les inférence fréquentiste et bayésienne

# Application des résultats

- Prédiction d'émissions de  $N_2O$  à un niveau local sans connaître les caractéristiques du site
- Application
  - Site d'expérimentation : prédire les émissions de  $N_2O$  pour des doses non testées / non mesurées
  - Parcelle agricole : prédiction pour la dose nulle -> potentiel d'émission des sols

# Plan

- Qu'est-ce que la méta-analyse ?
- Pourquoi le N<sub>2</sub>O ?
- Utilisation de modèles hiérarchiques pour estimer les émissions de N<sub>2</sub>O
- Conclusions

# Modèles à effets aléatoires

- Modèles à effets aléatoires très bien adaptés à la structure des données agronomiques :
  - Meilleur AIC, BIC et DIC
  - Ajustement local même avec un petit nombre de données par site
  - Décrivent la variabilité inter-sites des émissions de  $N_2O$

# fréquentiste / bayésien

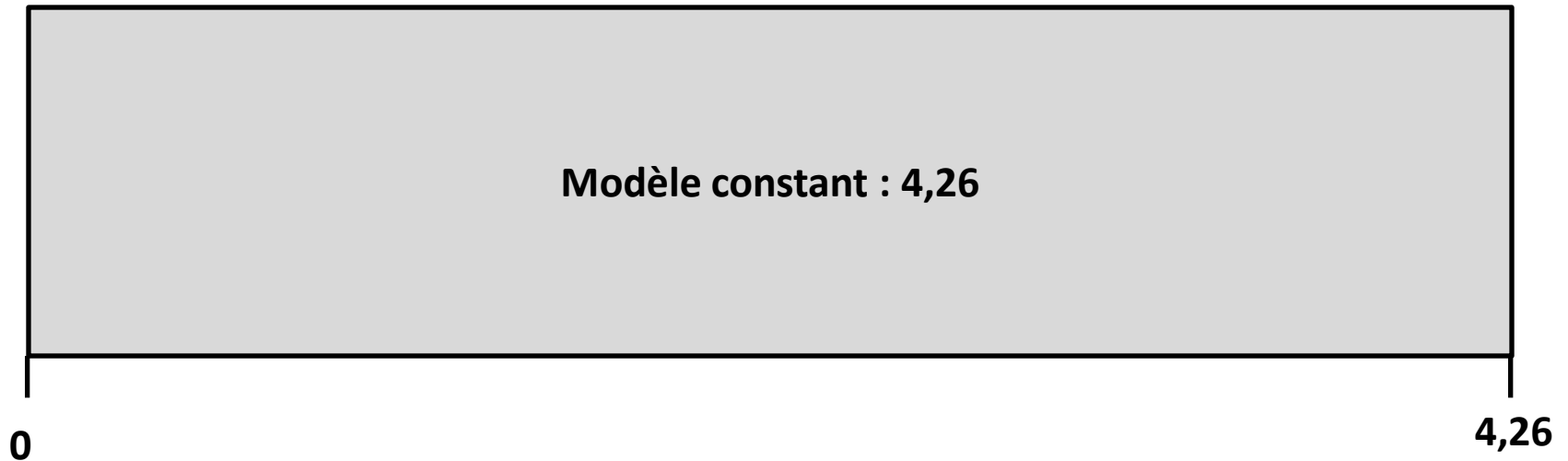
- Comparaison fréquentiste / bayésien :
  - Peu de différence sans doute due à l'utilisation de l'inférence bayésienne avec *a priori* peu informatif
  - Temps de calcul plus long en inférence bayésienne mais fournit une distribution d'émissions de N<sub>2</sub>O au lieu d'une valeur ponctuelle

