

# La modélisation des cycles biogéochimiques à l'échelle territoriale : État de l'art, limites, perspectives



Jean-Louis Drouet  
UMR Environnement et Grandes Cultures, Grignon  
drouet@grignon.inra.fr

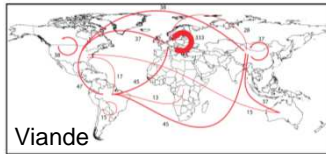
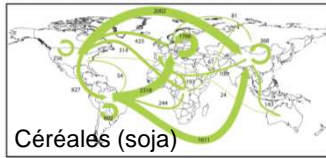
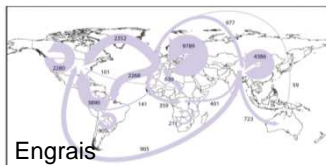
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

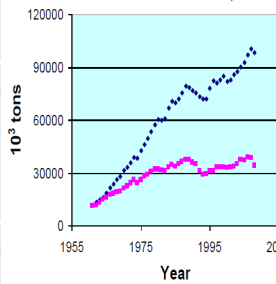


## Contexte global

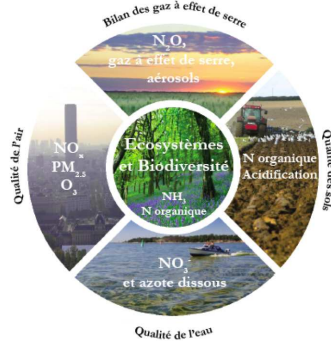
Augmentation de la consommation alimentaire  
Mondialisation des échanges  
et des cycles biogéochimiques



Augmentation de la consommation mondiale d'engrais minéraux  
N x 8 et P x 3,5



Impacts multiples sur l'environnement et la santé



Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



## L'échelle territoriale

### Mosaïque paysagère

- physique (champs cultivés, prairies, forêts, haies, zones naturelles, fossés...)
- anthropique (villages, bâtiments d'élevage, routes, chemins...)

### = ensemble de puits et de sources

des éléments biogéochimiques  
**interagissant** en fonction  
 des conditions pédo-climatiques

Intensité des puits, sources et interactions

**modulées, gérées par les acteurs humains**

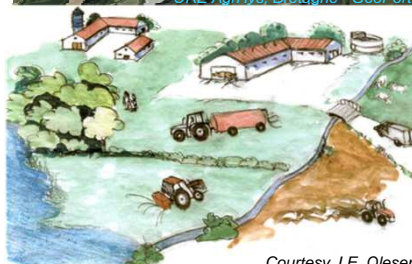
à différentes échelles : agriculteurs, décideurs...

### Avec de nouveaux enjeux :

- atténuation impacts environnementaux
- services écosystémiques
- adaptation systèmes de production
- organisation des activités agricoles
- organisation des filières...



ORE AgrHys, Bretagne - GeoPortail



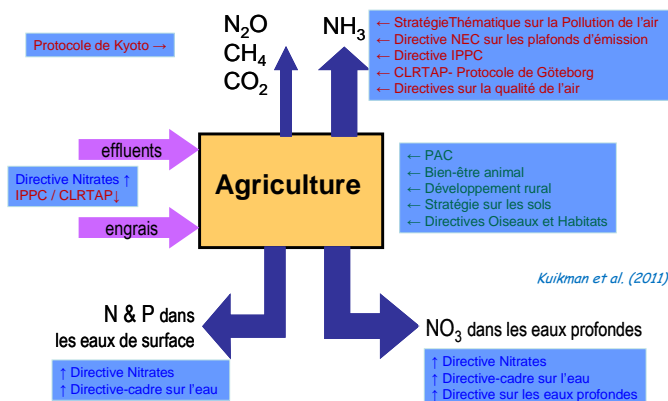
Courtesy J.E. Olesen

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
 Paris - 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
 AGRICULTURE  
 ENVIRONNEMENT



