

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

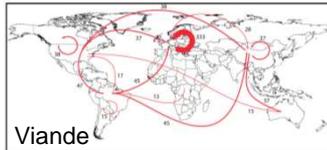
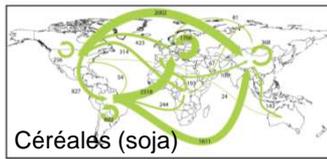
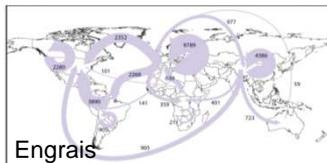
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

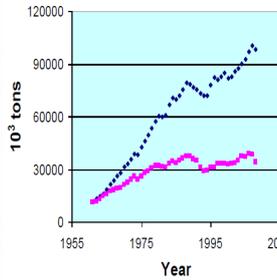


Contexte global

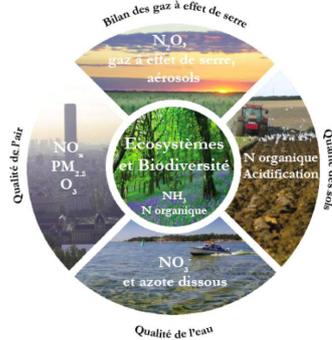
Augmentation de la consommation alimentaire
Mondialisation des échanges
et des cycles biogéochimiques



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

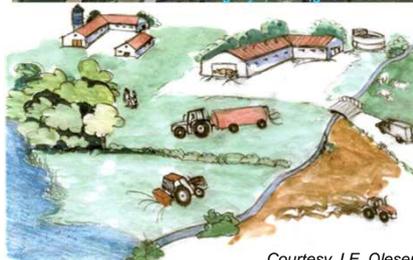
à différentes échelles : agriculteurs, décideurs...

Avec de nouveaux enjeux :

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



ORE AgrHys, Bretagne - GeoPortail



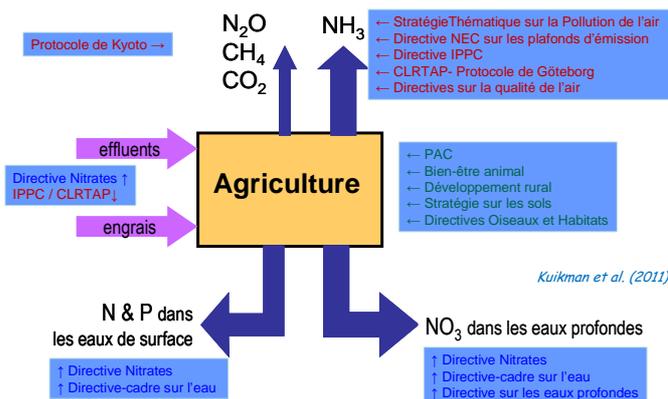
Courtesy J.E. Olesen

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

ALIMENTATION
 AGRICULTURE
 ENVIRONNEMENT

INRA

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



Mais...

des approches par **éléments** (C, N, P), par **espèces** (NO₃⁻, NH₃, NO, N₂O...)
 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

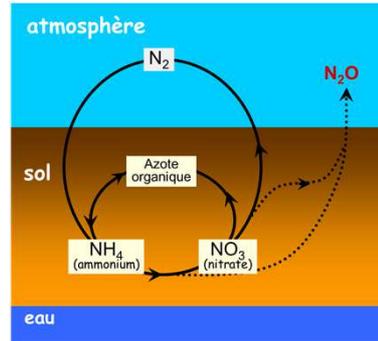
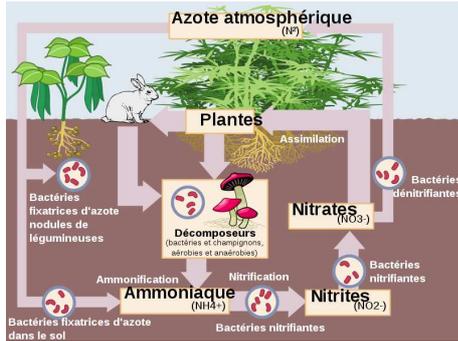
ALIMENTATION
 AGRICULTURE
 ENVIRONNEMENT

INRA

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)