Merci de votre attention



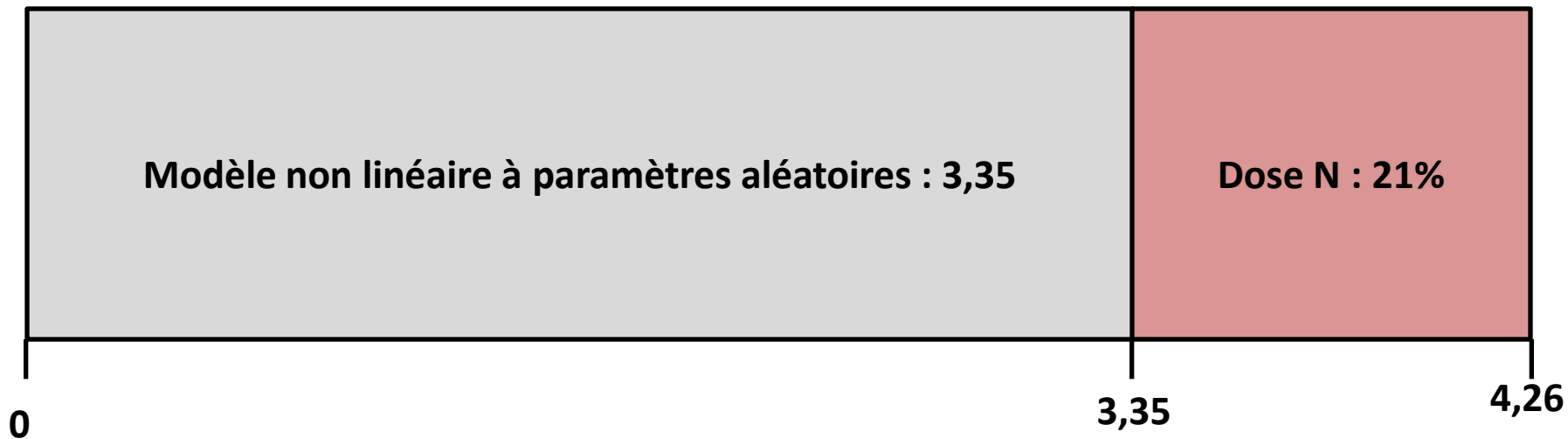
# Rajout de variables explicatives ?

- Ecart-type résiduel du modèle constant :  
4,26 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>



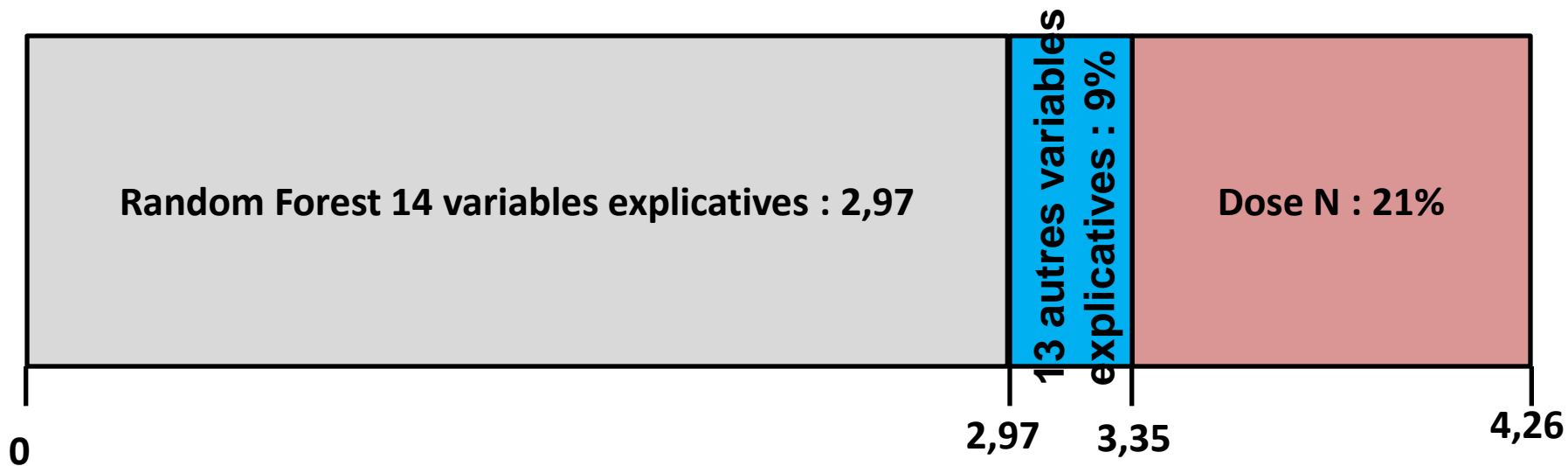
# Rajout de variables explicatives ?