## Nombreuses politiques publiques mises en oeuvre exemple de l'azote (et du phosphore)



Mais...

des approches par **éléments** (C, N, P), par **espèces** (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>3</sub>, NO, N<sub>2</sub>O...)  
 par **milieux** (eaux et sols, agro-écosystèmes, air) par **processus**  
 par **disciplines** plus ou moins cloisonnées, par **secteurs**  
 à des **échelles** variées

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
 Paris - 20-21 novembre 2012

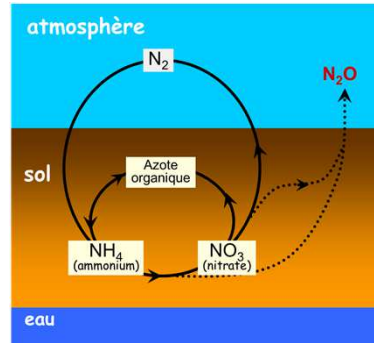
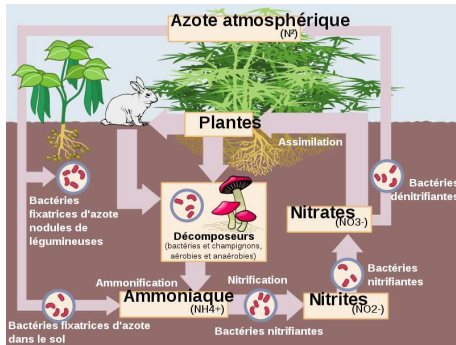
ALIMENTATION  
 AGRICULTURE  
 ENVIRONNEMENT



## Qu'est-ce qu'un modèle ?

**Modèle** = représentation de la réalité  
 simplification et abstraction de la réalité  
 = outil pour répondre à un objectif  
 mais n'est pas une fin en soi

**Multitude de modèles** pour représenter un même objet  
 (ex : cycle de l'azote)



Rochette (2011)

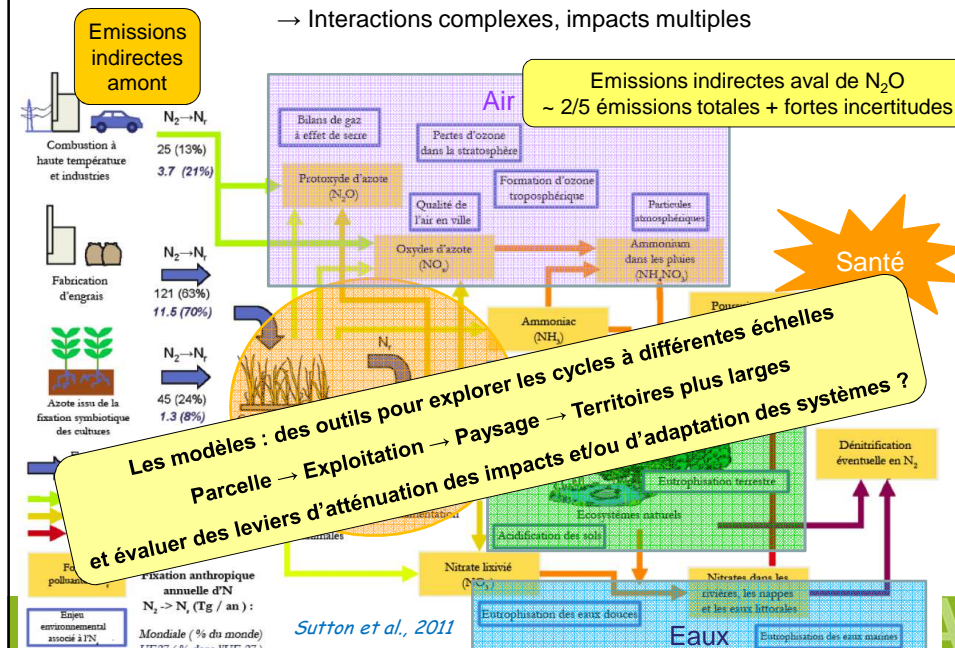
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
 Paris - 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
 AGRICULTURE  
 ENVIRONNEMENT