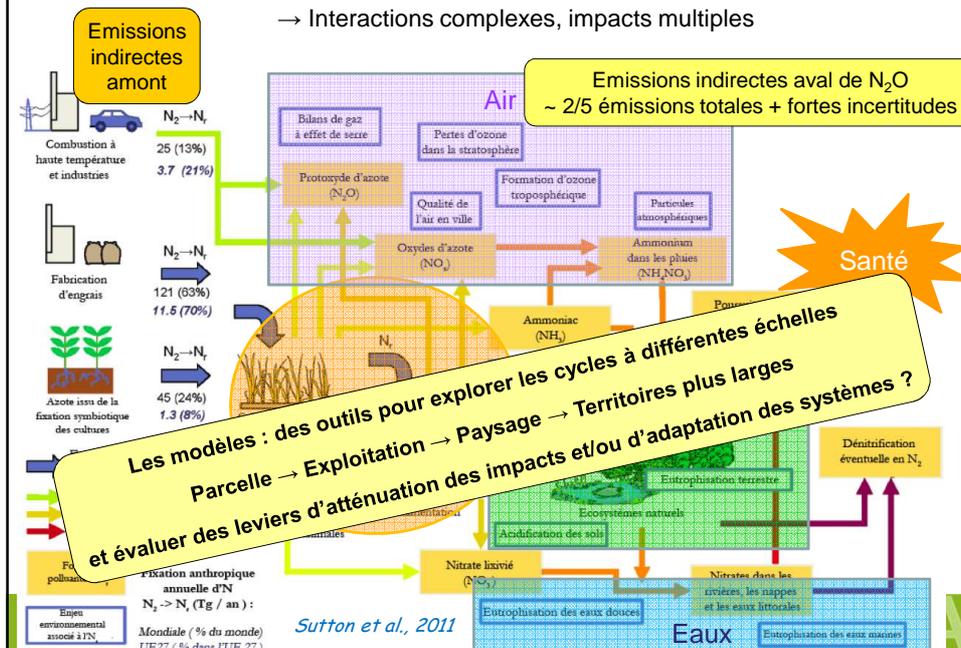
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement
 Paris – 20-21 novembre 2012

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

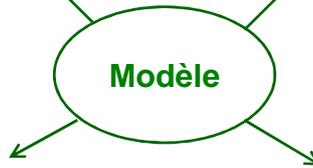
et/ou des paramètres
difficilement mesurables
"Expérimentation virtuelle"

Prédire des phénomènes

Contrôler/maîtriser

Piloter/gérer

Outils d'aide à la décision



Transmettre les connaissances

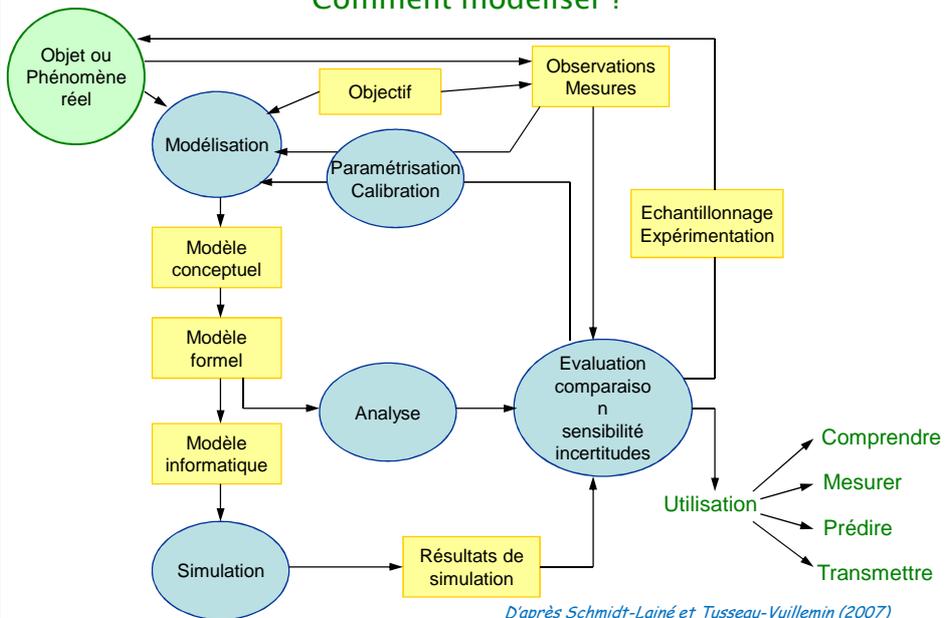
Exprimer, organiser, simplifier

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

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

INRA

Comment modéliser ?



