

# Colloque annuel du PIREN-Seine

5 & 6 octobre 2017

## Quantification et modélisation de la variabilité de la production et bilans C et N en systèmes de culture biologiques

*Nicolas Beaudoin, Bénédicte Autret, Lucia Rakotovololona,  
Florent Chlébowski, Aïcha Ronceux, Michel Bertrand,  
Paul Mäder, Jorgen Olesen, Loïc Strullu, Bruno Mary*

### Soutien financier



### Partenaires



# Déroulement de la présentation

---

- Introduction
- Expérimentations
- Modélisation
- Conclusions et perspectives



# Introduction

---

- FAO → l'Agriculture Biologique (BIO) = voie privilégiée pour répondre aux défis de l'agriculture mondiale.
  - Bilan environnemental du BIO = *a priori* favorable, en termes de biodiversité et usage pesticides : lutte systémique préventive et/ou mécanique.
  - En BIO : Fréquence des limitations de la production et méconnaissance des impacts liés aux cycles C et N → approfondissements nécessaires en systèmes sans élevage (*Mondelaers et al., 2009 ; Benoit et al., ITAB-INRA, 2017*).
  - Les systèmes BIO sans élevage (SE) → des questions spécifiques :
    - **Complexité** de l'interaction entre maîtrise des adventices et la gestion de la fertilité des sols,
    - **Variabilité** du mode d'introduction des légumineuses / rotation.
- conséquences sur les cycles du carbone et de l'azote ?
- variabilité et facteurs de contrôle ?

# Introduction

---

- La **modélisation déterministe** permet déjà de tester des hypothèses sur le fonctionnement de systèmes de culture, tels les bicultures ou les CIPAN (Brisson *et al.*, 2004 ; Constantin *et al.*, 2012) mais les exemples **d'application aux systèmes BIO sont rares ou monocritères** (Doltra *et al.*, 2011).
- Enjeu de quantifier les **impacts d'une généralisation du BIO** à l'échelle de grands bassins est nécessaire (Thieu *et al.*, 2010).
- **Double challenge** de la modélisation déterministe en BIO :
  - **Scientifique** : occurrence de facteurs limitants biotiques, importance accrue du flux d'azote d'origine atmosphérique et/ou exogène et possibles modifications du turn-over des matières organiques.
  - **D'ingénierie** : prise en compte de nombreuses variétés/espèces ignorées de l'agriculture conventionnelle ; rareté des données expérimentales.

# Introduction

---

- Le **projet ENBIO** vise à quantifier et à modéliser la variabilité de la production et des bilans d'eau, carbone et azote des systèmes de grande culture SE biologique et/ou bas intrants.
- La stratégie scientifique consiste à coupler expérimentation et modélisation afin d'accéder aux flux et de gérer le changement d'échelle. Les expérimentations prospectent la variabilité spatiale ou temporelle :
  - un réseau de 35 parcelles en BIO + SE suivies 3 ans dans le Nord de la France ;
  - un réseau de 3 « essais systèmes » de long terme à Versailles (F), Foulum (Dk) et DOK (Suisse).
- La modélisation s'appuie sur **STICS**, sous l'hypothèse que les formalismes conçus en agriculture conventionnelle (CONV), sont transposables en BIO, avec une calibration dédiée.



# Déroulement de la présentation

---

- Introduction
- Expérimentations
  - Suivi en situation agricole BIO du  $\text{NO}_3^-$
  - Bilan N et GES en expérimentation de longue durée
- Modélisation
- Conclusions et perspectives



# Réseau expérimental de suivi de 35 parcelles de grandes cultures BIO



- 9 agriculteurs des Hauts-de-France du réseau « Agri-bio »
- 3 saisons culturales : 2014 à 2017, pluviométries hivernales et printanières contrastées
- 11 systèmes de grandes cultures décrits par 3 parcelles x 2 blocs
- Sols peu variables majoritairement limons profonds avec/sans silex, => peu sensibles au lessivage

# Quantification des pertes d'eau et d'azote à l'échelle parcelle-année

Lessivage N = données mesurées + modèle de calcul

Climat journalier

Paramètres hydriques du sol

Biomasse et [N] toutes plantes

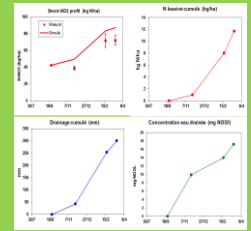
Stocks d'eau et d'azote du sol

Dates techniques culturales

LIXIM model  
(Mary *et al.* 1999)

Vitesse de minéralisation

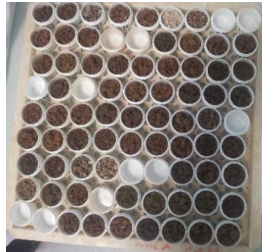
Flux d'eau et d'azote sous le sol



2015-2016

2014-2015

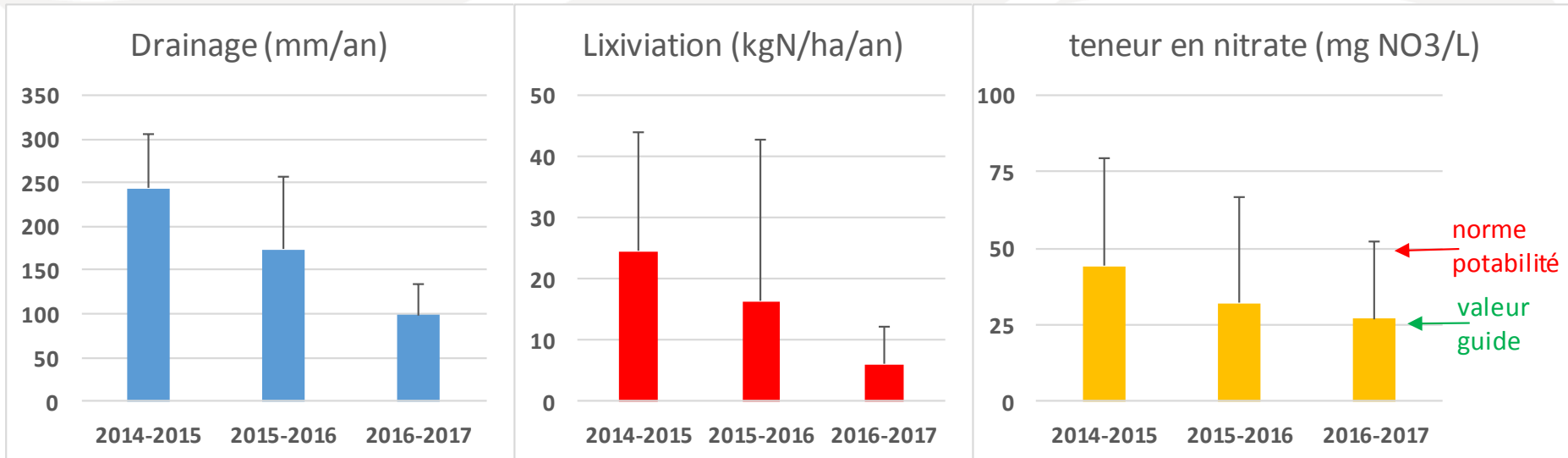
4-5 mesures/an sur sol et plantes : **mi-novembre, mi-février, mi-mars**, en juin et à la **récolte**