## La cascade de l'azote dans les territoires

→ Interactions complexes, impacts multiples



## Pourquoi modéliser ?

Pour atteindre des objectifs scientifiques et appliqués

### Comprendre les phénomènes

#### → Analyser / disséquer les phénomènes

- Formuler des hypothèses
- Imaginer des expérimentations
- Guider l'acquisition des données

#### → Synthétiser / intégrer des connaissances

- Analyser la cohérence et les lacunes
- Evaluer la capacité prédictive

### Accéder à des mesures

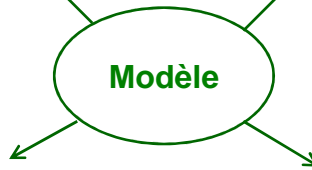
et/ou des paramètres  
difficilement mesurables  
"Expérimentation virtuelle"

### Prédire des phénomènes

#### Contrôler/maîtriser

#### Piloter/gérer

Outils d'aide à la décision



### Transmettre les connaissances

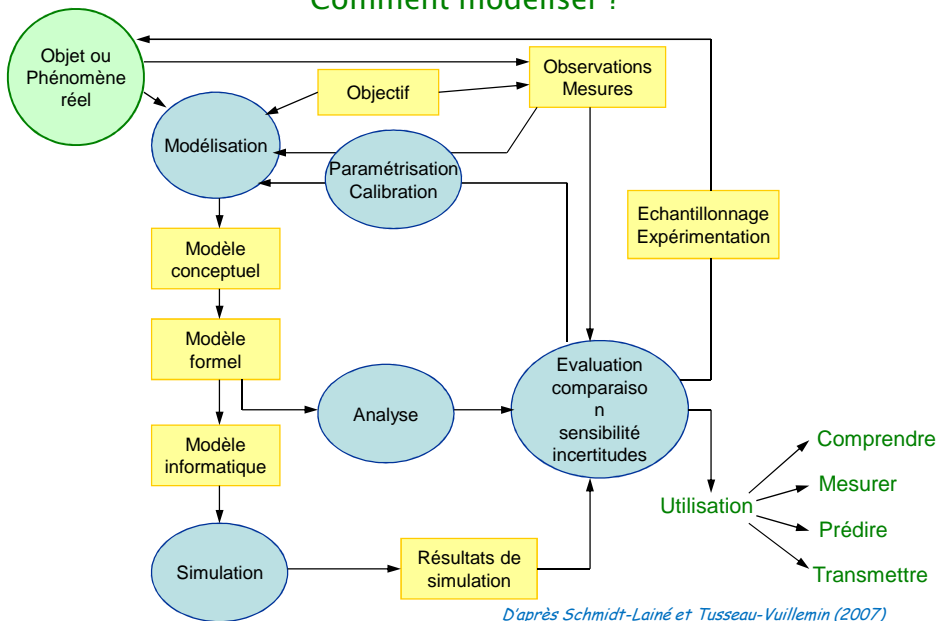
Exprimer, organiser, simplifier

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## Comment modéliser ?



D'après Schmidt-Lainé et Tusseau-Vuillemin (2007)