- RMSEP en validation croisée :  
3,35 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>



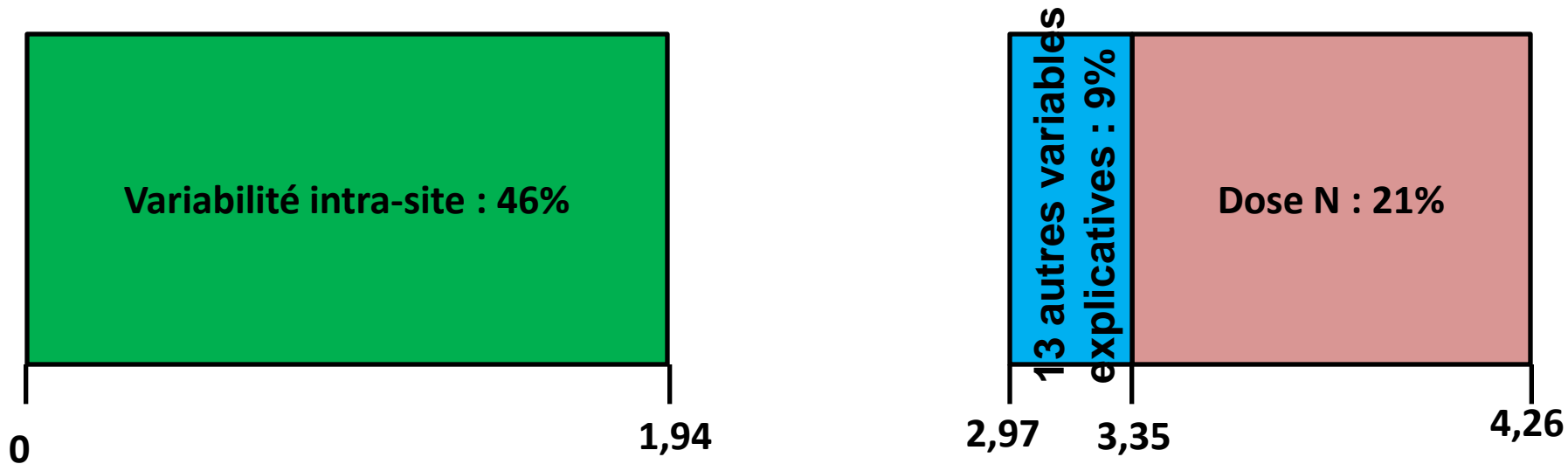
# Rajout de variables explicatives ?

- RMSEP : 2,97 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>



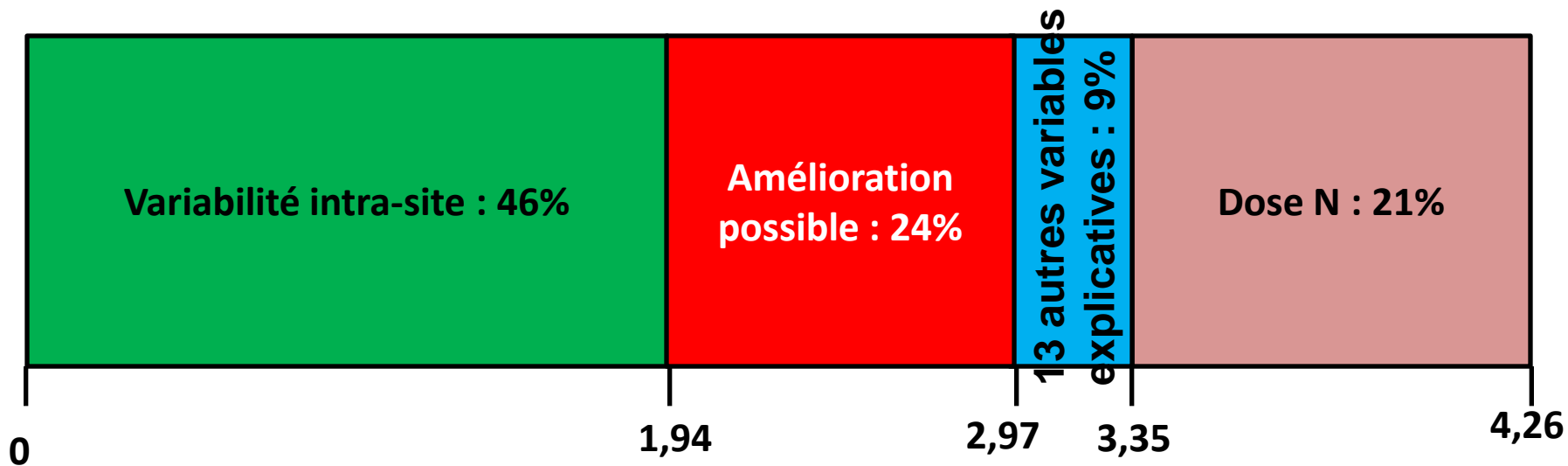
# Rajout de variables explicatives ?