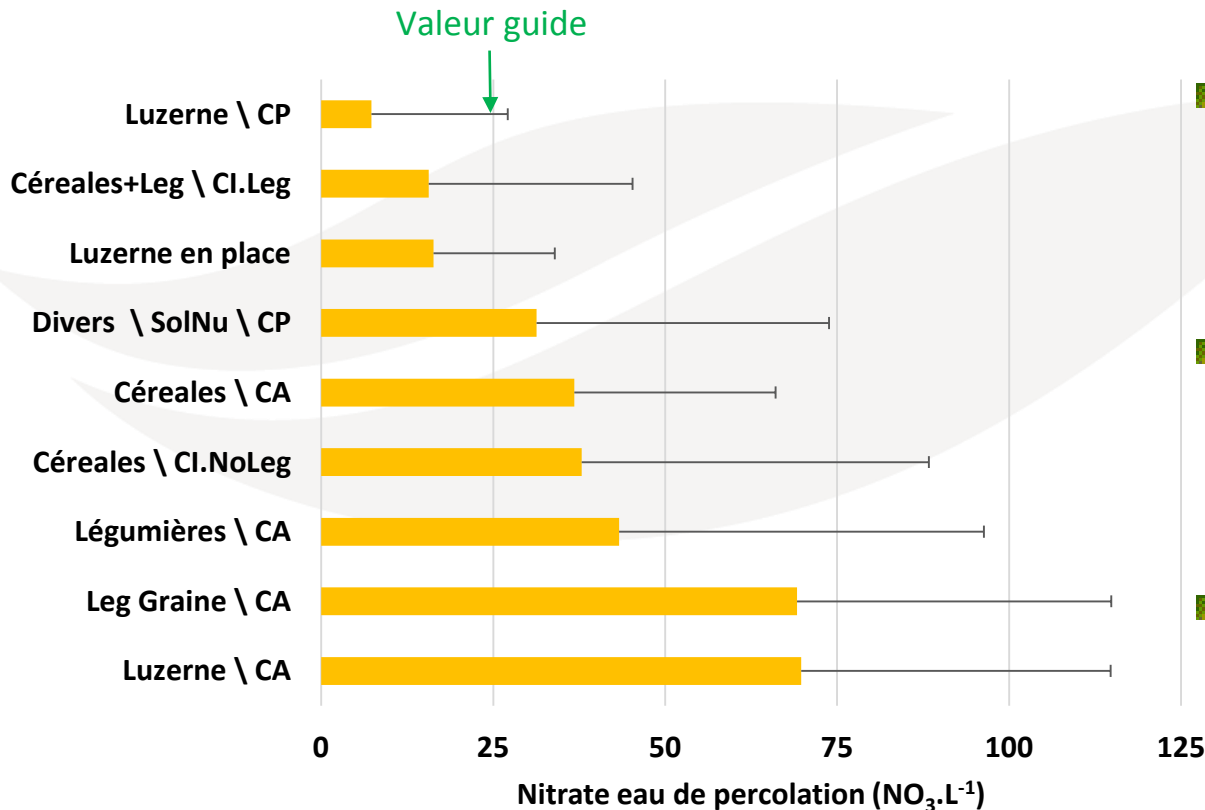
# Flux d'eau et d'azote sous la zone racinaire, à 150 cm (ou 90 cm) de profondeur

- En moyenne :  $D = 172 \text{ mm}$ ,  $L = 16 \text{ kg NO}_3\cdot\text{L}^{-1}$  et  $T = 40 \text{ mg NO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
- Teneur juste satisfaisante *versus* norme mais non satisfaisante *versus* valeur guide
- Teneur inférieure au réseau ABAC ( $53 \text{ mg NO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ ) mesurée à 90 cm, et proche des mesures en CONV ( $31 \text{ mg NO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ ) sous limon profond sur 150 cm (BAC Bruyères ; Beaudoin *et al.*, 2005)



# Typologie de teneur en nitrate de l'eau de percolation

Forte variabilité de teneur, de 7 à 70 mg NO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup> entre couples « précédent-suivant »



- Variation d'un facteur 10 > facteur 3 en AC à Bruyères (02)

- Opposition entre effets Leg : 😊 et 😞 car blé **médiocre piège**

- CI.noLeg 😞 (cf : faux semis...)

=> **Marge de progrès ?**

# Déroulement de la présentation

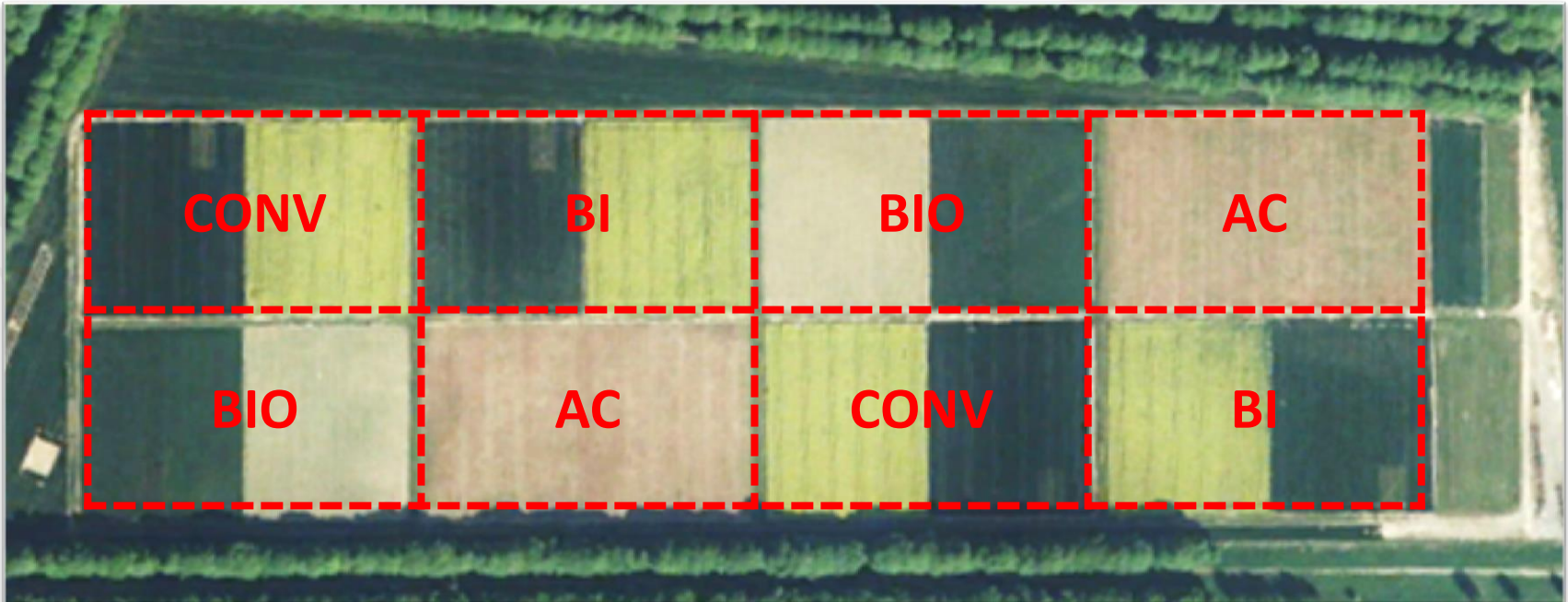
---

- Introduction
- Expérimentations
  - Suivi en situation agricole BIO du  $\text{NO}_3^-$
  - Bilan N et GES en expérimentation de longue durée
- Modélisation
- Conclusions et perspectives



# Etude expérimentale

- Essai « **La Cage** », Versailles
- Mis en place en 1998, toujours en cours
- Suivi par **UMR Agronomie Grignon**
- **4 systèmes de grande culture sans élevage**



CONV    Agriculture Conventionnelle  
BI        Agriculture Bas Intrants

BIO        Agriculture Biologique  
AC        Agriculture de Conservation

# Etude expérimentale

## Mesures

- Rendements et exportations d'azote
- Stocks C et N organiques du sol
- Stocks d'eau entrée et sortie hiver
- Stocks N minéral entrée et sortie hiver
- Emissions de  $N_2O$