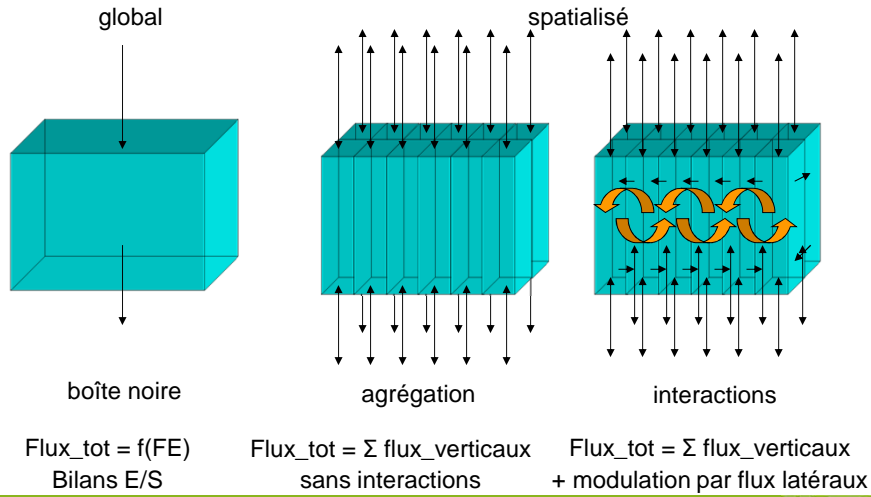
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## Comment modéliser la cascade de l'azote dans les territoires ?

- Quelles spécifications (cahier des charges) du modèle / objectif ?
- Quelles représentations spatio-temporelles dans le modèle / objectif ?



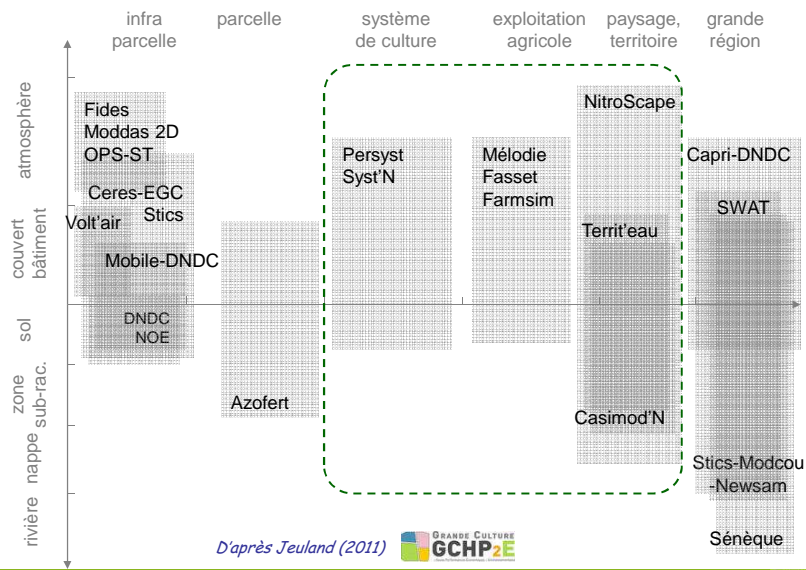
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

12

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## Modélisation des flux d'azote en fonction des échelles spatiales et des milieux

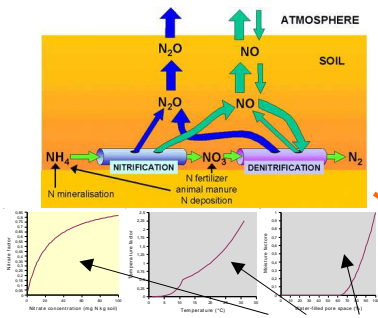


Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## De modélisations des flux à l'échelle locale...

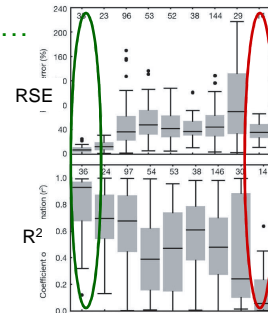


Denitrif. rate = f(PDR, NO<sub>3</sub>, T, WFPS)  
D'après Hénault et al. (2005)

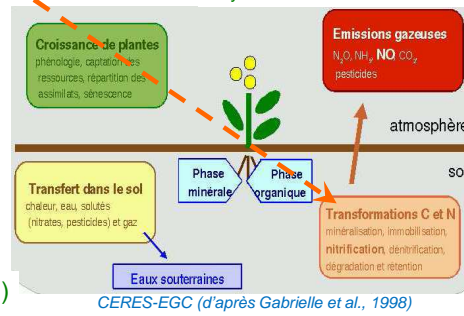
... à des intégrations à la parcelle...