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

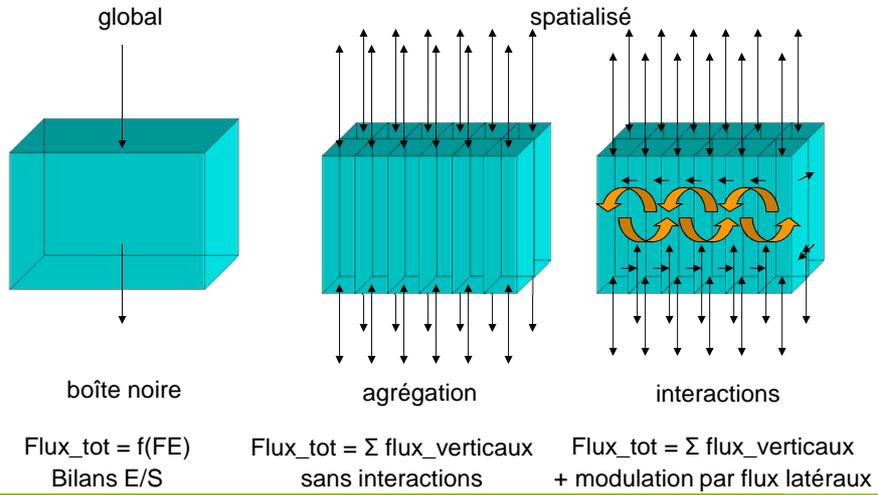
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement
Paris – 20-21 novembre 2012

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 ?



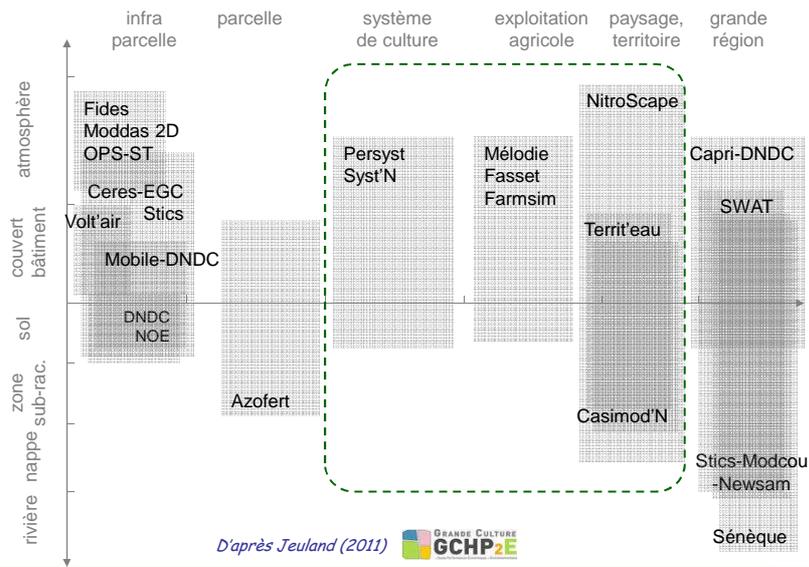
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement
Paris – 20-21 novembre 2012

12

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

INRA

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



D'après Jeuland (2011)

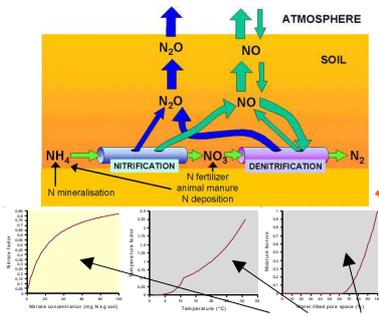
GRANDE CULTURE
GCHP2E

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

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

INRA

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

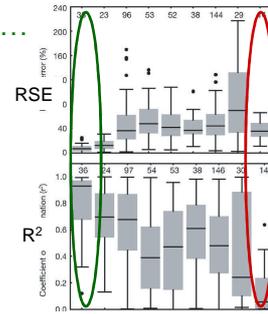


Denitrif. rate = f(PDR, NO₃, T, WFPS)
D'après Hénault et al. (2005)