- Variabilité intra-site :  $1,94 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$



# Rajout de variables explicatives ?

- Amélioration possible de l'erreur de prédiction : 24%



# Références (1)

- Baumert KA, Herzog T, Pershing J (2005) Navigating the numbers; Greenhouse gas data and international climate policy. © World Resources Institute, ISBN: 1-56973-599-9, USA, 132p.
- Bouwman AF (1996) Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46: 53-70.
- Cadotte MW, Mehrkens LR, Menge DNL (2012) Gauging the impact of meta-analysis on ecology. *Evolutionary Ecology* 26: 1153-1167.
- Davidson EA (2009) The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience* 2: 659-662.
- Glass GV (1976) Primary, secondary, and meta-analysis of research. *Educational Researcher* 5: 3-8.
- Gu J, Nicoullaud B, Rochette P, Pennock DJ, Hénault C, Cellier P, Richard G (2011) Effect of topography on nitrous oxide emissions from winter wheat fields in Central France. *Environmental Pollution* 159: 3149-3155.
- Hénault C, Gossel A, Mary B, Roussel M, Léonard J (2012) Nitrous oxide emission by agricultural soils: a review of spatial and temporal variability for mitigation. *Pedosphere* 22: 426-433.
- Hoben JP, Gehl RJ, Millar N, Grace PR, Robertson GP (2011) Nonlinear nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest. *Global Change Biology* 17: 1140-1152.

# Références (2)

- IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC Cambridge: Cambridge University Press.
- Ma BL, Wu, TY, Tremblay WD, Morrison MJ, McLaughlin NB, Gregorich EG, Stewart G (2010) Nitrous oxide fluxes from corn-fields: on –farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer. *Global Change Biology* 16: 156-170.
- Millar N, Robertson GP, Grace PR, Gehr RJ, Hoben JP (2010) Nitrogen fertilizer management for nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) mitigation in intensive corn (maize) production: an emissions reduction protocol for US Midwest agriculture. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15: 185–204.
- Mosier A, Kroeze C, Nevison C, Oenema O, Seitzinger S, van Cleemput O (1998) Closing the global atmospheric N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle; OECD/IPCC/IEA Phase II Development of IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52: 225-248.
- Pearson K (1904) Report on certain enteric fever inoculation statistics. *British Medical Journal* 3: 1243-1246.
- Rochette P (2008) No-till only increases N<sub>2</sub>O emissions in poorly-aerated soils. *Soil and Tillage Research* 101: 97-100.
- Rochette P, Janzen H (2005) Towards a revised coefficient for estimating N<sub>2</sub>O emissions from legumes. *Nutrient cycling in agroecosystems* 73: 171-179.

# Références (3)

- Seufert V, Ramankutty N, Foley JA (2012) Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485: 229–232.
- Skiba U, Smith KA (2000) The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. *Chemosphere Global Change Science* 2: 379-386.
- Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE (2009) Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133: 247-266.
- Stehfest E, Bouwman L (2006) N<sub>2</sub>O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74: 207-228.
- Sutton AJ, Higgins PT (2008) Recent developments in meta-analysis. *Statistics in medicine* 27: 625-650.