- Données biophysiques : sol, climat, ITK
- Expérimentations parcelles → multi-sites
- Analyses d'incertitude, de sensibilité

... et dans des plateformes (RECORD...)



Phys.Chim. Variable Biol.



CERES-EGC (d'après Gabrielle et al., 1998)

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

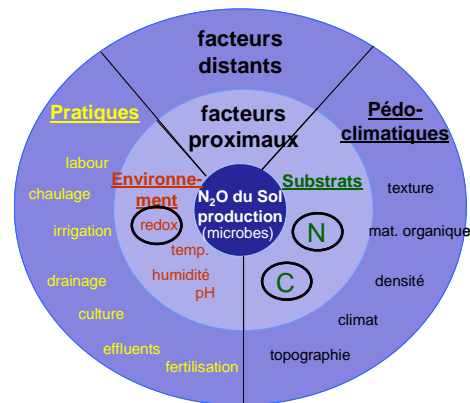
INRA

## Nombreux leviers aux échelles locale et parcelle

- Nombreux travaux de modélisation
- Expérimentations mono- et multi-sites
- Gestion locale (parcelle)

- Fertilisation  
quantités, types (minéral / organique)  
dates (climat), doses, modalités...
- Travail du sol  
labour / non-labour...
- Sélection variétale  
efficacités  
sélection, mélanges variétaux...
- Récoltes et résidus  
export / sur place, recyclage  
CIPAN...

→ Comment les intégrer à l'échelle territoriale  
(exploitation et au-delà...)?



Contrôle des émissions  
de N<sub>2</sub>O par dénitrification  
(d'après Rochette, 2011)

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## Des leviers aux échelles supra-parcellaires ?

### → Gestion des exploitations agricoles

- Pratiques : parcelles, bâtiments d'élevage, effluents, agribio...
- Systèmes de culture : successions culturales, pâturage...
- Usage des sols : alimentaire / non-alimentaire, légumineuses, CIPAN...

### → Mesures agro-environnementales dans les paysages / territoires

- Modification de la structure paysagère :  
agencement spatial des parcelles, haies, fossés, bandes enherbées, zones tampons...
- Application uniforme / non-uniforme : protection zones sensibles (abandon)...

### → Impacts de contextes locaux et globaux : décisionnel, socio-économique

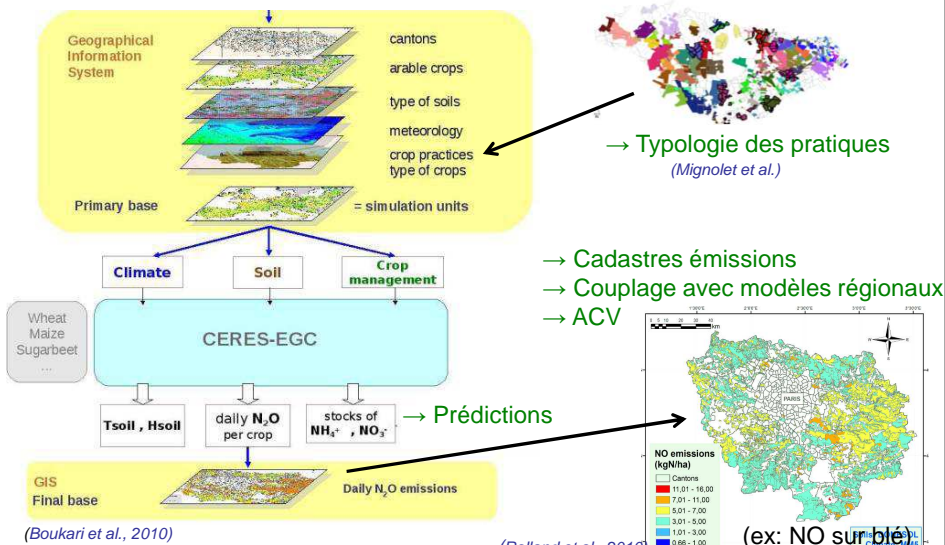
- Politique (directives...), économique (prix...), climatique (réchauffement...)
- Relocation territoriale des activités / filières, bassins de consommation