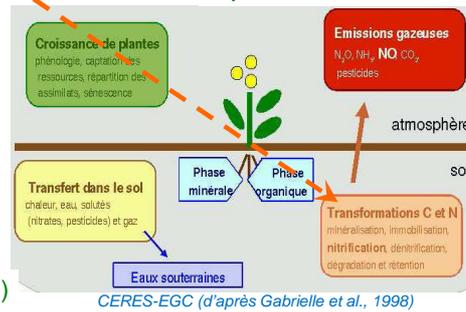
... à des intégrations à la parcelle...

- 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

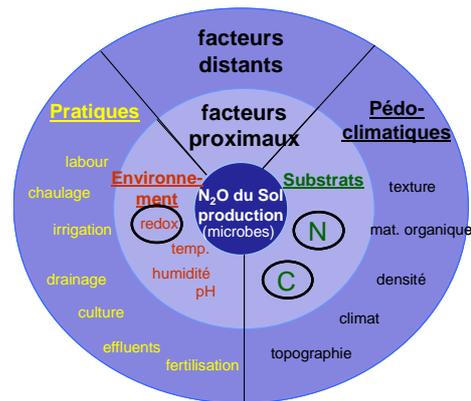
INRA

Nombreux leviers aux échelles locale et parcellaire

- 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 N₂O 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 ?

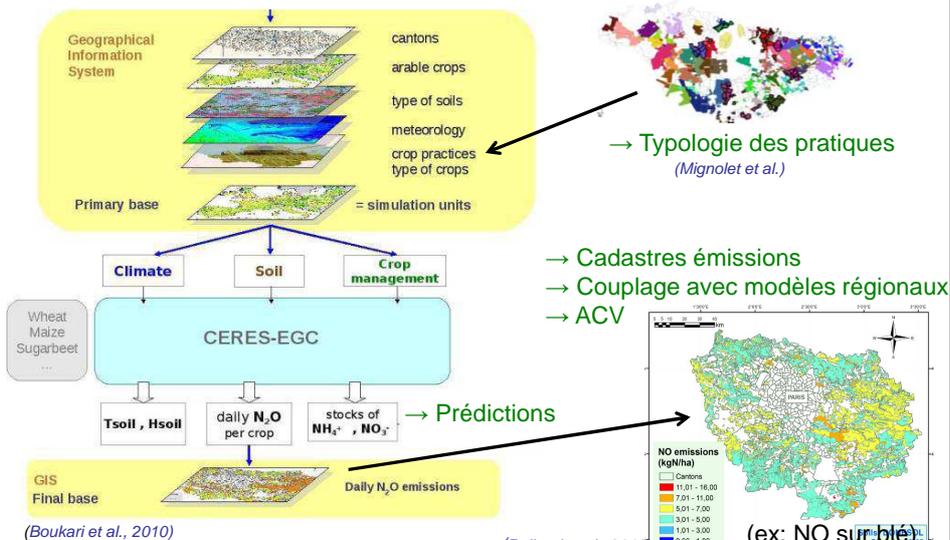
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT



Modélisation des flux à l'échelle territoriale par agrégation

→ Spatialisation des modèles parcellaires



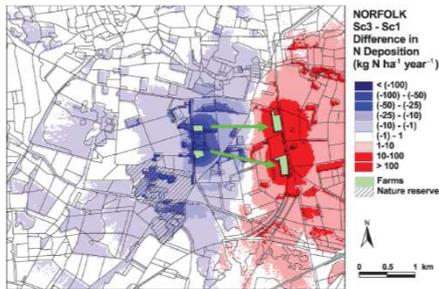
Séminaire RMT Fertilisation et Environnement
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

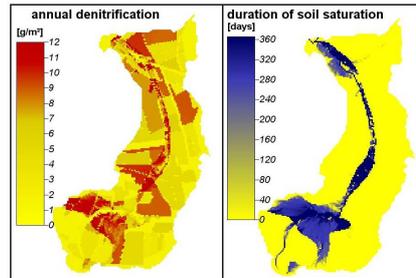


Modélisation des flux à l'échelle territoriale en tenant compte des interactions spatiales

- 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 NH₃ sur les dépôts sur une zone naturelle (Dragosits et al., 2005)



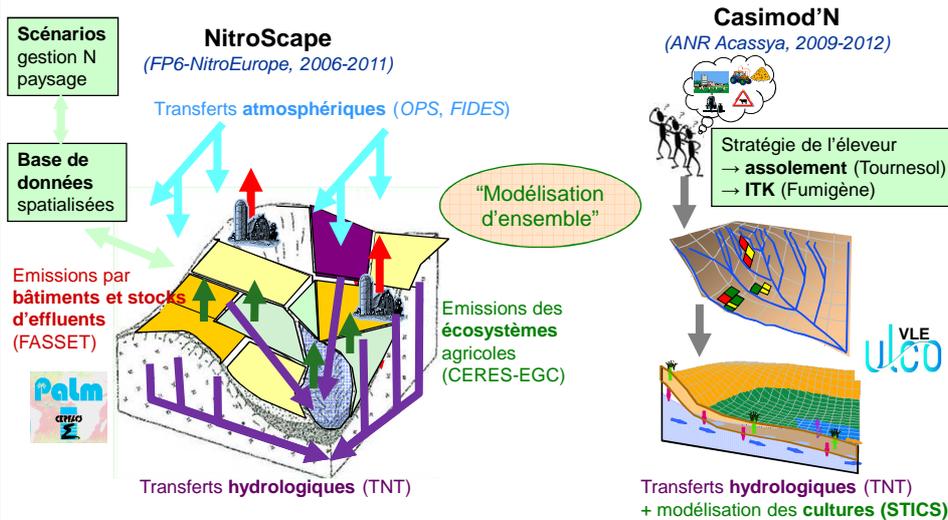
Effet de la remontée de nappe sur la distribution spatio-temporelle de la dénitrification (Oehler et al., 2009)

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

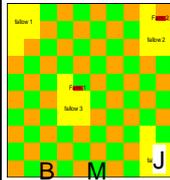


Séminaire RMT Fertilisation et Environnement
Paris – 20-21 novembre 2012

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

INRA

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

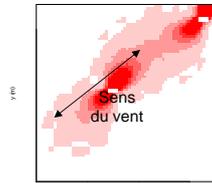


Cas d'étude :
70x70 mailles de 25x25 m²
400 truiés et 8000 porcelets
Maïs (M) et Blé (B)
Fertilis. M&B 240 kg N/ha
4 zones non cultivées (J)

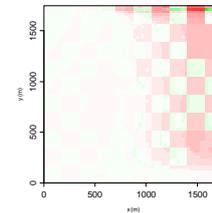
D'après Duret et al. (2011)

→ Et ensuite :

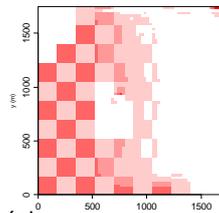
- Quantification paysages réels
- Evaluation scénarios



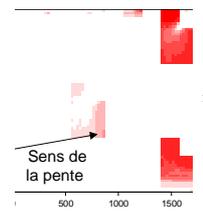
Dépôt sec de $\text{NH}_3\text{-N}$
(kg $\text{NH}_3\text{-N}$ / ha / an)



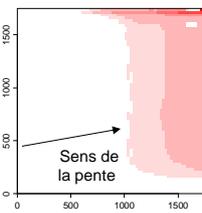
Emissions indirectes de N_2O
(kg $\text{N}_2\text{O-N}$ / ha / an)



Pertes de NO_3^-
(kg $\text{NO}_3\text{-N}$ / ha / an)



Recapture de NO_3^-
(kg $\text{NO}_3\text{-N}$ / 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 ?

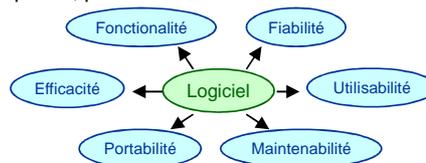
→ Modalités de couplage entre modèles élémentaires ?

- 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 km²)

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 (NH₃, N₂O, NO₃, NH₄...)

→ 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 km²)
- 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