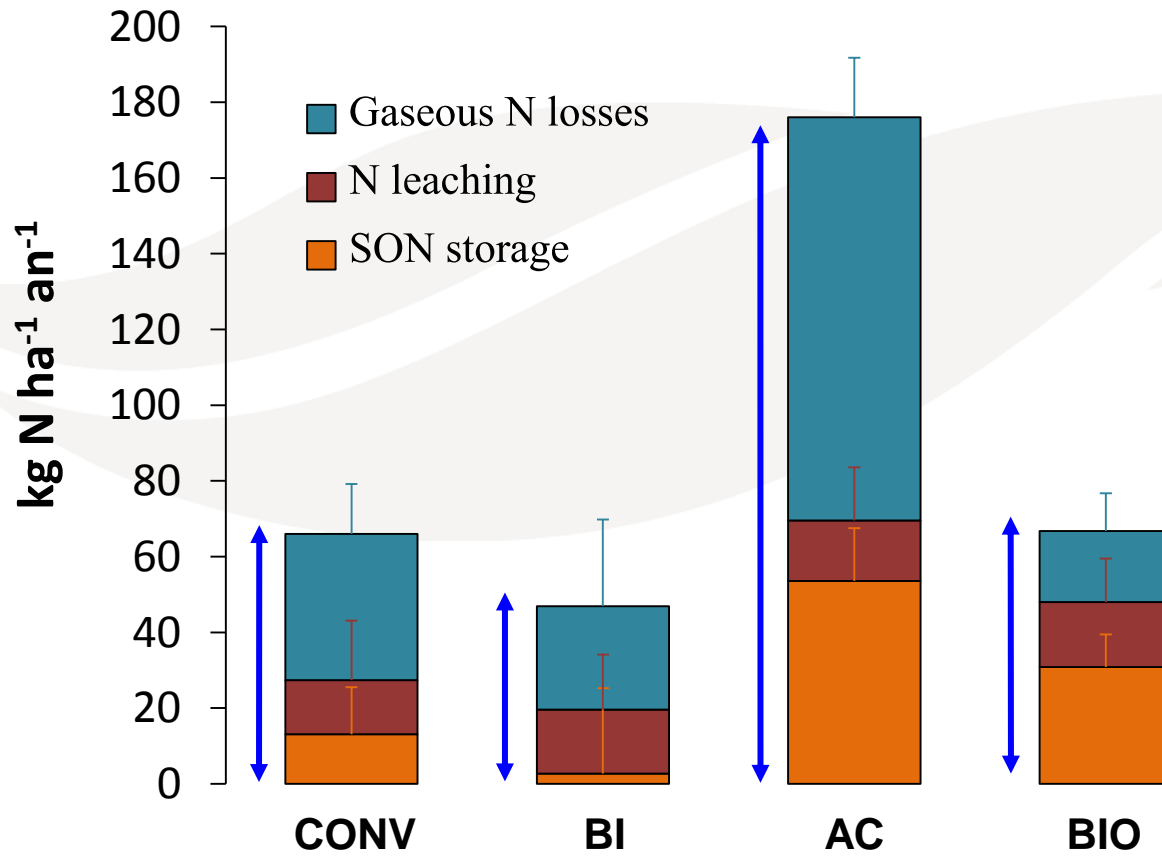
## Calculs

- (1998-2016) balance N
- (1998-2014) stockage C-N
- (2012-2017) drainage
- (2012-2017) lessivage  $NO_3$
- (2014-2017) bilan GES



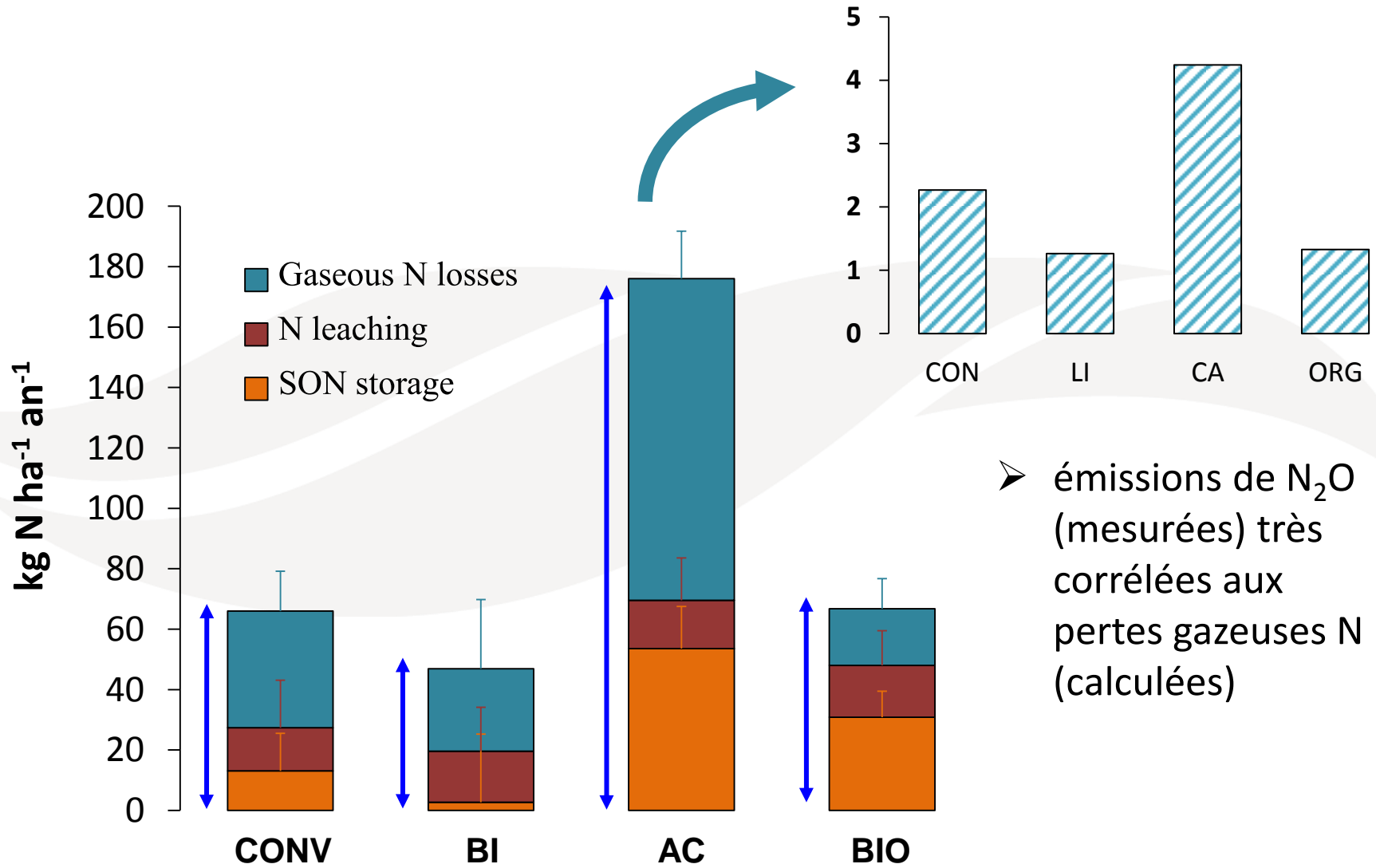
# Devenir du surplus azoté

$$\text{Surplus N} = \text{Entrées} - \text{Exportations}$$
$$= \text{Stockage N} + \text{Lixiviation} + \text{Pertes gazeuses N}$$