### → Comment évaluer ces leviers / impacts avec les modèles ?

- Comment traduire ces leviers en scénarios ?
- Comment traduire les scénarios en variables d'entrée aux modèles ?
- Quels modèles choisir et intégrer ?
- Quelles modalités d'intégration territoriale des cycles ?
- Quelles données utiliser, acquérir ?
- Quelles variables cibles pour l'évaluation ? Comment ?

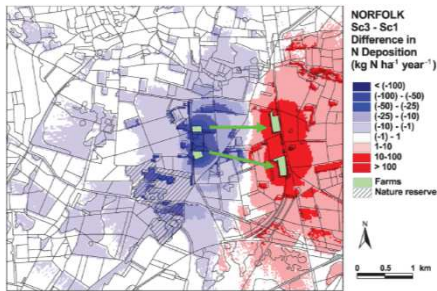
## Modélisation des flux à l'échelle territoriale par agrégation

### → Spatialisation des modèles parcellaires

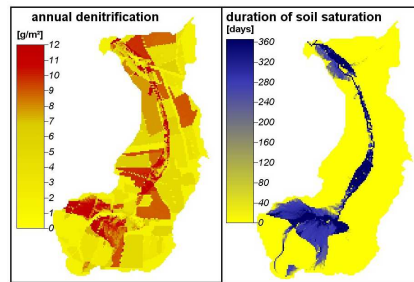


## Modélisation des flux à l'échelle territoriale en tenant compte des interactions spatiales

- Modélisation des flux à une échelle relativement locale
- Modélisation par milieu (atmosphère, hydrosphère...)
- Gestion de l'azote (exploitation...) non prise en compte



Effet de l'éloignement de sources de NH<sub>3</sub> sur les dépôts sur une zone naturelle (Dragosits et al., 2005)



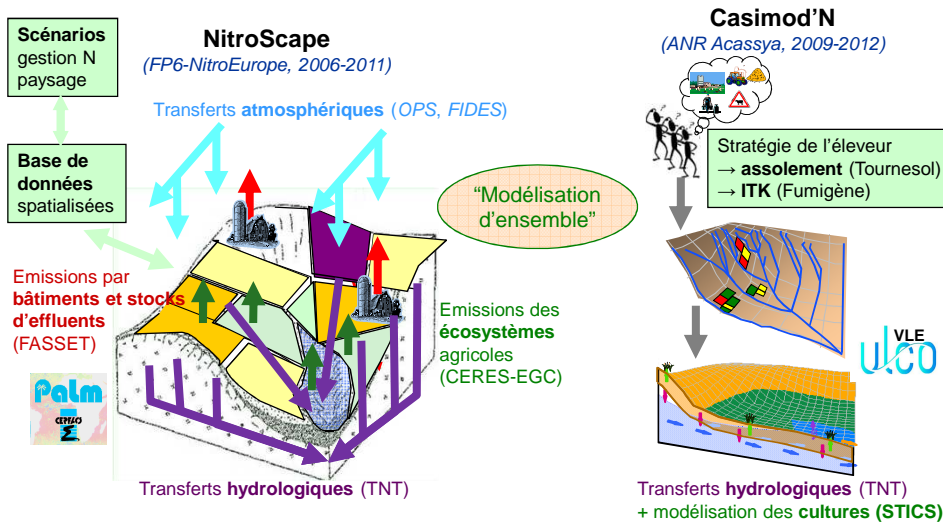
Effet de la remontée de nappe sur la distribution spatio-temporelle de la dénitrification (Oehler et al., 2009)

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## Modélisation intégrée de la cascade de l'azote dans les paysages avec interactions



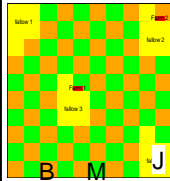
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA



## Simulation des flux d'azote (directs + indirects) dans une mosaïque paysagère

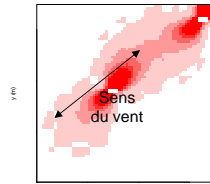


Cas d'étude :  
70x70 mailles de 25x25 m<sup>2</sup>  
400 truiés et 8000 porcelets  
Maïs (M) et Blé (B)  
Fertilis. M&B 240 kg N/ha  
4 zones non cultivées (J)

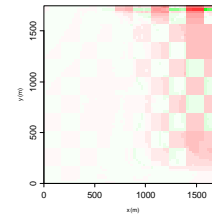
*D'après Duret et al. (2011)*

→ Et ensuite :

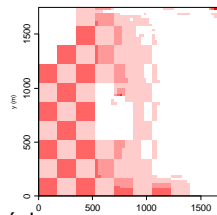
- Quantification paysages réels
- Evaluation scénarios



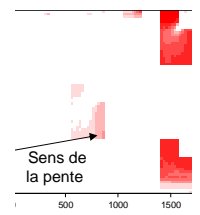
Dépôt sec de NH<sub>3</sub>  
(kg NH<sub>3</sub>-N /ha /an)



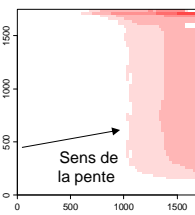
Emissions indirectes de N<sub>2</sub>O  
(kg N<sub>2</sub>O-N /ha /an)



Pertes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>  
(kg NO<sub>3</sub>-N /ha /an)



Recapture de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>  
(kg NO<sub>3</sub>-N /ha /an)



Nombre de jours où  
le sol est saturé

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ENVIRONNEMENT

## Limites liées à la modélisation intégrée

→ Choix des modèles à utiliser ?

- Disponibilité des modèles élémentaires ? Ecosystèmes semi-naturels ?
- Adaptabilité des modèles de processus / parcelle aux contextes territoriaux ?

→ Cohérence des modèles intégrés ?

- Niveau de description des processus ?
- Résolutions spatiale, temporelle ?
- Propagation des incertitudes, sensibilité ?
- Disponibilité des données pour paramétrisation, calibration, évaluation ?
- Compatibilité modèles intégrés / bases de données ?
- Capacité des modèles à simuler / évaluer les scénarios ?

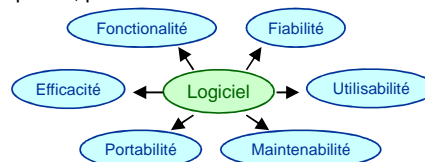
→ Modalités de couplage entre modèles élémentaires ?

- Outils d'intégration : couplages "faibles", coupleurs, plateformes de modélisations... ?
- Généricité, modularité ?
- Qualité logicielle des modèles ?

→ Moyens humains et matériels ?

→ ... des modèles de compréhension

... vers des modèles opérationnels... ?



Décomposition de la qualité d'un logiciel  
ISO/CEI 9126 (Constantinidis, 2005)

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

AGRICULTURE ENVIRONNEMENT



## Limites liées aux données



Occupation des sols  
Enquêtes sur pratiques

ORE AgrHys (Bretagne)  
Kervidy-Naizin (4.9 km<sup>2</sup>)

Mesures biogéochimiques



### → Besoin de données variées pour les modèles de cascade de l'azote

- Données d'inventaires, cartes (topographie, sols, occupation des sols...)
- Pratiques agricoles : gestion des parcelles et troupeaux (bâtiments, pâturage)
- Données d'évaluation des modèles intégrés et/ou élémentaires :  
mesures spatio-temporelles des flux et concentrations de Nr (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>...)