➤ Pertes (calculées) voie gazeuse = très fortes en AC, minimales en BIO

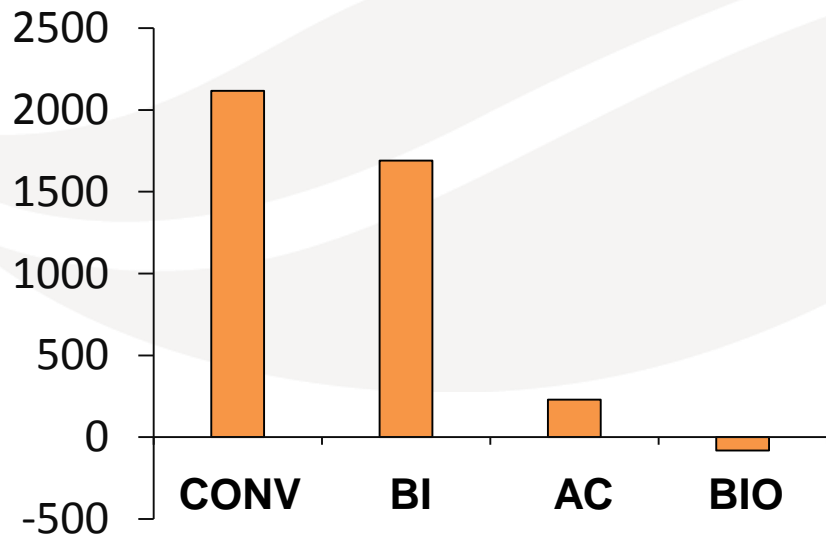
# Devenir du surplus azoté



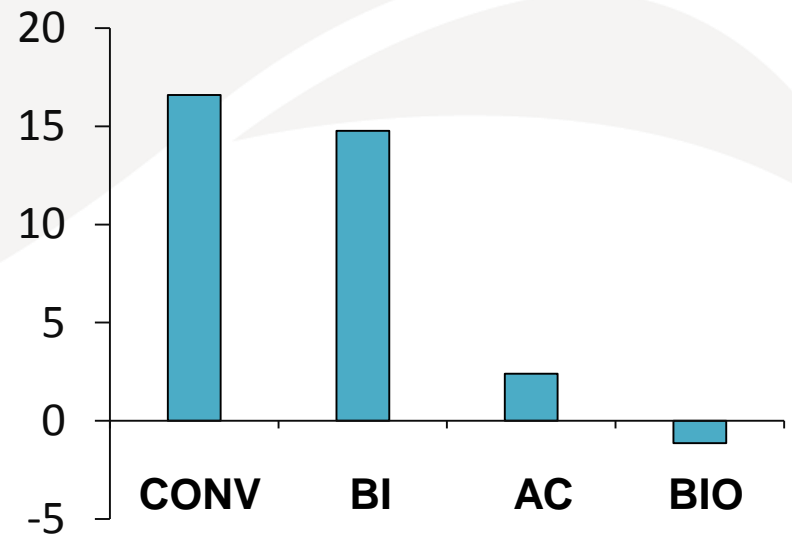
➤ émissions de N<sub>2</sub>O (mesurées) très corrélées aux pertes gazeuses N (calculées)

# Bilan Gaz à Effet de Serre (GES) (émissions directes et indirectes)

par unité de surface  
(kg CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)



par unité de N exporté  
(kg CO<sub>2</sub>-eq kg<sup>-1</sup> N)



=> Importance de l'approche multicritère





# Déroulement de la présentation

---

- Introduction
- Expérimentations
- Modélisation
  - Adaptation de STICS en BIO
  - *Yield gap analysis* en situation agricole
  - Modélisation du bilan à long terme en essais
- Conclusions et perspectives



# Principe de la calibration de STICS en BIO

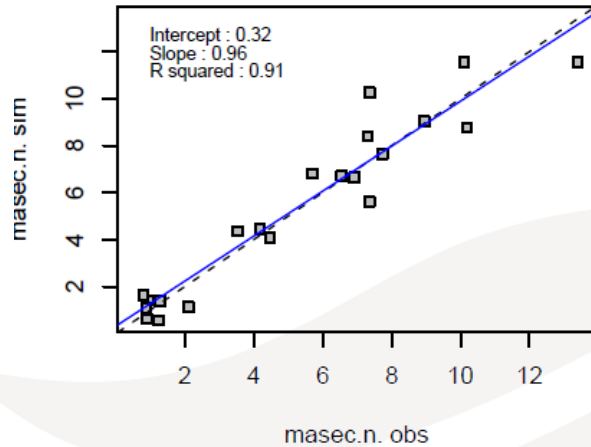
## Adaptation du modèle

- Adaptation du modèle à des situations BIO qui **reprend les mêmes formalismes** qu'en CONV
- Utilisation d'une **version de recherche** dite « **à réserve** » qui a permis une amélioration cruciale en BIO du système racinaire
- Paramétrage **directement applicable** à des situations en CONV

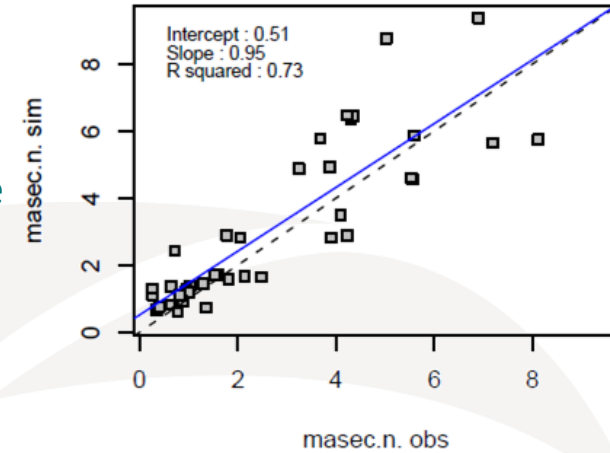
## Particularité de la calibration et du test en BIO

- Le modèle ne tient pas compte de la **pression en bio-agresseurs**
  - Ne sélectionner que des jeux de données avec peu ou pas de bio-agresseurs
1. **Paramétrage de nouvelles variétés adaptées au BIO**
    - Phénologie de la plante (émergence, stade épi 1 cm, remplissage du grain...)
    - Sensibilité au photopériodisme et à la vernalisation
  2. **Paramétrage de nouvelles espèces**
    - On calibre module par module (rendement, LAI...) + contrôle simulations plante **et** sol.
    - **Besoin fort de jeux de données** et contrôle de ceux-ci indispensable

# Quelques résultats d'une calibration en BIO

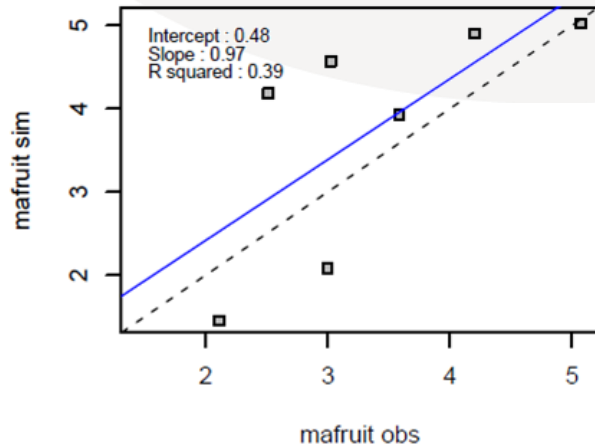


Simulation de la biomasse aérienne

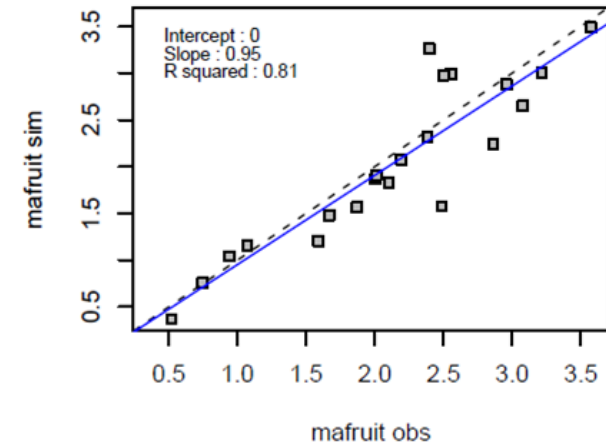


Blé d'hiver

Féverole d'hiver



Simulation du rendement



# Déroulement de la présentation

---

- Introduction
- Expérimentations
- Modélisation
  - Adaptation de STICS en BIO
  - *Yield gap analysis* en situation agricole
  - Modélisation du bilan à long terme en essais
- Conclusions et perspectives

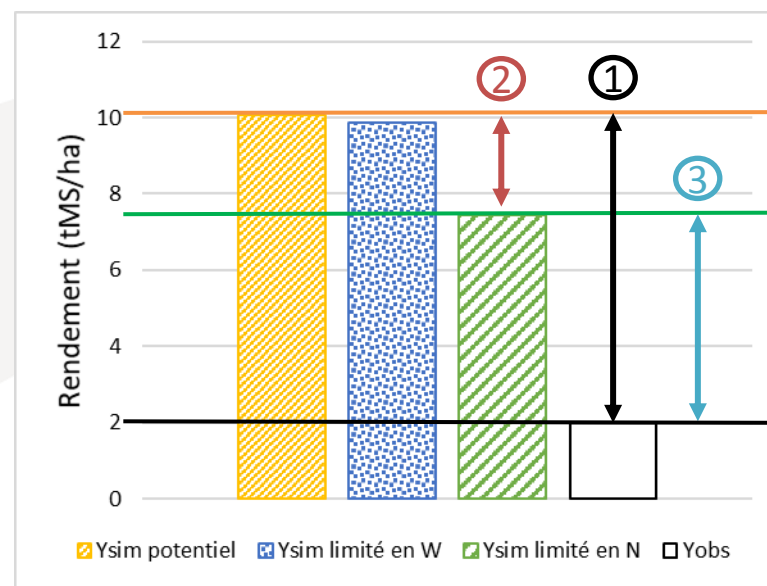


# Mise en œuvre de la *Yield Gap Analysis*

## ■ Obtenir le rendement potentiel

Utilisation du modèle de simulation  pour obtenir :

- Rendement potentiel
- Rendement avec stress hydrique
- Rendement avec stress azoté



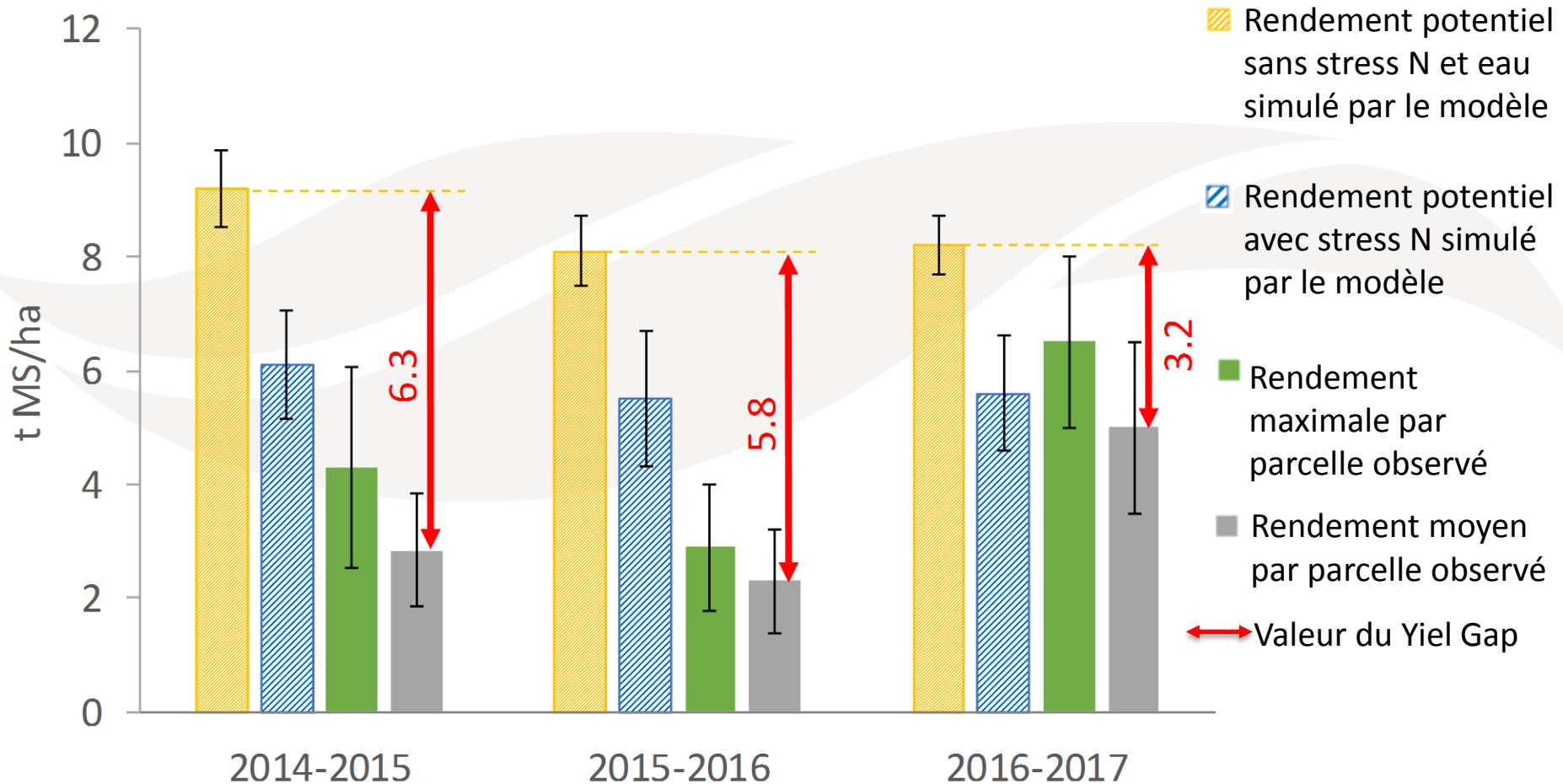
① ⇒ Permet de calculer le Yield Gap

② ⇒ Permet d'isoler les effets de la fourniture en azote et en eau

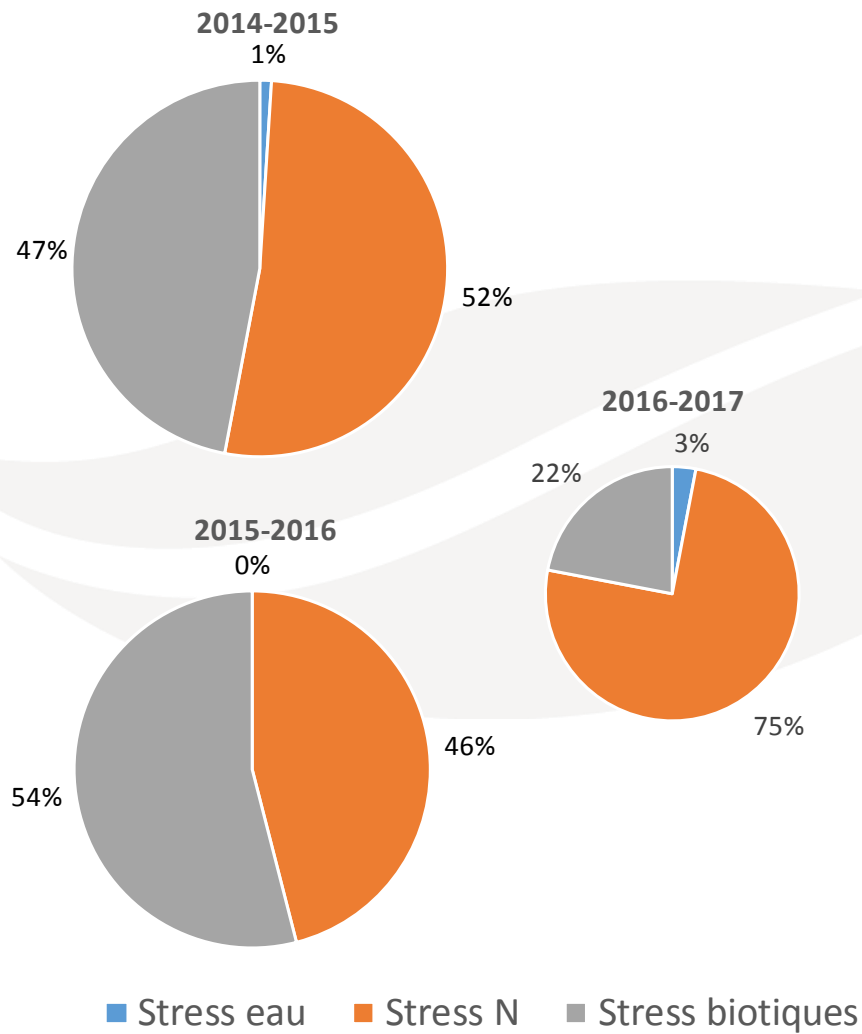
③ ⇒ Permet de calculer le Yield Gap "résiduel" et de le confronter aux facteurs biotiques mesurés sur le terrain

# Quantification du Yield Gap - Cas du blé

Ysim.pot Ysim.N Yobs.max Yobs.moy



# Quantification des différents stress du Yield Gap



➤ Parts du *yield gap* du blé expliqués par les différents facteurs de stress : eau, azote et biotiques, pour les trois années suivies

**=> Passer du diagnostic au pronostic d'amélioration ?**

# Déroulement de la présentation

---

- Introduction
- Expérimentations
- Modélisation
  - Adaptation de STICS en BIO
  - *Yield gap analysis* en situation agricole
  - Modélisation du bilan à long terme en essais
- Conclusions et perspectives

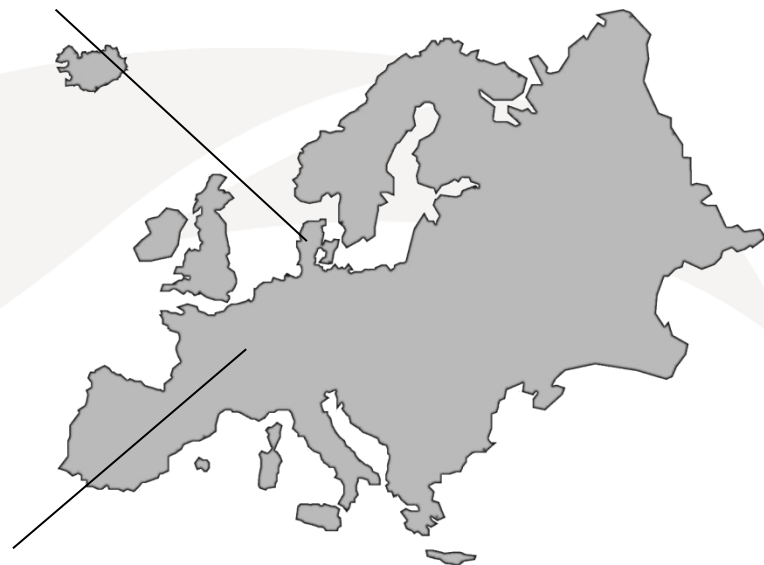




# Etudes expérimentales

- Essai « **Foulum** », Danemark
- Mis en place en 1997
- 716 mm et 8,2°C, sol sableux
- **4 systèmes de grande culture sans élevage**
  - **1 CONV**  
C4-CC+IF
  - **3 BIO**  
O4+CC-M | O2+CC-M | O2+CC+M

- Essai « **DOK** », Suisse
- Mis en place en 1978
- 860 mm et 10,7°C, sol limoneux profond
- **4 systèmes de grande culture sans élevage**
  - **2 CONV**  
CONMIN | CONFYM
  - **2 BIO**  
NOFERT | BIOORG

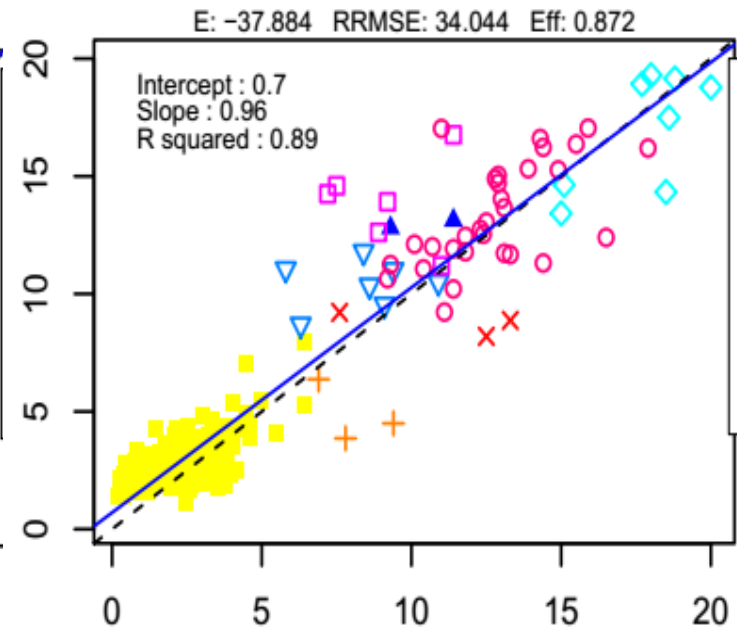
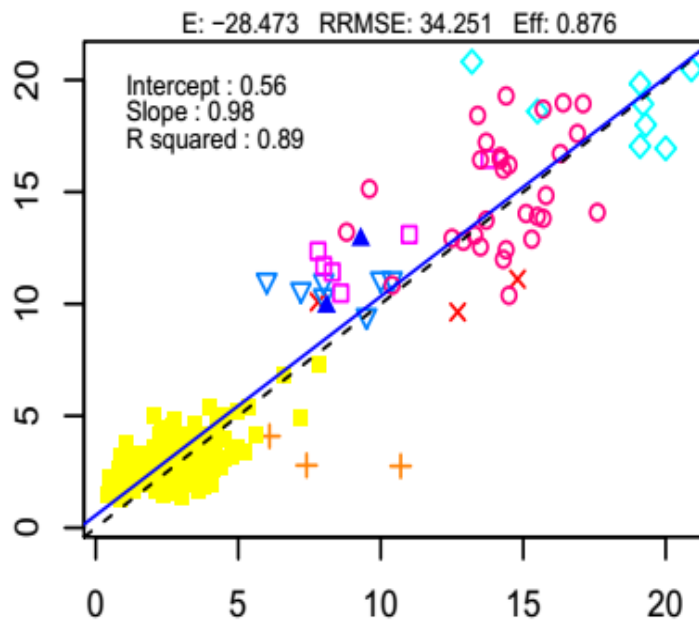


# Simulation de la production

CONVENTIONNEL

BIOLOGIQUE

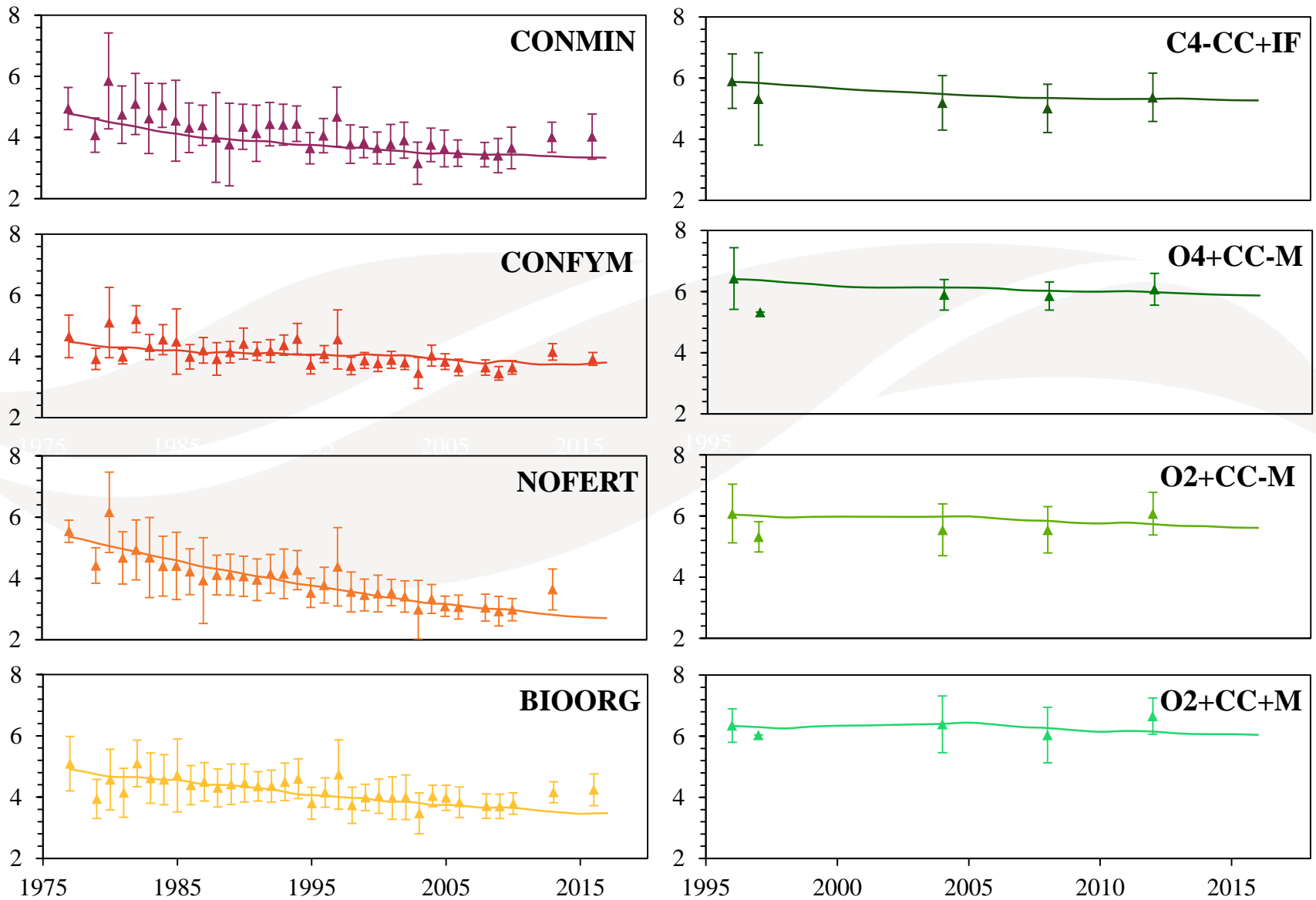
Biomasse aérienne  
simulée (t MS ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)



- crops
- × beetroot
  - + cabbage
  - clover grass
  - grass
  - ▲ mustard
  - potato
  - ◇ silage mais
  - ▽ soy bean
  - ▲ spring wheat
  - ✱ vetch
  - winter barley
  - winter wheat

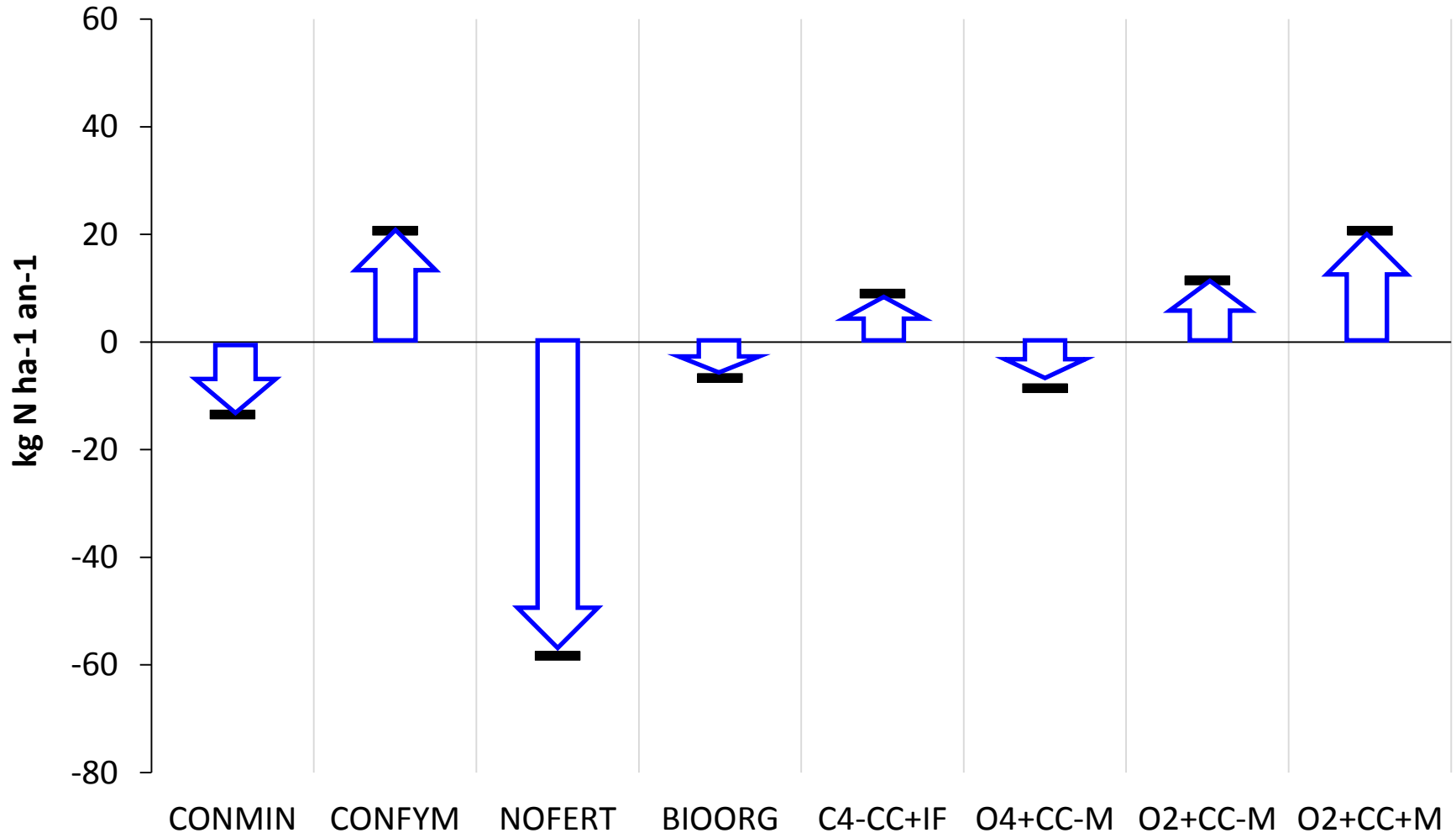
Biomasse aérienne mesurée  
(t MS ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)

# Simulation stocks N organique sol (t.N.ha<sup>-1</sup>)

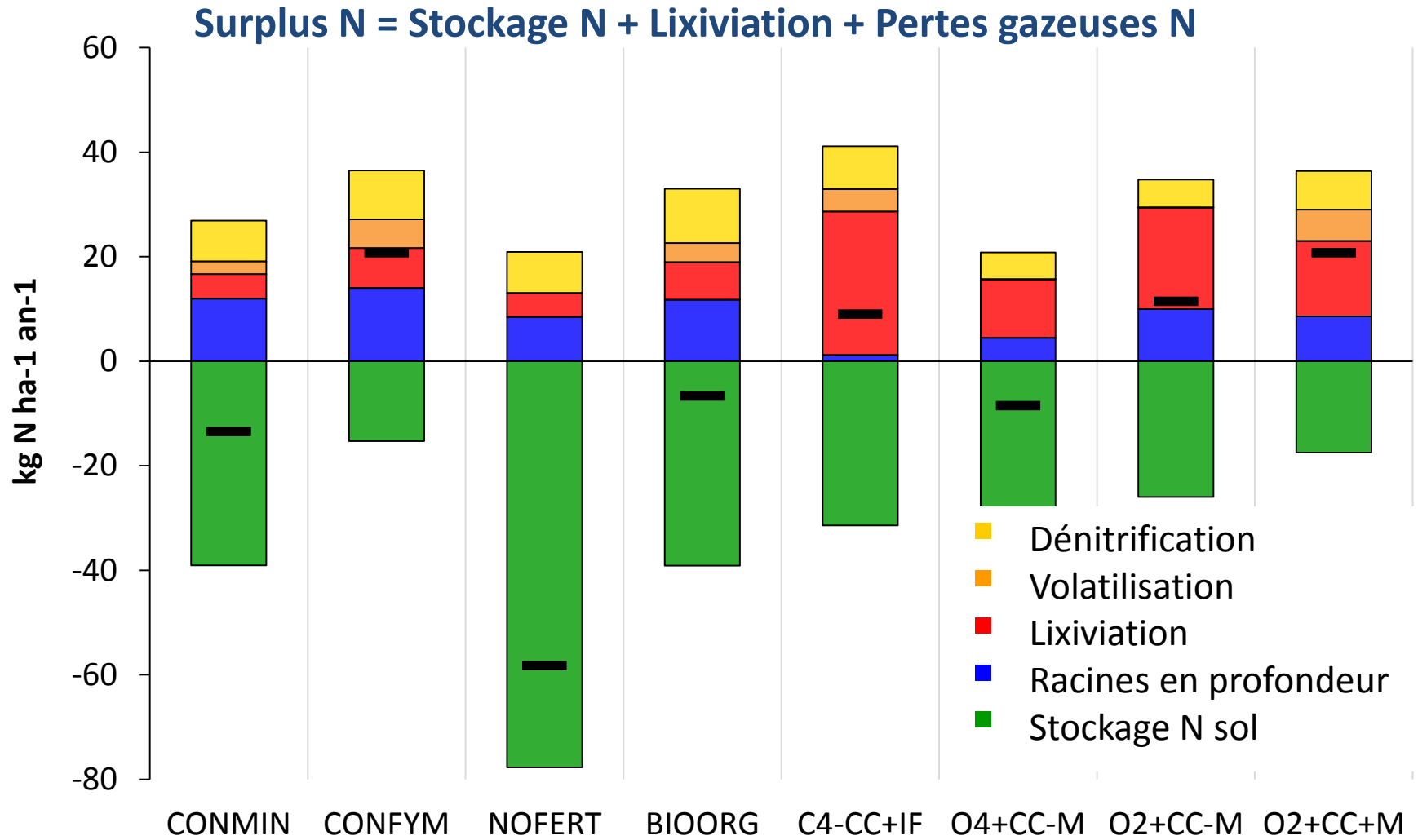


# Surplus N

Surplus N = Entrées - Exportations



# Devenir du Surplus N simulé



=> Devenir variable vs traitement et pédoclimat

# Déroulement de la présentation

---

- Introduction
- Expérimentations
- Modélisation
- Conclusions et perspectives



# Conclusions et perspectives

---

- Ces résultats confirment **l'importance des éléments C et N** dans l'évaluation de l'impact environnemental et l'enjeu d'une **évaluation multicritère à long terme** des systèmes alternatifs dont la variabilité rend caduque une approche nominale.
- La modélisation déterministe en BIO, à court terme ou à long terme, s'avère **prometteuse**, à condition d'en définir le domaine de validité et de **disposer de bases de données** pour calibrer le modèle, encore insuffisantes.
- Cette version de STICS sera utilisée dans la plateforme du PIREN-Seine.
- Les autres perspectives, si financement, seront de continuer :
  - le **diagnostic d'impact** à l'échelle de la rotation culturale sur les données des réseaux ABAC et ENBIO.
  - la modélisation d'accompagnement du test multicritère **de scénarii innovants** proposés par les agriculteurs BIO.



# Merci de votre attention

## Quantification et modélisation de la variabilité de la production et bilans C et N en systèmes de culture biologiques

*Nicolas Beaudoin, Bénédicte Autret, Lucia Rakotovololona,  
Florent Chlébowski, Aïcha Ronceux, Michel Bertrand,  
Paul Mäder, Jorgen Olesen, Loïc Strullu, Bruno Mary*

### Soutien financier



### Partenaires

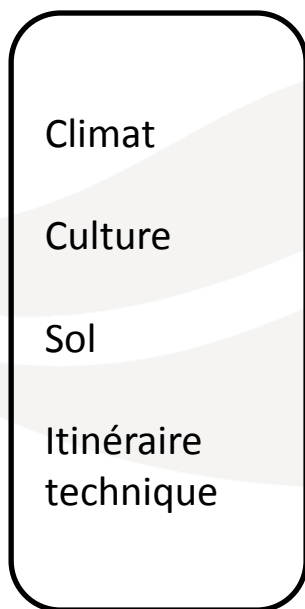




# Fonctionnement du modèle STICS

- Modèle STICS à vocation agronomique et environnementale

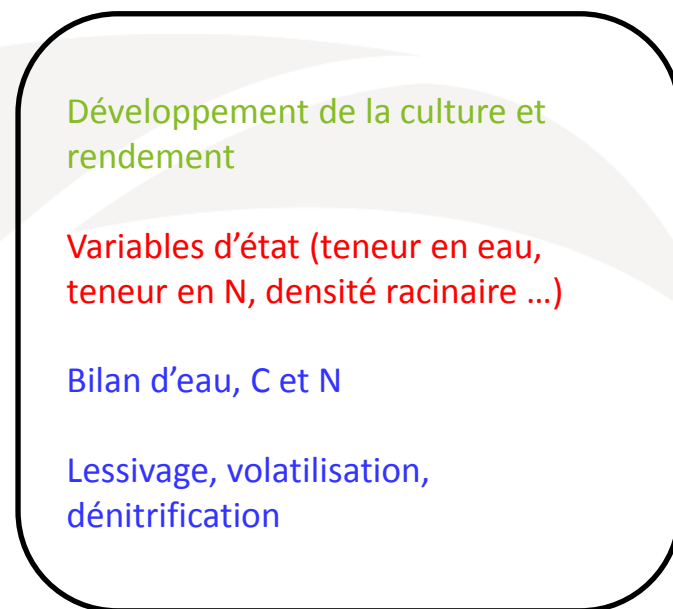
Données en entrée



Pas de temps  
journalier



Données en sortie



- Adaptation du modèle pour prendre en compte les ITK rencontrés en BIO



# Dispositif de « La Cage »

Traitements	Conventionnel (CONV)	Bas intrants (BI)	Agriculture de conservation (AC)	Agriculture biologique (BIO)
Rotation	Blé-pois-blé-colza	Blé-pois-blé-colza	Blé-pois-luzerne-luzerne-blé-colza	Blé-luzerne-luzerne-blé
Couvert végétal	-	-	Luzerne	-
Labour	Tous les ans	Tous les 2 ans	Non labour	3 années sur 4
Fertilisation azotée (kg N ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	143	114	104	10
Rendement blé (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	9.7	8.9	6.7	5.4



# Dispositif de Foulum

**Foulum (Danemark), début : 1997**

716 mm et 8,2°C



		Foulum (Danemark)			
Traitements		C4-CC+IF	O4+CC-M	O2+CC-M	O2+CC+M
		conventionnel	biologique	biologique	biologique
Cultures principales		Avoine - Blé - Triticale - Pois/orge		Orge - Prairie -Blé - Pois/orge	
Cultures intermédiaires		Mélanges variables (raygras, chicorée, trèfle, vesce...)			
N minéral	kg N ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	55	-	-	-
N organique		-	-	-	54



# Dispositif DOK

**DOK (Suisse), début : 1978**

860 mm et 10,7°C



		DOK (Suisse)			
Traitements		CONMIN	CONFYM	NOFERT	BIOORG
		conventionnel	conventionnel	biologique	biologique
Cultures principales		Maïs - blé 1 - soja - pomme de terre - blé 2 - prairie 1 - prairie 2			
Cultures intermédiaires		Mélanges variables (raygras, trèfle, vesce...)			
N minéral	kg N ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	97	101	-	-
N organique		-	54	-	94



# Emissions de GES