### → Organisation et gestion des bases de données

- Disponibilité de bases de données "territoriales" : dispositifs "territoires" (ORE, ZA...)
- Standardisation des protocoles
- Stratégies d'échantillonnage, représentativité / coût
- Qualité des données (AQR) : fiabilité...
- Utilisabilité des données : confidentialité...
- Adéquation données / modèles / scénarios, formats d'échanges
- Archivage, maintenance

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



## Objectifs du projet ESCAPADE (2013-2017)

Evaluation de Scénarios sur la Cascade de l'Azote  
dans les Paysages Agricoles et moDELisation territoriale



### → Analyser l'effet des **activités agricoles** et de la **mosaïque paysagère** sur la **cascade de l'azote** dans les territoires

- approches : - construction de scénarios de gestion de l'azote
  - modélisation : comprendre les processus et interactions spatiales  
quantifier les flux d'azote  
évaluer les scénarios
  - observations des flux d'azote
- échelles : - surtout des paysages (5 à 30 km<sup>2</sup>)  
- mais aussi de plus grands territoires (régions)

### → Proposer des pistes d'**atténuation des pertes d'Nr** dans l'environnement et/ou d'**adaptation des systèmes de production** aux changements globaux

### → Etablir un **partenariat recherche / développement interdisciplinaire** sur la gestion de l'azote et des territoires

**INRA** (EGC, SAS, ASTER, SOLS, MIAJ, PEGASE, BIA, BEF)  
**CNRS** (FIRE, ECOLAB, LISA), INRA-TR, CERFACS, LISIC, CESBIO  
**Instituts techniques** (Arvalis-IV, CETIOM), **Coopératives** (Terrena, Triskalia)

Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



## Quelques éléments de synthèse et de perspectives

Territoire = système complexe -----> gestion complexe  
représentations - scénarios - modèles - données

- Nombreux modèles de recherches sur cycles N, P (et C), processus → parcelle  
Surtout milieux cultivés, peu écosystèmes (semi-)naturels  
Compréhension, prédiction, évaluation  
Mais approches souvent mono-impact, -question, -milieu, -élément, -facteur  
Mesures disjointes à effets contradictoires interactions entre milieux, éléments, cycles
- Quelques outils (dont modèles) de gestion des cycles à la parcelle et système de culture  
Concept de cascade N dans les territoires encore peu mobilisé (non pour P ?) → N-P  
Non encore utilisable pour des cas réels (peu de données)  
Pas d'outils pour gérer les flux et atténuer les fuites dans les territoires  
Besoins de partenariats de recherche multi-disciplinaires
- Modèles : outils d'intégration, interaction, synthèse, formalisation, évaluation...  
Intégration de modèles élémentaires (plateformes...)  
Utilisation de (bases de) données, dispositifs "territoriaux"  
Construction de scénarios : directive → entrée → modèle → sortie → gestion ?
- Passage à l'opérationnel : simplification des modèles ou de leur utilisation  
Partenariats avec socio-économie, développement, décideurs...

## Des actions internationales intégrées

- 
  - NinE: Nitrogen in Europe
  - ENA: European Nitrogen Assessment (2008-2011)
- 
  - NitroEurope-IP (FP6, 2006-2011)
- 
  - Eclaire-IP (FP7, 2011-2015)
- 
  - TFRN: Task Force on Reactive Nitrogen (convention de Genève)
- 
  - Cost 729 : assessing and managing N fluxes in the atmosphere-biosphere system in Europe
- 
  - Cost 869: Mitigation options for nutrient reduction in surface water and groundwaters
- 
  - INI: International Nitrogen Initiative
- 
  - Macronutrient Cycles Programme C-N-P (2012-2015)
- USGCRP: US Global Change Research Programme



Séminaire RMT Fertilisation et Environnement  
Paris - 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA