



**HAL**  
open science

# Apports de la modélisation structure-fonction des transferts d'azote à différentes échelles pour raisonner la gestion de l'azote et de l'espace dans les agro-écosystèmes.

Jean-Louis Drouet

## ► To cite this version:

Jean-Louis Drouet. Apports de la modélisation structure-fonction des transferts d'azote à différentes échelles pour raisonner la gestion de l'azote et de l'espace dans les agro-écosystèmes.. Sciences du Vivant [q-bio]. Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 2015. tel-02800774

**HAL Id: tel-02800774**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02800774v1>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

# Apports de la modélisation structure-fonction des transferts d'azote à différentes échelles pour raisonner la gestion de l'azote et de l'espace dans les agro-écosystèmes

**Jean-Louis Drouet**

Chargé de Recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique

Soutenance orale le 14 avril 2015

Devant le jury composé de :

François Gastal	Directeur de Recherche, INRA, UR3F, Lusignan	Rapporteur
Christophe Godin	Directeur de Recherche, INRIA, Montpellier	Rapporteur
Marc Voltz	Directeur de Recherche, INRA, LISAH, Montpellier	Rapporteur
Pierre Cellier	Directeur de Recherche, INRA, ECOSYS, Grignon	Examineur
Nicolas Viovy	Ingénieur-Chercheur, CEA, LSCE, Saclay	Examineur
Jean-Marie Mouchel	Professeur des Universités, UPMC, METIS, Paris	Président



# Résumé

Confrontée aux besoins alimentaires d'une population croissante, l'agriculture mondiale doit faire face à de multiples enjeux (économiques, agro-écologiques, environnementaux, sociaux et sociétaux). Selon les estimations, il faudrait, pour répondre à ces besoins, que l'agriculture mondiale parvienne d'ici à 2050 à augmenter sa production de 70%, tout en continuant à fournir des services essentiels tels que la préservation de la qualité de l'air, des sols et des eaux, l'entretien du paysage ou le maintien de la qualité de vie en milieu rural. L'agriculture contribue à hauteur de 10 % aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique et est la première source d'intrants émis dans l'environnement. Une meilleure gestion des ressources, des intrants et des territoires, notamment les paysages, nécessite de mieux comprendre et évaluer les flux de matières, notamment l'azote, dans les territoires.

L'hypothèse générale sous-jacente aux travaux présentés dans ce mémoire est que l'atténuation des pertes environnementales et la durabilité de l'agriculture et des agro-écosystèmes (économique, agro-écologique, environnementale, sociale, sociétale) nécessite de repenser leur structure, et ainsi leurs fonctionnalités, dans un contexte de changements globaux. Cette hypothèse générale a été testée dans plusieurs cas particuliers, mettant en œuvre différents contextes géographiques (donc politiques et socio-économiques), scientifiques et thématiques (donc disciplinaires et d'équipes) et à plusieurs échelles spatio-temporelles (de l'organe ou agrégat de sol jusqu'à la région en passant par la plante, le peuplement ou la parcelle, l'exploitation agricole, le paysage). Les recherches ont ainsi porté sur des systèmes complexes pour lesquels la modélisation est un outil d'investigation incontournable en complément des données issues d'expérimentations au champ ou en conditions contrôlées, d'inventaires ou d'enquêtes auprès des agriculteurs.

Mes premières expériences en Aquitaine puis en Afrique sahélienne m'ont fait découvrir comment la recherche pouvait contribuer à une meilleure gestion des ressources (sylviculture, agriculture, agro-pastoralisme...) à des échelles régionales, en utilisant diverses méthodes de représentation des structures (télédétection et données satellitaires, systèmes d'information géographique) et d'analyse (modélisation, analyses statistiques de données) des fonctions de production de ces territoires. Les résultats de recherche obtenus ensuite dans plusieurs équipes de l'INRA et en collaboration inter-disciplinaire ont montré, à partir de modèles et de scénarios à différentes échelles, le rôle des interactions spatiales entre les structures des systèmes étudiés (plantes et peuplements décrits spatialement en trois dimensions dans une première phase, exploitations agricoles et paysages décrits spatialement dans une deuxième phase) et leurs fonctions (acquisition et répartition des assimilats azotés et carbonés dans la première phase, production de biomasse, pertes environnementales et émissions indirectes d'azote dans la deuxième phase). Ces travaux ont montré l'intérêt de tenir compte de ces interactions pour améliorer la gestion des plantes et des peuplements d'une part et des paysages et des territoires d'autre part, en relation avec la gestion des intrants et les forçages pédo-climatiques.

Mes perspectives sont de continuer à contribuer aux recherches visant à mieux évaluer les impacts environnementaux des activités agricoles, notamment par la compréhension et la quantification des flux et bilans d'azote ainsi que des relations structures-fonctions dans les agro-écosystèmes à différentes échelles. Ces travaux seront principalement menés, au moins dans un premier temps, sur les flux d'azote, en lien avec les flux de carbone et d'eau. Ils pourront ensuite être étendus à d'autres intrants (e.g. pesticides, produits résiduels organiques) ou d'autres éléments majeurs (e.g. phosphore). Ces recherches devraient aboutir à la production d'outils et de références (modèles, bases de données, scénarios agro-environnementaux) pour tester, de manière quantitative (i.e. à partir d'approches mécanistes, basées sur les processus, et intégrées), différentes évolutions des agro-écosystèmes. Ces modèles seront des outils pour aider à proposer des pistes et des recommandations pour atténuer les pertes environnementales d'azote et/ou adapter les systèmes de production et l'organisation des territoires aux changements globaux. Ces recherches ont aussi une finalité appliquée, dans le sens où les outils développés pourront aussi devenir à terme des outils opérationnels de raisonnement de la gestion de l'azote et de l'espace dans les agro-écosystèmes.

# Abstract

Facing the food needs of a growing population, global agriculture faces multiple challenges (economic, agro-ecological, environmental, social and societal). According to estimates, it would be necessary for meeting these needs that global agriculture increases its production by 70% by 2050, while continuing to provide essential services such as the preservation of air, soil and water quality, landscape maintenance or life quality in rural areas. Agriculture contributes to 10% of the greenhouse gas emissions from human activities and represents the main source of emissions into the environment from agricultural inputs. Better management of resources, inputs and territories, including landscapes, requires a better understanding and assessment of flows especially nitrogen in territories.

The general hypothesis underlying the work presented in this report is that mitigation of environmental losses and sustainability of agriculture and agro-ecosystems (economic, agro-ecological, environmental, social, societal) requires rethinking their structure and thus their functionalities in the context of global change. This general hypothesis was tested in several cases corresponding to different geographical (thus political and socio-economic), scientific and thematic (thus disciplines and teams) contexts and to multiple spatial and temporal scales (from the organ or soil aggregate up to the region through the plant, the stand or the plot, the farm and the landscape scales). My researches therefore focused on complex systems for which modelling is an essential tool in addition to data collected from field experiments or under controlled conditions, farm surveys or landscape inventories.

My first experiences in Aquitaine and in Sahelian Africa helped me discover how research can contribute to better management of resources (forestry, agriculture, agro-pastoralism...) at regional scales, using various methods of representation of the structures (remote sensing and satellite data, geographic information systems) and analysis (modelling, statistical analysis of data) of the production functions within territories. The results obtained in my subsequent researches in several INRA teams and in interdisciplinary collaboration showed, using models and scenarios at different scales, the role of spatial interactions between the structures of the studied systems (plants and stands explicitly described in 3D in a first phase, landscapes spatially described in a second phase) and their functions (acquisition and distribution of nitrogen and carbon assimilates in the first phase, biomass production, environmental losses and indirect emissions of nitrogen in the second phase). These studies showed the importance of taking account such interactions to improve the plant and stand management on one hand and the landscape and territory management on the other hand, in relation to the management of agricultural inputs and soil and climate forcings.

My perspectives are to continue to contribute to researches aiming at better assessing the environmental impacts of agricultural activities, including the understanding and quantification of nitrogen flows and balances and structure-function relationships in agro-ecosystems at different scales. This work will be carried out at least initially on nitrogen flows in relation to carbon and water flows. They may be extended to other inputs (eg pesticides, organic waste products) or other major elements (eg phosphorus). My researches should lead to the production of tools and references (models, databases, agro-environmental scenarios) to test quantitatively (ie from mechanistic, process-based and integrated approaches), various changes in agro-ecosystems. The produced models will be tools to contribute towards proposing insights and recommendations to mitigate environmental losses of nitrogen and/or adapt production systems and territories to global change. My researches have also an applied objective, in the sense that the tools developed may become operational tools for managing nitrogen and space in agro-ecosystems.

# Remerciements

La présentation de mes travaux et réflexions dans ce mémoire est l'aboutissement d'une vingtaine d'années de recherches dans des contextes variés et très enrichissants. Que ce soit dans différentes équipes ou en partenariat inter-disciplinaire et inter-institutionnel, ce mémoire est le fruit de rencontres et de collaborations avec des personnes de cultures et d'horizons divers et que je tiens à remercier ici.

Je remercie tout d'abord les membres du jury qui ont tout de suite accepté d'évaluer mes recherches :

- François Gastal, Christophe Godin et Marc Voltz en tant que rapporteurs,
- Nicolas Viovy et Pierre Cellier en tant qu'examineurs,
- Jean-Marie Mouchel qui a accepté de présider le jury.

Je remercie tout particulièrement celles et ceux qui ont contribué à la construction de ma démarche scientifique durant ces vingt dernières années et qui ont été déterminants dans mon parcours :

- Jacques Riom qui m'accueilli en stages de deuxième année puis de fin d'études dans l'Unité de Bioclimatologie à Bordeaux et qui m'a fait entrer à l'INRA par la porte de la télédétection appliquée à des problématiques sylvicoles et agricoles,
- Raymond Bonhomme, ainsi que Bruno Moulia, dans l'Unité de Bioclimatologie à Grignon qui ont encadré mon évolution en thèse et m'ont apporté leurs connaissances sur le fonctionnement des plantes en relation avec leur environnement physique,
- Loïc Pagès de l'Unité Plantes et Systèmes Horticoles à Avignon qui m'a transmis son expérience en modélisation intégrée et en formalisation de questions scientifiques en écophysiologie,
- Bertrand Ney qui m'accueilli dans l'équipe Plante de l'Unité Environnement et Grandes Cultures à Grignon (EGC) et dont j'ai apprécié la démarche intellectuelle de conceptualisation des phénomènes en écophysiologie,
- Pierre Cellier qui, en tant que directeur de l'Unité Environnement et Grandes Cultures après avoir animé l'équipe Biosphère-Atmosphère pendant plusieurs années, a très bien reçu à ma demande d'évolution thématique et m'a permis d'entrer dans le domaine des transferts biophysiques de l'azote dans les agro-écosystèmes, plus particulièrement dans les paysages, et aussi d'entrer dans la communauté nationale et européenne traitant de questions environnementales relatives aux pollutions azotées d'origine agricole et aux bilans de gaz à effet de serre.

Je remercie aussi les « précurseurs » de mon parcours scientifique, en particulier :

- Albert Philippon, professeur de physique-chimie durant mes trois années de lycée et qui avait à cœur de développer l'esprit critique de ses élèves,
- Jean Duchesne, Hervé Nicolas et François Monbureau, enseignants en bioclimatologie, hydrologie et télédétection à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes et qui m'ont fourni les premières clés pour appliquer les connaissances en physique aux recherches en biophysique et en bioclimatologie, ainsi qu'aux questions agricoles et de gestion territoriale.

Je remercie vivement les scientifiques, ingénieurs et techniciens des unités auxquelles j'ai été successivement rattaché à Grignon :

- l'Unité de Bioclimatologie de 1994-1999 puis l'équipe Plante de l'Unité EGC de 2000 à 2005, notamment Raymond Bonhomme, Bruno Moulia puis Bertrand Ney que j'ai déjà cités, un remerciement particulier à Jean-Michel Allirand, mon « voisin de cellule » pour nos nombreuses échanges professionnels, personnels et amicaux, et aussi aux autres personnes

de l'équipe pour les discussions de travail et autres : Florence Lafouge, Michaël Chelle, Bruno Andrieu, Michel Chartier, Alain Fortineau, Pierre Bonchrétien, Michel Lauransot, Julie Rodrigues, Olivier Bethenod, Hervé Autret, Paul Boissard, Pierre Valéry, Pierre Belluomo, Alexandra Jullien, Céline Richard-Molard, Chritian Fournier, Camille Chambon,

- l'équipe Biosphère-Atmosphère de l'Unité EGC de 2005 à 2014, en particulier Pierre Cellier, Benoît Gabrielle, Sophie Générmont, Olivier Maury avec qui j'avais déjà travaillé dans l'équipe Plante, Benjamin Loubet, Carole Bedos, Erwan Personne, Patricia Laville, Laurent Huber qui m'a accueilli dans l'équipe lors de mon évolution thématique, Sylvie Masson, Céline Decuq, Andrée Tuzet, Réa Massad, Brigitte Durand, Jean-Christophe Guedet, Vanessa Lecuyer, Nathalie Gagnaire, Dominique Flura,
- un remerciement aux directeurs de ces Unités successives, autres ceux que j'ai déjà cités : Nader Katerji pour nos discussions et ses encouragements incitatifs à la présentation de ce mémoire, Ghislain Gosse et plus récemment Enrique Barriuso pour son soutien et son rôle toujours pro-actif.

J'adresse aussi des remerciements aux autres personnes qui ont fait ou font vivre le bâtiment de Bioclimatologie, notamment Marina Pavlidès et Claudine Lauransot à la bibliothèque, Christine Collin à l'accueil, Daniel Poudroux et Arnaud Goulut pour toutes les questions informatiques, Simone Poncelet, Françoise Flament, Catherine Richard, Christine Le Pennec, Marie-Claire Le Cochenec, Annie Meurisse, Vanessa Delver et Charlotte Gandon-Sachs aux secrétariats successifs, André Allix, Yves Tymen, Michel Burban et Pascal Duprix pour les questions logistiques.

Mes recherches, et en particulier celles de ces dix dernières, ont aussi bénéficié des contributions des personnes que j'ai encadrées, notamment :

- les doctorants Gustavo A. Maddonni, Sylvia Duretz, Karine Dufossé et Niramson Azouz,
- les post-doctorants et ingénieurs Alexandre Savin, Cyril Benhamou, Marco Carozzi,
- les stagiaires de masters Nicolas Capian, Charlène Fusic, Yannick De Cacqueray-Valmenier, Christophe Blanchon et Coralie Picoche.

Je remercie aussi vivement les partenaires des projets nationaux, que ce soit dans la construction ou la mise en oeuvre des projets et sans qui mes recherches « intégrées » et inter-disciplinaires n'auraient pas été ou ne seraient pas possibles, notamment Patrick Durand, ainsi que Christophe Flechard, Françoise Vertès, Nourraya Akkal et Jordy Salmon-Monviola (SAS Rennes), Hervé Sinoquet et Gabriela Sonohat (PIAF Clermont-Ferrand), Jean-François Soussana, Raphaël Martin, Gianni Bellocchi et Romain Lardy (UREP Clermont-Ferrand), Jean-Louis Fiorelli, Catherine Mignolet et El-Ghali Lazrak (ASTER Mirecourt), Josette Garnier et Gilles Billen (METIS Paris), Matthias Beekmann (LISA Créteil), Hervé Monod, Pierre Barbillon et Marie-Luce Taupin (MalAGE Jouy et MIA Paris), Gaëlle Tallec (IRSTEA Antony), Catherine Hénault (SOLS Orléans), Thierry Morel et Andrea Piacentini (CERFACS Toulouse), François Laurent (ARVALIS-Institut du Végétal), Anne Probst et Sabine Sauvage (ECOLAB Toulouse), Stéphanie Potok (INRA-Transfert), Philippe Faverdin (PEGASE Rennes), Vincent Blanfort (CIRAD Montpellier), Mathieu Capitaine (ENITA Clermont-Ferrand), Jean-Christophe Fabre (LISAH Montpellier), Sylvain Pellerin (ISPA Bordeaux), Bertrand Hirel (NAP Versailles).

Je remercie les partenaires sans qui l'aventure européenne n'aurait pas été possible, en particulier Mark A. Sutton et Ulli Dragosits (CEH Edimbourg, Ecosse), Nick J. Hutchings, Tommy Dalgaard et Joergen E. Olesen (Université d'Aarhus, Danemark), Mark R. Theobald (Université de Madrid, Espagne), Albert Bleeker et Arnoud Frumau (ECN Petten, Pays-Bas), Jerzy Bienkowski (RECAFE Turew, Pologne), Vincenzo Magliulo (Université de Naples, Italie), sans oublier les partenaires outre-Atlantique avec qui j'ai collaboré il y a une dizaine-quinzaine d'années : Maria Elena Otegui et Gustavo A. Maddonni (Université de Buenos-Aires, Argentine), ainsi que James R. Kiniry (USDA Texas, USA).

Mes remerciements vont aussi aux collègues des autres unités d'accueil qui m'ont permis de travailler dans des contextes scientifiques et humains parfois très différents, et donc très enrichissants, de ceux que j'ai connus à Grignon :

- dans l'Unité Plantes et Systèmes Horticoles à Avignon en 1999 et 2000 : outre Loïc Pagès, Valérie Serra pour toutes les expérimentations en rhizotrons,
- dans l'Unité de Bioclimatologie à Bordeaux en 1991 et 1992 : outre Jacques Riom, Dominique Guyon pour ses conseils, Gaston Courrier pour les escapades en forêt landaise, Jean-Pierre Lagouarde sans qui je n'aurai probablement pas vécu l'expérience sahélienne,
- à Agrhymet et à l'ORSTOM de Niamey au Niger de 1992 à 1994 : Laurent Cunin, Jean-Claude Bergès, Thierry Roy et Yves Arnaud.

Je ne peux pas oublier le rôle déterminant du département Environnement et Agronomie de l'INRA à des périodes clés de mon parcours, notamment la réactivité et la bienveillance de Bernard Itier et Gilles Lemaire, puis de Laurent Bruckler et May Balabane. Je remercie aussi Dominique Lancelin au service des ressources humaines à Versailles, ainsi que Anne Caillères-Divoux pour la réflexion menée autour de la trajectoire scientifique et l'élaboration de projet professionnel, indissociablement d'un projet personnel.

Enfin, je tiens bien sûr à remercier ma famille : Sophie, Lucille, Amandine et Rémi pour leur soutien de tous les jours, ainsi que mes parents Maryline et Louis qui m'ont permis de passer mes premières années dans une exploitation agricole et viticole au cœur des paysages de Saintonge et d'en suivre encore les évolutions aujourd'hui, fournissant ainsi un cadre plus large à mes recherches et un lien direct avec le monde agricole.



# Table des matières

Chapitre I – Le candidat.....	11
I.1 Curriculum Vitae détaillé .....	13
I.2 Liste de publications .....	16
I.3 Encadrement .....	28
I.3.1 Thèses.....	28
I.3.2 CDD Ingénieurs/Post-doctorants.....	28
I.3.3 Stages Masters .....	28
I.3.4 Autres stages .....	29
I.4 Enseignement .....	30
I.5 Tâches administratives, participation, responsabilités dans des projets.....	30
I.5.1 Dans l’UMR EGC .....	30
I.5.2 Dans le département Environnement et Agronomie de l’INRA .....	30
I.5.3 Au niveau régional.....	30
I.5.4 A l’INRA et au niveau national.....	31
I.5.5 Au niveau européen et international .....	32
Chapitre II – Synthèse des travaux.....	35
II.1 Introduction : Parcours, mobilités géographiques et thématiques .....	37
II.2 Des outils pour une meilleure gestion du milieu naturel.....	41
II.2.1 Potentialités du rayonnement moyen infrarouge pour la détection des éclaircies en forêt landaise .....	41
II.2.2 Estimation des pluies en zone sahélienne.....	42
<i>Suivi opérationnel.....</i>	<i>42</i>
<i>Recherche d’indicateurs pertinents .....</i>	<i>43</i>
II.2.3 Que m’ont apporté ces activités de recherche et de suivi opérationnel ? .....	44
II.3 Approche architecturale du fonctionnement des plantes et des peuplements .....	45
II.3.1 Contexte .....	45
II.3.2 Compétitions entre plantes, occupation de l’espace, répartition de la lumière et de l’azote intra- et inter-plantes, photosynthèse et production de biomasse du peuplement.....	45
II.3.2.1 Approche expérimentale de la dynamique de mise en place de la structure aérienne	46
<i>Suivi de la mise en place de la structure aérienne.....</i>	<i>46</i>
<i>Suivi de la mise en place du potentiel photosynthétique au sein de la structure aérienne.....</i>	<i>47</i>
II.3.2.2 Modélisation architecturale de la production de biomasse du peuplement.....	48
<i>Comment représenter les plantes en 3D ?.....</i>	<i>48</i>
<i>Quels modèles adopter en fonction des objectifs ?.....</i>	<i>48</i>
II.3.2.3 Principaux résultats .....	50
<i>Répartition 3D des structures aériennes – Effet sur la captation d’énergie lumineuse du peuplement.....</i>	<i>50</i>
<i>Répartition 3D de l’azote foliaire - Effet sur la production potentielle du peuplement .....</i>	<i>52</i>
<i>Relations entre azote et éclaircissement à l’échelle de l’organe « feuille ».....</i>	<i>52</i>
<i>Rôle de la teneur en azote par unité de masse et de la masse surfacique des feuilles .....</i>	<i>53</i>
II.3.2.4 Autres applications, collaborations, transferts de connaissances .....	53
II.3.3 Interactions entre croissance et répartition des assimilats carbonés et azotés dans la plante entière.....	54
II.3.3.1 Choix de modélisation .....	54
II.3.3.2 Principaux résultats .....	56
II.3.3.3 Apports de l’expérimentation .....	57
II.3.3.4 Autres applications, collaborations, transferts de connaissances .....	59
II.3.4 Que m’ont apporté ces activités de recherche ? .....	59

II.4	Cascade de l'azote aux échelles supra-parcellaires : exploitations agricoles, paysages et territoires plus vastes .....	61
II.4.1	Contexte politique, socio-économique et agro-environnemental.....	61
II.4.1.1	De nouveaux enjeux pour la gestion de l'azote aux échelles supra-parcellaires.....	61
II.4.1.2	Nécessité d'approches plus intégrées pour estimer les pertes d'azote dans l'environnement .....	63
II.4.2	Objectifs, démarche, réseaux scientifiques et principaux résultats.....	64
II.4.2.1	Mise en place d'un réseau de collaborations nationales et européennes .....	65
II.4.2.2	Modélisation intégrée des transferts d'azote à différentes échelles supra-parcellaires .....	67
	<i>A l'échelle de paysages ou petits territoires (de quelques km<sup>2</sup> à quelques dizaines de km<sup>2</sup>)....</i>	<i>67</i>
	<i>A l'échelle de l'exploitation agricole.....</i>	<i>71</i>
	<i>A l'échelle de grands territoires sans prise en compte des interactions spatiales .....</i>	<i>73</i>
	<i>A l'échelle de grands territoires avec prise en compte des interactions spatiales .....</i>	<i>75</i>
II.4.2.3	Expérimentations, données spatialisées et base de données « paysage ».....	76
II.5	Perspectives sur la cascade de l'azote aux échelles supra-parcellaires.....	81
II.5.1	Co-construction et évaluation de scénarios de gestion de l'azote dans les territoires ....	83
II.5.2	Modélisation de la cascade de l'azote et quantification des pertes d'azote dans les paysages ou petits territoires .....	84
II.5.3	Modélisation de la cascade de l'azote et quantification des flux et pertes d'azote dans des territoires plus vastes .....	85
II.6	Contribution à l'animation de l'équipe Biosphère-Atmosphère et de l'UMR EGC.....	87
II.6.1	Animation de l'axe scientifique « Intégration des flux de polluants et de gaz à effet de serre aux échelles supra-parcellaires » dans l'équipe Biosphère-Atmosphère.....	87
II.6.2	Contribution aux recherches intégrées de l'UMR ECOSYS.....	90
II.7	Conclusions et perspectives générales.....	93
	Références citées .....	97
	Sélection de 5 publications .....	103

## **Chapitre I – Le candidat**



## I.1 Curriculum Vitae détaillé

**Jean-Louis DROUET**

Né le 2 décembre 1968

Union libre, 3 enfants

INRA UMR EGC Environnement et Grandes Cultures

→ UMR ECOSYS Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes (au 01/01/2015)

Tel : 01 30 81 55 68 ; Fax : 01 30 81 55 63 ; Courriel : drouet@grignon.inra.fr

### INGENIEUR AGRONOME & DOCTEUR EN BIOCLIMATOLOGIE

#### EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

---

- Depuis 2004** CHARGE DE RECHERCHE 1ERE CLASSE, INRA Environnement et Grandes Cultures (EGC → ECOSYS), Grignon – Cascade de l'azote aux échelles supra-parcellaires (essentiellement paysage et exploitation agricole)
- 2000-2004** CHARGE DE RECHERCHE 2EME CLASSE, INRA EGC, Grignon – Fonctionnement architecturé et flux d'azote dans les plantes et les peuplements végétaux
- 1999-2000** POST-DOCTORANT CONTRACTUEL, INRA Écophysiologie et Horticulture (ECHO), Avignon – Fonctionnement architecturé du maïs
- 1994-1999** ATTACHE SCIENTIFIQUE CONTRACTUEL, INRA Bioclimatologie, Grignon – Architecture, environnement lumineux, azote et photosynthèse chez le maïs
- 1992-1994** COOPERANT DU SERVICE NATIONAL, Centre Régional Agrhymet, Niamey, Niger – Contribution à l'amélioration du dispositif d'alerte agrométéorologique au Sahel
- 1991-1992** STAGIAIRE INGENIEUR AGRONOME, INRA Bioclimatologie-Téledétection, Bordeaux – Détection des éclaircies en forêt landaise à partir d'images satellitaires

#### FORMATION INITIALE

---

- 1994-1998** DOCTORAT de l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon
- 1989-1992** DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes – Spécialité : Sciences du Sol et du Bioclimat
- 1986-1989** Classes Préparatoires Biologie-Mathématiques, Baccalauréat C

#### LANGUES

---

**Anglais** Courant

**Espagnol** Notions

**Allemand** Notions

**Informatique** *Systèmes d'exploitation* : Dos/Windows, Unix, Mac OSX

*Programmation* : C, C++, Fortran, Java

*Traitement des données* : R, SAS, ARCGIS

*Bureautique* : Word, Excel, PowerPoint, Access, LaTeX

## FORMATIONS COMPLEMENTAIRES

---

2014 École des Doctorants et des ENcadrants – Accompagner et réussir une thèse à l'INRA (32 h)  
2013 « Gestion des conflits » (7 h)  
2013 « Diriger, animer et motiver une équipe » (21 h)  
2013 « Pilotage et animation de projet » (28 h)  
2011 « Système d'Information Géographique – ARCGIS » (21 h)  
2010 École Chercheurs « Analyse de sensibilité et exploration de modèles » (31 h)  
2009 « Bases de données – Initiation au langage SQL » (14 h)  
2008 « Coupleur de modèles PALM MP » (21 h)  
2007 « Langage Java, les fondamentaux » (28 h)  
2006 « L'Europe et le 7<sup>ème</sup> PCRD » (7 h)  
2005 « Système d'Information Géographique – ARCGIS » (14 h)  
2005 « Panorama sur les bases de données » (7 h)  
2005 École Chercheurs « Interdisciplinarité Sciences biotechniques et sciences sociales » (24 h)  
2005 « Gestion de projet » (28 h)  
2003 « Bilan de compétences – Élaboration de projet professionnel » (24 h)  
2003 « Europe – Actions Marie Curie » (7 h)  
2003 École Chercheurs « Intégrations de processus à l'échelle de la plante entière. Interactions entre les gestions de l'azote, du carbone et de l'eau : bilan et perspectives » (28 h)  
2002 « Animation de réunion » (28 h)  
2001 École Thématique « Écophysologie de l'Arbre » (28 h)  
2001 « Maîtrise du langage C++ » (35 h)  
2000 « Jurys de concours » (14 h)  
2000 « Modélisation des plantes à partir des L-systèmes » (24 h)  
1998 « Savoir illustrer ses exposés » (21 h)  
1996 École Jeunes Chercheurs en Bioclimatologie « Du couvert végétal à la région » (35 h)  
1995 École Jeunes Chercheurs en Bioclimatologie « De la plante au couvert végétal » (56 h)  
1995 « Utilisation du logiciel S-Plus » (21 h)  
1995 École Jeunes Chercheurs en Agronomie « Modélisation » (21 h)  
1995 « Statistiques – Modèle linéaire, analyse de variance et régression » (35 h)  
Depuis 1995 « Anglais », cours collectifs et individuels, travail sur articles, autoformation (environ 200 heures en tout)

## PUBLICATIONS

---

27 publications (dont 13 en premier auteur) dans des revues à comités de lectures, 7 chapitres d'ouvrages, 87 communications à des congrès, rapports d'étudiant(e)s (4 doctorants, 6 stagiaires de master, 10 autres stagiaires, 6 ingénieurs / post-doctorants), divers rapports de projets et documents d'animation

Une extraction des articles dans « Web of Science » donne les indications suivantes :

h-index = 10

nombre total de citations = 374

nombre d'articles citant ces travaux = 308

nombre d'articles citant ces travaux sans auto-citations = 294

nombre moyen de citations par article = 18.8

nombre moyen de citations par année = 21.3

## ENCADREMENT SUR LA DERNIERE THEMATIQUE « CASCADE DE L'AZOTE AUX ECHELLES SUPRA-PARCELLAIRES »

---

3 doctorant(e)s (dont 2 qui ont soutenu leur thèse et ont trouvé un emploi), 6 stagiaires de master, 6 ingénieur(e)s / post-doctorant(e)s

## RELECTURES D'ARTICLES

---

Pour Functional Plant Biology, Ecological Modelling, Ecological Letters, Annals of Botany, Canadian Journal of Botany, Tree Physiology, Scientia Horticulturae, Journal of Zhejiang University sur la thématique « Fonctionnement architecturé des plantes et des peuplements »

Pour Environmental Pollution, Biogeosciences, Agricultural Systems, Environmental Modelling and Software, Computers and Electronics in Agriculture sur la thématique « Cascade de l'azote aux échelles supra-parcellaires »

## CONGRÈS INTERNATIONAUX

---

- 2014 Open Science Conference "Integrating impacts of air pollution and climate change on ecosystems" and Annual ECLAIRE meeting, Budapest, Hongrie (4 jours)
- 2014 18<sup>th</sup> Nitrogen Workshop "The nitrogen challenge: building a blueprint for nitrogen use efficiency and food security", Lisbon, Portugal (4 jours)
- 2013 Annual ECLAIRE Meeting, Zagreb, Croatie (3 jours)
- 2012 COST-ECLAIRE Workshop "From process scale to global scale: integrating our knowledge on biosphere atmosphere exchange modelling of trace gases and volatile aerosols", Paris (3 j)
- 2011 International Science Conference "Nitrogen and global change. Key findings, future challenges", Edimbourg, Royaume-Uni (4 jours)
- 2011 ANIMALCHANGE Kick-Off Meeting, Opio, France (3 jours)
- 2010 Open Science Conference "Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance" and Annual NitroEurope Meeting, Solothurn, Suisse (4 jours)
- 2009 16<sup>th</sup> Nitrogen Workshop "Connecting different scales of nitrogen use in agriculture", Turin, Italie (4 jours)
- 2009 Annual NitroEurope Meeting, Göteborg, Suède (4 jours)
- 2008 Open Science Conference "Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance" and Annual NitroEurope Meeting, Gand, Belgique (4 jours)
- 2007 Annual NitroEurope Meeting, Paestum, Italie (5 jours)
- 2007 International Conference "Biosphère continentale – Cycle de l'eau et végétation : analyse et prospective", Paris, France (4 jours)
- 2006 NitroEurope-IP Kick-Off Meeting, Garmisch-Partenkirchen, Allemagne (4 jours)
- 2006 International Workshop "Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production", Wageningen, Pays-Bas (4 jours)
- 2005 14<sup>th</sup> International Nitrogen Workshop "Nitrogen management in agrosystems in relation to the Water Framework Directive", Maastricht, Pays-Bas (3 jours)
- 2004 GEIA/ACCENT Workshop "Global Emissions Inventory Activity / Atmospheric Composition Change: a European network", Paris, France (1 jour)
- 2004 4<sup>th</sup> International Workshop "Functional-Structural Plant Models", Montpellier, France (4 jours)
- 2003 Workshop "Analysing and modelling genotype x environment interactions", Grignon (1 jour)
- 2002 Workshop "Virtual plants", Grignon, France (2 jours)
- 2001 2<sup>nd</sup> ESA Symposium "Modelling Cropping Systems", Florence, Italie (4 jours)
- 1998 2<sup>nd</sup> International Workshop "Functional-Structural Tree Models", Clermont-Ferrand, France (4 jours)
- 1998 4<sup>th</sup> New Phytologist Symposium "At the crossroads of Plant Physiology and Ecology: Causes and Consequences of Variation in Leaf Structure", Montpellier, France (2 jours)
- 1998 Annual Meeting of the Society for Experimental Biology "Stabilising Processes in Mixed Plant Communities", York, Royaume-Uni (3 jours)
- 1997 Workshop "Plant Pathology and Architectural Modelling", Grignon, France (1 jour)
- 1996 Conference of the Association of Applied Biologists "Modelling in Applied Biology: Spatial Aspects", Brunel, Royaume-Uni (3 jours)
- 1993 Atelier International Agrhymet/Cilss-Acmad "Estimation des pluies par satellite en zone sahélienne", Niamey, Niger (3 jours)

## I.2 Liste de publications

Les noms des étudiant(e)s que j'ai encadré(e)s en thèse sont soulignés.

Les publications jointes à la fin du mémoire sont indiquées par un astérisque \*

### I.2.1 Articles dans des revues à comité de lecture

- [A1] Picoche C., Dufossé K., **Drouet J.-L.**, Bessou C. Gabrielle B. Assessing the environmental impacts of Miscanthus with an agroecosystem model. *Soumis à Global Change Biology Bioenergy*.
- [A2] Dufossé K., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, 2014. Agro-ecosystem modeling can aid in the optimization of biomass feedstock supply. *Soumis à Field Crops Research*.
- [A3] Dufossé K., Querleu C., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, 2014. What is the most sustainable biomass supply mix for bioethanol production? Example of the Burgundy region in France. *International Journal of Life Cycle Assessment*, sous presse.
- [A4] Dufossé K., Drewer J., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, 2014. Effects of the removal of a 20-year old Miscanthus x Giganteus stand on soil characteristics and greenhouse gas emissions. *Biomass and Bioenergy*, sous presse.
- [A5] Fiorelli J.-L., **Drouet J.-L.**, Duret S., Gabrielle B., Graux A.I., Blanfort V., Capitaine M., Cellier P., Soussana J.-F., 2014. Evaluation of greenhouse gas emissions and design of mitigation options: a whole farm approach based on farm management data and mechanistic models. *International Journal of Sustainable Development*, 17 (1), 22-34.
- \* [A6] Dufossé K., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, Bessou C., 2013. Using agroecosystem modelling to improve the estimates of N<sub>2</sub>O emissions in the life-cycle assessment of biofuels. *Waste and Biomass Valorization*, 4, 593-606.
- [A7] Dalgaard T., Bienkowski J., Bleeker A., **Drouet J.-L.**, Durand P., Dragosits U., Frumau A., Hutchings N.J., Kedziora A., Magliulo E., Olesen J.E., Theobald M.R., Akkal N., Cellier P., 2012. Farm nitrogen balances in six European landscapes with intensive agriculture - a method for farming systems assessment, emission hotspots identification, and mitigation measure evaluation. *Biogeosciences*, 9, 5303-5321.
- [A8] Hutchings N.J., Reinds G.J., Leip A., Wattenbach M., Bienkowski J.F., Dalgaard T., Dragosits U., **Drouet J.-L.**, Durand P., Maury O., de Vries, W., 2012. A model for simulating the timelines of field operations at a European scale for use in complex dynamic models. *Biogeosciences*, 9, 4487-4496.
- [A9] **Drouet J.-L.**, Duret S., Durand P., Cellier P., 2012. Modelling the contribution of short-range atmospheric and hydrological transfers to nitrogen fluxes, budgets and indirect emissions in rural landscapes. *Biogeosciences*, 9, 1647-1660.
- \* [A10] **Drouet J.-L.**, Capian N., Fiorelli J.-L., Blanfort V., Capitaine M., Duret S., Gabrielle B., Martin R., Lardy R., Cellier P., Soussana J.-F., 2011. Sensitivity analysis for models of greenhouse gas emissions at farm level. Case study of N<sub>2</sub>O emissions simulated by the CERES-EGC model. *Environmental Pollution*, 159, 3156-3161.
- \* [A11] Duret S., **Drouet J.-L.**, Durand P., Hutchings N.J., Theobald M.R., Salmon-Monviola J., Dragosits U., Maury O., Sutton M.A., Cellier P., 2011. NitroScape: a model to integrate nitrogen transfers and transformations in rural landscapes. *Environmental Pollution*, 159, 3162-3170.
- [A12] Dalgaard T., Hutchings N., Dragosits U., Olesen J.E., Kjeldsen C., **Drouet J.-L.**, Cellier P., 2011. Effects of farm heterogeneity on modelling and upscaling of nitrogen losses and greenhouse gas emissions in agricultural landscapes. *Environmental Pollution*, 159, 3183-3192.
- [A13] **Drouet J.-L.**, Kiniry J.R., 2008. Does spatial arrangement of 3D plants affect light transmission and extinction coefficient within maize crops. *Field Crops Research*, 107 (1), 62-69.

- \* [A14] **Drouet J.-L.**, Pagès L., 2007. GRAAL-CN: a model of GRowth, Architecture and ALlocation for Carbon and Nitrogen dynamics within whole plants formalised at the organ level. *Ecological Modelling*, 206, 231-249.
- [A15] Hirel B., Andrieu B., Valadier M.H., Renard S., Quilleré I., Chelle M., Pommel B., Fournier C., **Drouet J.-L.**, 2005. Physiology of maize II: Identification of physiological markers representative of the nitrogen status of maize (*Zea mays*) leaves during grain filling. *Physiologia Plantarum*, 124 (2), 178-188.
- [A16] **Drouet J.-L.**, Pagès L., Serra V., 2005. Dynamics of leaf mass per unit area and root mass per unit volume of young maize plants: output variables in growth models. *European Journal of Agronomy*, 22 (2), 185-193.
- [A17] **Drouet J.-L.**, Bonhomme R., 2004. Effect of 3D nitrogen, dry mass per area and local irradiance on canopy photosynthesis within leaves of contrasted heterogeneous maize crops. *Annals of Botany*, 93 (6), 699-710.
- [A18] Pagès L., Vercambre G., **Drouet J.-L.**, Lecompte F., Collet C., Le Bot J., 2004. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture. *Plant and Soil*, 258 (1), 103-119.
- [A19] **Drouet J.-L.**, 2003. MODICA and MODANCA: modelling the three-dimensional structure of gramineous crops from two methods of plant description. *Field Crops Research*, 83 (2), 215-222.
- [A20] **Drouet J.-L.**, Pagès L., 2003. GRAAL: a model of GRowth, Architecture and carbon ALlocation during the vegetative phase of the whole maize plant. Model description and parameterisation. *Ecological Modelling*, 165 (2-3), 147-173.
- [A21] Maddonni G.A., Chelle M., **Drouet J.-L.**, Andrieu B., 2001. Light interception of contrasting leaf azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distribution: simulations and crop measurements. *Field Crops Research*, 70 (1), 1-13.
- \* [A22] **Drouet J.-L.**, Bonhomme R., 1999. Do variations in local leaf irradiance explain changes to leaf nitrogen within row maize canopies? *Annals of Botany*, 84, 61-69.
- [A23] **Drouet J.-L.**, Moulia B., Bonhomme R., 1999. Do changes in the azimuthal distribution of maize leaves over time affect canopy light absorption? *Agronomie*, 19, 281-294.
- [A24] **Drouet J.-L.**, Moulia B., 1997. Spatial re-orientation of maize leaves affected by initial plant orientation and density. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88, 85-100.
- [A25] Roy T., Cunin L., Bergès J.C., **Drouet J.-L.**, Tall F., 1994. Suivi du début de l'hivernage 1993 par l'indice de végétation au Sahel. *Veille Climatique Satellitaire*, 50, 36-47.
- [A26] **Drouet J.-L.**, 1994. Suivi de la fin de l'hivernage 1993 à l'aide des indicateurs occurrences de nuages et minima de températures radiatives et comparaison des méthodes d'estimation Agrhymet, Epsat, Tamsat au cours de la saison 1993. *Veille Climatique Satellitaire*, 49, 32-60.
- [A27] **Drouet J.-L.**, Cunin L., Tall F., Bergès J.C., Roy T., 1993. Suivi du début de l'hivernage 1993 à l'aide des indicateurs occurrences de nuages et minima de températures radiatives. *Veille Climatique Satellitaire*, 47, 35-57.

## I.2.2 Chapitres d'ouvrages

- [B1] Cellier P., Bleeker A., Breuer L., Dalgaard T., Dragosits U., **Drouet J.-L.**, Durand P., Duret S., Hutchings N.J., Kros H., Loubet B., Oenema O., Olesen J., Mérot P., Theobald M.R., Viaud V., de Vries W., Sutton M.A., 2011. Nitrogen flows and fate in rural landscapes. In: Billen G., Bleeker A., Erismann J.W., Grennfelt P., Grizzetti B., Howard C., Sutton M.A., van Grinsven H. (Eds.), "The European Nitrogen Assessment", Chapter 11, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 229-248.
- [B2] **Drouet J.-L.**, Pagès L., 2007. GRAAL: GRowth, Architecture, ALlocation. A functional-structural model integrating processes of growth and processes of assimilate allocation from the organ level to the whole-plant level. In: Vos J., Marcelis L.F.M., de Visser P.H.B., Struick P.C., Evers J.B. (Eds.), "Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production", Chapter 14, Springer, The Netherlands, 165-174.

- [B3] Fournier C., Andrieu B., Buck-Sorlin G., Evers J., **Drouet J.-L.**, Escobar-Gutierrez A., Vos J., 2007. Functional-structural modelling of Gramineae. In: Vos J., Marcelis L.F.M., de Visser P.H.B., Struick P.C., Evers J.B. (Eds.), "Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production", Chapter 15, Springer, The Netherlands, 175-186.
- [B4] **Drouet J.-L.**, Popa G., Nijs I., 2000. Numerical plants for biodiversity research. In: Ceulemans R., Bogaert J., Deckmyn G., Nijs I., "Topics in Plant Ecology: Structure and Function in Plants and Ecosystems", University of Antwerp, Belgium, 155-166.
- [B5] Brisson N., Bonhomme R., Améglio T., Gautier H., Olioso A., **Drouet J.-L.**, 1996. Modèle de culture: Simulation sous contraintes à partir d'un potentiel de production. In: Lagouarde J.P., Cruziat P., « Actes de l'École-Chercheurs en Bioclimatologie, Tome 2: Du couvert végétal à la région », Le Croisic, 25-29/03/1996, INRA Éditions, 39-51.
- [B6] Durand J.-L., Gautier H., Castell J.F., **Drouet J.-L.**, 1995. Eau, carbone, azote et zones en croissance. In: Cruziat P., Lagouarde J.P., « Actes de l'École-Chercheurs en Bioclimatologie, Tome 1: De la plante au couvert végétal », Le Croisic, 03-07/04/1995, INRA Éditions, 197-216.
- [B7] Bonhomme R., **Drouet J.-L.**, Améglio T., 1995. Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert. In: Cruziat P., Lagouarde J.P., « Actes de l'École-Chercheurs en Bioclimatologie, Tome 1: De la plante au couvert végétal », Le Croisic, 03-07/04/1995, INRA Éditions, 647-669.

### I.2.3 Communications à des congrès

- [C1] Ayzac A., Decuq C., Lecuyer V., Hénault C., Cellier P., **Drouet J.-L.**, 2014. Comparaisons inter laboratoires - Mesures de N<sub>2</sub>O atmosphérique par CPG-ECD. 13<sup>èmes</sup> Journées de la Mesure et de la Métrologie, 13-16/10/2014, Lille (Poster).
- [C2] Azouz N., **Drouet J.-L.**, Beekmann M., Maury O., Cellier P., 2014. Evaluation of the sub-grid variability of models simulating atmospheric nitrogen fluxes at regional scale from models integrating processes at landscape scale. Proceedings of the Open Science Conference "Integrating impacts of air pollution and climate change on ecosystems", 01-02/10/2014, Budapest, Hungary (Poster).
- [C3] Blanchon C., Loubet B., Personne E., Massad R.S., Maury O., **Drouet J.-L.**, 2014. Coupled modelling of bidirectional exchanges and atmospheric transfer of nitrogen within rural landscapes. Proceedings of the Open Science Conference "Integrating impacts of air pollution and climate change on ecosystems", 01-02/10/2014, Budapest, Hungary (Poster).
- [C4] Carozzi M., Massad R.S., Martin R., Shtiliyanova A., Klumpp K., **Drouet J.-L.**, 2014. Modelling climate change impact on European crop and livestock systems. Proceedings of the Open Science Conference "Integrating impacts of air pollution and climate change on ecosystems", 01-02/10/2014, Budapest, Hungary (Poster).
- [C5] **Drouet J.-L.**, Duretz S., Maury O., Olesen J.E., Durand P., Salmon-Monviola J., Hutchings N.J., Dalgaard T., Theobald M.R., Dragosits U., Sutton M.A., Cellier P., 2014. Effect of landscape structure and nitrogen management on nitrogen flows and balances at the landscape scale. Proceedings of the Open Science Conference "Integrating impacts of air pollution and climate change on ecosystems", 01-02/10/2014, Budapest, Hungary (Poster).
- [C6] **Drouet J.-L.**, Laurent F., Durand P., Billen G., Cellier P., Maury O., Potok S., Faverdin P., Flécharde C., Garnier J., Guy A., Hénault C., Mignolet C., Monod H., Probst A., Sorin S., Tallec G., Beekmann M., Ceschia E., Le Gall C., Morel T., Quesnel G., Ramat E., Zeller B., 2014. The ESCAPADE project to quantify nitrogen losses at landscape and regional scales and assess mitigation and adaptation strategies. Proceedings of the Open Science Conference "Integrating impacts of air pollution and climate change on ecosystems", 01-02/10/2014, Budapest, Hungary (Poster).
- [C7] Dufossé K., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, Querleu C., 2014. LCA of lignocellulosic feedstock: what is the most sustainable biomass for bioethanol production in Northern French regions considering

local variability? Example of the Burgundy region. 9<sup>th</sup> International Life Cycle Assessment Food Conference, October 2014, San Francisco, USA (Poster).

- [C8] **Drouet J.-L.**, Laurent F., Durand P., Billen G., Cellier P., Maury O., Potok S., Faverdin P., Flécharde C., Garnier J., Guy A., Hénault C., Mignolet C., Monod H., Probst A., Sorin S., Talleg G., Beekmann M., Ceschia E., Le Gall C., Morel T., Quesnel G., Ramat E., Zeller B., 2014. ESCAPADE to quantify nitrogen losses in territories and assess mitigation strategies. The nitrogen challenge: building a blueprint for nitrogen use efficiency and food security. 18<sup>th</sup> Nitrogen Workshop, 30/06-03/07/2014, Lisbon, Portugal (Poster).
- [C9] **Drouet J.-L.**, Laurent F., Durand P., Billen G., Cellier P., Maury O., Potok S., Faverdin P., Flécharde C., Garnier J., Guy A., Hénault C., Mignolet C., Monod H., Probst A., Sorin S., Talleg G., Beekmann M., Ceschia E., Le Gall C., Morel T., Quesnel G., Ramat E., Zeller B., 2014. Le projet ESCAPADE pour une meilleure gestion de l'azote dans les territoires. 11<sup>èmes</sup> Rencontres COMIFER-GEMAS de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, 20-21/11/2013, Futuroscope, France (Communication orale).
- [C10] Dufossé K., Drewer J., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, 2012. Effects of the removal of a 20-year old Miscanthus stand on GHG emissions, soil nitrate and carbon stocks. Proceedings of the 12<sup>th</sup> Congress of the European Society of Agronomy, 20-24/08/2012, Helsinki, Finland, 2 p. (Communication orale).
- [C11] Dalgaard T., Durand P., Dragosits U., Hutchings N.J., Kedziora A., Bienkowski J., Frumau A., Bleeker A., Magliulo E., Olesen J.E., Hansen B., Thorling L., Theobald M.R., **Drouet J.-L.**, Cellier P., 2012. Farm N balances in European landscapes and the effect of measures to reduce N-losses. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Nitrogen Workshop "Innovations for Sustainable use of Nitrogen Resources", 26-29/06/2012, Wexford, Ireland, p. 319-320 (Poster).
- [C12] Dufossé K., Drewer J., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, 2012. Soil carbon and N<sub>2</sub>O emission dynamics after destruction of a 20-year old Miscanthus stand, and comparison with a plot under annual crops. Proceedings of the 20<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, 18-22/06/2012, Milano, Italy, 1 p. (Communication orale).
- [C13] Dufossé K., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, 2011. Environmental assessment of bioethanol production from lignocellulosic crops. Proceedings of the Conference "Environmental and integrated assessment of complex systems - Biosystems, water, land management", 30/11/2011-02/12/2011, Montpellier, France, 1 p. (Communication orale).
- [C14] Dalgaard T., Durand P., Dragosits U., Hutchings N.J., Kedziora A., Bienkowski J., Frumau K.F.A., Bleeker A., Magliulo V., Olesen J.E., Theobald M.R., **Drouet J.-L.**, Cellier P., 2011. Farm nitrogen balances in European landscapes. Proceedings of the Conference "Nitrogen and Global Change. Key findings, future challenges", 11-14/04/2011, Edinburgh, UK, 2 p. (Communication orale).
- [C15] Dragosits U., Dalgaard T., Hutchings N.J., Durand P., Bienkowski J., Magliulo V., Frumau K.F.A., McDonald C., Murray S., Luk J., Olesen J.E., **Drouet J.-L.**, Akkal N., Cellier P., 2011. How (not) to produce detailed farm management inventories for landscape scale nitrogen modelling. Proceedings of the Conference "Nitrogen and Global Change. Key findings, future challenges", 11-14/04/2011, Edinburgh, UK, 2 p. (Communication orale).
- [C16] **Drouet J.-L.**, Akkal N., Bienkowski J., Bleeker A., Braban C.F., Dalgaard T., Dragosits U., Durand P., Duret S., Flecharde C., Frumau K.F.A., Hutchings N.J., Kedziora A., Magliulo V., Maury O., Olesen J.E., Salmon-Monviola J., Schelde K., Sutton M.A., Theobald M.R., Vitale L., Vogt E., Cellier P., 2011. Using the NitroScape model to quantify nitrogen budgets within European landscapes. Proceedings of the Conference "Nitrogen and Global Change. Key findings, future challenges", 11-14/04/2011, Edinburgh, UK, 2 p. (Poster).
- [C17] **Drouet J.-L.**, Maury O., Dalgaard T., Dragosits U., Theobald M.R., Durand P., Sutton M.A., Cellier P., 2011. An integrated database for European agricultural landscapes. Proceedings of the Conference "Nitrogen and Global Change. Key findings, future challenges", 11-14/04/2011, Edinburgh, UK, 2 p. (Poster).

- [C18] Duret S., **Drouet J.-L.**, Durand P., Cellier P., 2011. Influence of short-range processes on landscape nitrogen budget. Proceedings of the Conference “Nitrogen and Global Change. Key findings, future challenges”, 11-14/04/2011, Edinburgh, UK, 2 p. (Communication orale).
- [C19] Hutchings N.J., Wattenbach M., Reinds G.J., Leip A., Bienkowski J., Dalgaard T., Dragosits U., **Drouet J.-L.**, Durand P., Frumau K.F.A., Magliulo V., Maury O., de Vries W., 2011. Simulating crop rotations, fertilization and field operations at a European scale for use in complex dynamic models. Proceedings of the Conference “Nitrogen and Global Change. Key findings, future challenges”, 11-14/04/2011, Edinburgh, UK, 2 p. (Communication orale).
- [C20] Olesen J.E., Duret S., Dalgaard T., **Drouet J.-L.**, Durand P., Theobald M.R., Hutchings N.J., Dragosits U., Cellier P., 2011. Model-based analysis of spatially explicit N management at landscape scale. Proceedings of the Conference “Nitrogen and Global Change. Key findings, future challenges”, 11-14/04/2011, Edinburgh, UK, 2 p. (Communication orale).
- [C21] Theobald M.R., Akkal N., Bienkowski J., Bleeker A., Boegh E., Boissy J., Braban C.F., Dalgaard T., Decuq C., Dragosits U., **Drouet J.-L.**, Durand B., Durand P., Fauvel Y., Flechard C., Frumau K.F.A., Hamon Y., Hensen A., Janku K., Kedziora A., Kulek B., Magliulo V., Magliulo P., Masson S., Maury O., Nowak M., Olesen J.E., Oliva M., Palumbo I., Pugesgaard S., Schelde K., Szczepanski M., Vitale L., Vogt E., Sutton M.A., Cellier P., 2011. Strategies for measuring flows of reactive nitrogen at the landscape scale. Proceedings of the Conference “Nitrogen and Global Change. Key findings, future challenges”, 11-14/04/2011, Edinburgh, UK, 2 p. (Poster).
- [C22] Lardy R., Martin R., **Drouet J.-L.**, Fiorelli J.-L., Blanfort V., Capitaine M., Duret S., Gabrielle B., Cellier P., Soussana J.-F., 2010. PaSim dans FarmSim ou de la modélisation des GES de la parcelle à l’exploitation. 17èmes Journées 3R Rencontres, Recherches, Ruminants, déc. 2010, Paris (Poster).
- [C23] Duret S., **Drouet J.-L.**, Cellier P., Durand P., Hutchings N.J., 2010. Modelling the effect of short-term transfer on a nitrogen landscape budget. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Nitrogen Conference “Reactive Nitrogen: Management for Sustainable Development Science, Technology and Policy”, 03-07/12/2010, New-Delhi, India, p. 319 (Poster).
- [C24] **Drouet J.-L.**, Cellier P., 2010. Transfert vers le développement de l’outil NitroScape pour le raisonnement de la gestion de l’azote à l’échelle du paysage agricole. Séminaire « Cascade de l’azote » du GIS GC-HP2E, 1/06/2010, Paris, France (Communication orale).
- [C25] Duret S., **Drouet J.-L.**, Durand P., Hutchings N.J., Theobald M.R., Dragosits U., Salmon-Monviola J., Maury O., Sutton M.A., Cellier P., 2010. NitroScape : an integrated model of nitrogen fluxes and transformation at the landscape scale. Proceedings of the Open Science Conference “Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance”, 03-04/02/2010, Solothurn, Switzerland, p. 42 (Communication orale).
- [C26] **Drouet J.-L.**, Duret S., Fiorelli J.-L., Blanfort V., Capitaine M., Capián N., Gabrielle B., Martin R., Lardy R., Cellier P., Soussana J.-F., 2010. FARMSIM: an integrated tool to model greenhouse gas emissions at the farm level. Proceedings of the Open Science Conference “Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance”, 03-04/02/2010, Solothurn, Switzerland, p. 41-42 (Communication orale).
- [C27] Dalgaard T., Dragosits U., Hutchings N.J., Olesen J.E., Happe K., **Drouet J.-L.**, Cellier P., 2010. Effects of spatio-temporal heterogeneity on modelling and upscaling agricultural N-losses and greenhouse gas emissions in European landscapes. Proceedings of the Open Science Conference “Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance”, 03-04/02/2010, Solothurn, Switzerland, p. 41 (Communication orale).
- [C28] **Drouet J.-L.**, Maury O., Dalgaard T., Dragosits U., Theobald M.R., Sutton M.A., Cellier P., 2010. An integrated database for European agricultural landscapes. Proceedings of the Open Science Conference “Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance”, 03-04/02/2010, Solothurn, Switzerland, p. 74 (Poster).
- [C29] Durand P., Akkal N., Fléchard C., **Drouet J.-L.**, Hamon Y., Molénat J., Hassouna M., Cellier P., 2010. Nitrogen fluxes and budgets in a NEU C4 site (Kervidy-Naizin, France) with high nitrogen surplus: measurements and modelling. Proceedings of the Open Science Conference “Reactive

Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance”, 03-04/02/2010, Solothurn, Switzerland, p. 75 (Poster).

- [C30] **Drouet J.-L.**, Cellier P., Duret S., Maury, O., Durand P., Flechard C., Salmon-Monviola J., Theobald M.R., Dragosits U., Braban C., Hutchings N.J., Olesen J.E., Dalgaard T., Schelde K., Breuer L., Kraft P., Vaché K.B., Butterbach-Bahl K., Bleeker A., Frumau A., Bienkowski J., Kedziora A., Magliulo E., Magliulo P., Sutton M.A., 2009. Integrating nitrogen interactions at the farm and landscape scales to assess the impact of management scenarios. Proceedings of the 16<sup>th</sup> Nitrogen Workshop, 28/06-01/07/2009, Turin, Italy, p. 521-522 (Poster).
- [C31] Duret S., **Drouet J.-L.**, Durand P., Hutchings N.J., Theobald M.R., Dragosits U., Salmon-Monviola J., Maury O., Sutton M.A., Cellier P., 2009. NitroScape: an integrated model of nitrogen fluxes and transformation at the landscape scale. Proceedings of the 16<sup>th</sup> Nitrogen Workshop, 28/06-01/07/2009, Turin, Italy, p. 379-380 (Communication orale).
- [C32] Duret S., **Drouet J.-L.**, Fiorelli J.-L., Blanfort V., Capitaine M., Gabrielle B., Martin R., Cellier P., Soussana J.-F., 2009. Integrated modelling of greenhouse gas emissions at the farm level. Proceedings of the 16<sup>th</sup> Nitrogen Workshop, 28/06-01/07/2009, Turin, Italy, p. 525-526 (Poster).
- [C33] **Drouet J.-L.**, Blanfort V., Fiorelli J.-L., Capian N., Capitaine M., Duret S., Gabrielle B., Martin R., Cellier P., Soussana J.-F., 2009. Sensitivity analysis of a farm-cropland-grassland model of reactive nitrogen emission and greenhouse gas balance to biophysical parameters and farming practices. Proceedings of the 16<sup>th</sup> Nitrogen Workshop, 28/06-01/07/2009, Turin, Italy, p. 523-524 (Poster).
- [C34] **Drouet J.-L.**, Duret S., Durand P., Cellier P., 2009. Modélisation des transferts d’azote dans les paysages agricoles. Journée « Paysages » de la Fédération Ile de France de Recherche sur l’Environnement FIRE, 23/09/2009, Paris, France (Communication orale).
- [C35] **Drouet J.-L.**, 2009. Flux de N<sub>2</sub>O à l’échelle du paysage. Modélisation des émissions directes et indirectes. Séminaire de lancement de l’UMT-GES-N<sub>2</sub>O, 8/07/2009, Paris, France (Communication orale).
- [C36] **Drouet J.-L.**, Duret S., Cellier P., Vilain G., Garnier J., Billen G., Tallec G., Tournebize J., Flipo N., 2009. Mesure et modélisation des flux de N<sub>2</sub>O à l’échelle des paysages agricoles. Colloque du Programme PIREN-Seine, 6/02/2009, Paris (Communication orale).
- [C37] Duret S., **Drouet J.L.**, Hutchings N., Durand P., Theobald M., Salmon-Monviola J., Dragosits U., Maury O., Cellier P., 2009. NitroScape: an integrated model of nitrogen fluxes and transformations at the landscape scale. NitroEurope-IP 4<sup>th</sup> General Assembly and Annual Meeting, 26-29/01/2009, Gothenburg, Sweden (Communication orale).
- [C38] Cellier P., Fléchard C., Masson S., Fauvel Y., Hamon Y., **Drouet J.L.**, 2008. Réseaux d’observation des composés azotés en zone rurale. Rencontres sur la pollution atmosphérique longue distance, 8-9/12/2008, Nancy (Poster).
- [C39] Fiorelli J.L., **Drouet J.L.**, Duret S., Gabrielle B., Cellier P., Blanfort V., Capitaine M., Soussana J.F., 2008. Evaluating the greenhouse gas emissions and designing mitigation options: a whole farm approach based on farm management practices data coupled with crop and grassland mechanistic models. In: Dedieu B. (Ed), Empowerment of the rural actors: a renewal of farming systems perspectives. Proceedings of the 8th European International Farming Systems Association Symposium (IFSA), 6-10/07/2008, Clermont-Ferrand, p. 693-701 (Communication orale).
- [C40] Fiorelli J.L., **Drouet J.L.**, Duret S., Gabrielle B., Cellier P., Blanfort V., Capitaine M., Boisdon I., Soussana J.F., 2008. A whole farm approach based on farm management practices data coupled with crop and grassland mechanistic models. Colloque international Agriculture Biologique et Changement Climatique (ABCC), 17-18/04/2008, Clermont-Ferrand (Poster).
- [C41] Cellier P., Bienkowski J., Bleeker A., Bøgh E., Breuer L., Daalgard T., Dragosits U., **Drouet J.-L.**, Durand P., Frumau A., Hutchings N., Kraft P., Magliulo E., Magliulo P., Olesen J.E., Kedziora A., Theobald M., Vache K., Sutton M., 2008. Landscape scale assessment of N interactions. Proceedings of the Open Science Conference on Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance, 20-21/02/2008, Ghent, Belgium, p. 70 (Poster).

- [C42] **Drouet J.L.**, Cellier P., Duret S., Durand P., Theobald M.R., Dragosits U., Olesen J.E., Hutchings N.J., Dalgaard T., Breuer L., Kraft P., Vache K., Butterbach-Bahl K., Bleeker A., Frumau A., Sutton M.A., 2008. The conceptual scheme of NitroScape: an integrated tool to simulate reactive nitrogen transfer and greenhouse gas balance at the landscape scale by coupling atmospheric, hydrological, ecosystem and farm models. Proceedings of the Open Science Conference on Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance, 20-21/02/2008, Ghent, Belgium, p.71-72 (Poster).
- [C43] **Drouet J.L.**, Duret S., Fiorelli J.L., Gabrielle B., Blanfort V., Cellier P., Soussana J.F., 2008. A farm level tool coupling farm, cropland and grassland models to assess the effect of farming practices on reactive nitrogen emissions and greenhouse gas balance and to define mitigation strategies. Proceedings of the Open Science Conference on Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance, 20-21/02/2008, Ghent, Belgium, p.72 (Poster).
- [C44] Durand P., Molénat J., Hamon Y., Fauvel Y., Flechard C., **Drouet J.-L.**, Masson S., Cellier P., 2008. NitroEurope Component 4 – The French Site : Kervidy-Naizin experimental catchment, Central Brittany, Western France. Proceedings of the Open Science Conference on Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance, 20-21/02/2008, Ghent, Belgium, p.73-74 (Poster).
- [C45] Theobald M.R., Bøgh E., Breuer L., Cellier P., Durand P., Olesen J.E., Schelde K., Bleeker A., **Drouet J.-L.**, Dragosits U., Frumau A., Kedziora A., Lipski M., Magliulo E., Magliulo P., Vogt E., Sutton M.A., 2008. Measurement strategy for the verification of the NitroScape integrated model. Proceedings of the Open Science Conference on Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance, 20-21/02/2008, Ghent, Belgium, p.79-80 (Poster).
- [C46] Dalgaard T., Dragosits U., Happe K., Hutchings N., Olesen J.E., Cellier P., **Drouet J.-L.**, Bleeker A., Theobald M., 2008. Scaling up from farm to landscape – methods to model farm nitrogen balances in European landscapes. Proceedings of the Open Science Conference on Reactive Nitrogen and the European Greenhouse Gas Balance, 20-21/02/2008, Ghent, Belgium, p. 34 (Communication orale).
- [C47] Dalgaard T., Cellier P., Dragosits U., **Drouet J.L.**, Happe K., Hutchings N., Olesen J.E., Theobald, 2007. Farm nitrogen balances in European landscapes – methods for modeling and scaling. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Land Systems Workshop, 25-26/10/2007, Tune, Denmark (Résumé).
- [C48] Dalgaard T., Cellier P., Dragosits U., **Drouet J.L.**, Happe K., Hutchings N., Olesen J.E., 2007. Farm nitrogen balances in European landscapes – methods for modeling and scaling. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference, 1-5/10/2007, Bahia, Brazil.
- [C49] **Drouet J.-L.**, Pagès L., 2007. GRAAL-CN: a model of GRowth, Architecture and ALlocation for Carbon and Nitrogen dynamics within whole plants formalized at the organ level. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Functional-Structural Plant models, 4-9/11/2007, Napier, New Zealand (Résumé + Poster).
- [C50] Cellier P., Daalgard T., Olesen J., Theobald M., ..., **Drouet J.-L.**, ..., 2007. C4: Landscape scale assessment of nitrogen interactions. NitroEurope-IP 2<sup>nd</sup> General Assembly, 4-9/02/2007. Paestum, Italy.
- [C51] Cellier P., Bleeker A., Bøgh E., Breuer L., Brueggemann N., Daalgard T., Dragosits U., **Drouet J.-L.**, Durand P., Magliulo E., Olesen J., Ryszkowski L., Sutton M., Theobald M. 2006. Landscape scale assessment of nitrogen interactions. Open Science Conference on the GHG Cycle in the Northern Hemisphere, 14-18/11/2006, Sissi-Lassithi, Crete.
- [C52] Cellier P., Bleeker A., Breuer L., Brueggemann N., Daalgard T., Delon C., Dragosits U., **Drouet J.-L.**, Durand P., Huisman S., Magliulo E., Olesen J., Ryszkowski L., Sutton M., Theobald M. 2006. Landscape scale assessment of nitrogen interactions. NitroEurope-IP Kick-Off Meeting, 13-17/03/2006. Garmisch-Partenkirchen, Germany.
- [C53] **Drouet J.-L.**, Pagès L., 2006. GRAAL: GRowth, Architecture, ALlocation. A functional-structural model to analyse the interactions between growth and assimilates allocation integrating processes from organ to whole plant. In: Vos J. and Marcelis L.F.M., “Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production”, Frontis International Workshop, 5-8/03/2006, Wageningen, The Netherlands (Communication orale).

- [C54] Fournier C., Andrieu B., Buck-Sorlin G., Evers J., **Drouet J.-L.**, Escobar-Gutierrez A., Vos J., 2006. Functional-structural modelling of Gramineae. A retrospective look at morphological models. In: Vos J. and Marcelis L.F.M., "Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production", Frontis International Workshop, 5-8/03/2006, Wageningen, The Netherlands.
- [C55] Jullien A., Allirand, J.-M., Savin A., **Drouet J.-L.**, Ney, B., 2004. Interaction génotype × azote chez le colza. Séminaire DGER « Quels modèles pour analyser les interactions génotype × environnement », 20-21/12/2004, Chartres, France.
- [C56] **Drouet J.-L.**, 2004. GRAAL : un modèle pour analyser les interactions génotype × environnement ? Séminaire DGER « Quels modèles pour analyser les interactions génotype × environnement », 20-21/12/2004, Chartres, France (Communication orale).
- [C57] Hirel B., Quilleré I., Pommel B., Floriot M., Andrieu B., **Drouet J.-L.**, Chelle M., Martin A., Valadier M.H., Belastegui-Macadam X., Fortineau A., Chartier M., Fournier C., Gallais A., Prioul J.-L., Lelarge C., Tercé-Laforgue T., 2004. Genetic variability for pre- and post-flowering nitrogen metabolism in maize in relation to plant architecture and leaf senescence. Proceedings of the 12<sup>th</sup> Australian Agronomy Conference, 26/09-01/10/2004, Brisbane, Australia (Poster).
- [C58] Andrieu B., Moulia B., Maddonni G., Birch C., Fournier C., Allirand J.-M., Chartier M., Hillier J., Sohbi Y., **Drouet J.-L.**, Sonohat G., Bonhomme R., 2004. Plasticity of plant architecture in response to density using maize as a model. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Functional-Structural Plant models, 7-11/06/2004, Montpellier, France, p. 141-145 (Résumé).
- [C59] **Drouet J.-L.**, Allirand J.-M., Jullien A., Savin A., Maury O., Fovart E., Rodrigues J., Fortineau A., Chartier M., Lafouge F., Ney B., 2004. Do we need architecture to model genotypic behaviour of oilseed rape in response to nitrogen fertilisation. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Functional-Structural Plant models, 7-11/06/2004, Montpellier, France, p. 350 (Résumé + Poster).
- [C60] **Drouet J.-L.**, Chelle M., Fortineau A., Lafouge F., Chartier M., Andrieu B., Quilleré I., Valadier M.H., Hirel B., 2004 Nitrogen partitioning in maize genotypes during senescence : does local light have a role ? Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Functional-Structural Plant models, 7-11/06/2004, Montpellier, France, p. 181 (Résumé + Communication orale + Poster).
- [C61] **Drouet J.-L.**, Pagès L., Serra V., 2004. Modelling the relationships between growth and assimilates partitioning from the organ to the whole plant. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Functional-Structural Plant models, 7-11/06/2004, Montpellier, France, p. 115-119 (Résumé + Communication orale).
- [C62] Savin A., Allirand J.-M., **Drouet J.-L.**, Jullien A., Gombert J., Rossato L., Le Dily F., Ourry A., Ney B., 2004. Projet PROMOSOL-INRA : comportement variétal du colza en réponse à la fertilisation azotée. Carrefour Colza, 20-21/01/2004, Le Croisic, France.
- [C63] Andrieu B., Pommel B., **Drouet J.-L.**, Floriot M., Chelle M., Combe L., Maury O., Ambronna-Diaz C., Fortineau A., Chartier M., Quilleré I., Valadier M.H., Hirel B., 2003. Analyse architecturée de la sénescence chez le maïs : relations avec l'environnement lumineux des feuilles et l'évolution des pools de carbone et d'azote dans la plante. Séminaire Écogène « Approches du fonctionnement des végétaux en relation avec leur environnement combinant écophysiologie, génétique et génomique », 27-28/11/2003, Versailles, France (Résumé).
- [C64] Hirel B., Quilleré I., Martien A., Valadier M.H., Belastegui-Macadam X., Tercé-Laforgue T., Pommel B., Floriot M., Chelle M., **Drouet J.-L.**, Fortineau A., Chartier M., Fournier C., Andrieu B., Gallais A., Prioul J.L., Lelarge C., 2003. Etude de la variabilité de la gestion de l'azote pré et post-floraison chez des lignées et des hybrides de maïs. Séminaire Écogène « Approches du fonctionnement des végétaux en relation avec leur environnement combinant écophysiologie, génétique et génomique », 27-28/11/2003, Versailles, France (Résumé).
- [C65] **Drouet J.-L.**, Chelle M., Fortineau A., Lafouge F., Chartier M., Andrieu B., Quilleré I., Valadier M.H., Hirel B., 2003. Nitrogen partitioning in three genotypes of maize during senescence: role of local irradiance? Séminaire Écogène « Approches du fonctionnement des végétaux en relation avec leur environnement combinant écophysiologie, génétique et génomique », 27-28/11/2003, Versailles, France (Poster).

- [C66] Andrieu B., Chelle M., **Drouet J.-L.**, Fournier C., Hillier J., Huber L., Ljutovac S., Pommel B., Saint-Jean S., Sonohat G., Sohbi Y., 2003. Modelling plants: virtual plants as a tool to understand real ones. In: Prioul J.L., Vidal J., Brulfert J., Miginiac-Maslow M. (eds.), "Plant Biology and the Challenge of Functional Genomics", 5<sup>ème</sup> Colloque Général de la Société Française de Physiologie Végétale, 9-11/07/2003, Orsay, France (Résumé + Poster).
- [C67] **Drouet J.-L.**, Allirand J.-M., Richard-Molard C., Lafouge F., Jullien A., Ney B., 2003. Analyse des interactions entre métabolismes azotés et carbonés pour évaluer le comportement variétal du colza en réponse à la fertilisation azotée. École-Chercheurs « Intégration de processus à l'échelle de la plante entière. Interactions entre les gestions de l'azote, du carbone et de l'eau: bilan et perspectives », 12-16/05/2003, Saint-Flour, France (Résumé + Poster + Communication orale).
- [C68] Andrieu B., Chelle M., **Drouet J.-L.**, Fournier C., Hillier J., Huber L., Ljutovac S., Pommel B., Popa G., Saint-Jean S., Sohbi Y., 2003. L'approche « plante virtuelle » pour l'analyse des interactions entre les plantes et leur environnement. École-Chercheurs « Intégration de processus à l'échelle de la plante entière. Interactions entre les gestions de l'azote, du carbone et de l'eau: bilan et perspectives », 12-16/05/2003, Saint-Flour, France (Résumé + Poster).
- [C69] Andrieu B., Chelle M., **Drouet J.-L.**, Fournier C., Hillier J., Huber L., Ljutovac S., Pommel B., Popa G., Saint-Jean S., Sohbi Y., 2003. L'approche « plante virtuelle » pour l'analyse des interactions entre les plantes et leur environnement. 2<sup>ème</sup> Rencontres de l'INA, 3-4/04/2003, Paris (Résumé + Poster).
- [C70] **Drouet J.-L.**, Allirand J.-M., Rossato L., Ney B., Ourry A., 2003. Projet PROMOSOL-INRA : comportement variétal du colza en réponse à la fertilisation azotée. Carrefour Colza, 21-22/01/2003, Le Croisic, France (Communication orale).
- [C71] **Drouet J.-L.**, 2002. Object-oriented modelling of the relationships between growth and assimilate partitioning from the organ to the whole plant. Workshop "Virtual plants", 25-26/11/2002, Grignon, France (Communication orale).
- [C72] **Drouet J.-L.**, 2002. Describing and reconstructing 3D plant structures using a 3D digitising device. Workshop "Virtual plants", 25-26/11/2002, Grignon, France (Communication orale).
- [C73] **Drouet J.-L.**, Pagès L., 2001. Modélisation objet des liens entre croissance et distribution des assimilats de l'organe à la plante entière. 3<sup>ème</sup> colloque « Rhizosphère », Dijon, 26-28/11/2001 (Résumé + Communication orale + Poster).
- [C74] **Drouet J.-L.**, Pagès L., 2001. Object-oriented modeling of the relationships between growth and assimilates partitioning from the organ to the whole plant. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ESA Symposium "Modelling Cropping Systems", 16-18/07/2001, Florence, Italy, p. 19-20 (Résumé + Poster).
- [C75] **Drouet J.-L.**, Pagès L., 2001. Modélisation objet des liens entre croissance et distribution des assimilats de l'organe à la plante entière. In: « Premières Rencontres d'Écophysiologie de l'Arbre », Autrans, 16-19/01/2001, p. 98. (Résumé + Communication orale + Poster).
- [C76] Maddonni G.A., Chelle M., **Drouet J.-L.**, Andrieu B., 2000. Maize leaf azimuth, planting pattern and light interception. 3<sup>rd</sup> International Crop Science Congress, 17-22/08/2000, Hamburg, Germany (Résumé)
- [C77] **Drouet J.-L.**, 1999. Régulation par l'environnement local de la mise en place des surfaces foliaires et de leur capacité photosynthétique chez le maïs. In: « Journées de l'Écologie Fonctionnelle », La Grande Motte, 15-17/03/1999 (Communication orale).
- [C78] Chelle M., **Drouet J.-L.**, 1999. Méthode de description de l'architecture 3D des plantes pour estimer la répartition de la lumière entre organes. In: « Journées de l'Écologie Fonctionnelle », La Grande Motte, 15-17/03/1999 (Poster).
- [C79] Chelle M., **Drouet J.-L.**, 1998. Using a measured three-dimensional canopy architecture to estimate the repartition of light between plant organs. In: "Stabilising Processes in Mixed Plant Communities", York, 23-26/03/1998, Society of Experimental Biology, The University of York, UK, Journal of Experimental Botany, Special Issue, 49, p. 42 (Résumé + Poster).

- [C80] **Drouet J.-L.**, Moulia B., 1997. Kinematical study of spatial re-orientation in maize leaves. In: Jeronimidis G., Vincent J.F.V. (eds), "Plant Biomechanics 1997: Conference Proceedings II", 08-12/09/1997, Publication Centre for Biomimetics, The University of Reading, UK, p. 77-78 (Résumé + Poster).
- [C81] Sinoquet H., Rivet P., **Drouet J.-L.**, 1997. Méthodes de digitalisation et de visualisation 3D de l'architecture des plantes. In: Actes du Séminaire « Modélisation architecturale », Paris, 10-12/03/1997, INRA, Département de Bioclimatologie, p. 31-37 (Résumé).
- [C82] **Drouet J.-L.**, Moulia B., 1997. Ré-orientations spatiales des feuilles de maïs au cours de la croissance végétative en fonction de l'orientation initiale et de la densité de plantes. In: Actes du Séminaire « Modélisation architecturale », Paris, 10-12/03/1997, INRA, Département de Bioclimatologie, p. 153-158 (Résumé + Communication orale).
- [C83] **Drouet J.-L.**, Moulia B., 1996. Spatial re-orientation between successive leaves in maize. In: White E.M., Benjamin L.R., Brain P., Hamer P.J.C., Mugglestone M.A., Russell G., Topp C.F.E. (eds), "Modelling in Applied Biology: Spatial Aspects", Brunel, 25-27/06/1996, The University of Brunel, UK, p. 135-138 (Résumé + Communication orale + Poster).
- [C84] Guyon D., Riom J., Jolly A., **Drouet J.-L.**, 1996. Évaluation du moyen infrarouge pour la mise en évidence des coupes et éclaircies en forêt landaise (préparation à l'utilisation des données SPOT 4 - MIR). In: Conférence Internationale « SPOT, d'une décennie de réalisations à une décennie de promesses », Paris, 15-18/04-1996, 3 p. (Résumé).
- [C85] **Drouet J.-L.**, Cunin L., 1993. Comparaison des trois méthodes d'estimation des pluies Agrhymet, Epsat, Tamsat au cours de la saison 1993. In: Actes de l'Atelier International « Estimation des pluies par satellite », Niamey, 02-04/12/1993, Agrhymet/CILSS, p. 147-161 (Résumé + Communication orale).
- [C86] **Drouet J.-L.**, 1993. Suivi de l'hivernage 1993 à l'aide des indicateurs occurrences de nuages à sommet froid et minima de températures radiatives. In: Actes de l'Atelier International « Estimation des pluies par satellite », Niamey, 02-04/12/1993, Agrhymet/CILSS, p. 101-117 (Résumé + Communication orale).
- [C87] **Drouet J.-L.**, 1993. La collecte des données pluviométriques pendant la campagne pluviale 1993 et leur fiabilité. In: Actes de l'Atelier International « Estimation des pluies par satellite », Niamey, 02-04/12/1993, Agrhymet/CILSS, p. 32-46 (Résumé + Communication orale).

#### **I.2.4 Rapports diplômants**

- [D1] **Drouet J.-L.**, 1998. Variations de la disposition spatiale et de la teneur en azote des feuilles d'un peuplement de maïs en phase végétative. Étude par simulation de l'influence de ces variations sur la photosynthèse potentielle du couvert. Thèse de Doctorat, INA Paris-Grignon, INRA Unité de Bioclimatologie Grignon, 159 p. + annexes.
- [D2] **Drouet J.-L.**, 1992. Étude des possibilités de détection des éclaircies en forêt landaise par le moyen infrarouge. Mémoire de DAA, ENSA Rennes, INRA Station de Bioclimatologie-Téledétection, Villenave d'Ornon, 72 p. + annexes.

#### **I.2.5 Produits, documents et publications destinés à des utilisateurs de la recherche (professionnels, partenaires institutionnels...)**

- [E1] **Drouet J.-L.**, Laurent F., Durand P., Billen G., Cellier P., Maury O., Potok S., Faverdin P., Flécharde C., Garnier J., Guy A., Hénault C., Mignolet C., Monod H., Probst A., Sorin S., Tallec G., Beekmann M., Ceschia E., Le Gall C., Morel T., Quesnel G., Ramat E., Zeller B., 2014. Actes des 11èmes Rencontres COMIFER-GEMAS de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, 20-21/11/2013, Futuroscope, France, 8p.
- [E2] **Drouet J.-L.**, Cellier P., 2013. NitroScape : modéliser la cascade de l'azote à l'échelle du paysage agricole. Dossier « Modélisation » de l'Internet INRA, 2 p.

- [E3] **Drouet J.-L.**, 2012. La modélisation des cycles biogéochimiques à l'échelle territoriale : état de l'art, limites et perspectives. Séminaire du RMT Fertilisation et Environnement « Gestion territoriale des éléments minéraux utilisés en agriculture », Paris, 20-21/11/2012.
- [E4] **Drouet J.-L.** et al., 2012. NitroScape : modéliser la cascade de l'azote à l'échelle du paysage agricole. Fait Marquant du Centre INRA Versailles-Grignon, 2 p.
- [E5] **Drouet J.-L.** et al., 2012. NitroScape : proposer des stratégies d'atténuation des émissions d'azote. Fait marquant INRA, Rapport annuel INRA 2011, p. 38.
- [E6] Cellier P., **Drouet J.-L.**, Duret S., Durand P., 2012. Modélisation des transferts et transformations de l'azote à l'échelle du paysage agricole. Rapport 2011 du Programme PIREN-Seine, 11 p.
- [E7] Cellier P., Loubet B., Duret S., **Drouet J.-L.**, 2011. Les transferts atmosphériques dans la cascade de l'azote à l'échelle du paysage et de la région. Rapport 2010 du Programme PIREN-Seine.
- [E8] Cellier P., ..., **Drouet J.-L.**, ..., 2011. NitroEurope-IP, Final report of the C4 Component "Landscape analysis".
- [E9] Cellier P., ..., **Drouet J.-L.**, ..., 2010. NitroEurope-IP, 4<sup>th</sup> annual report of the C4 Component "Landscape analysis".
- [E10] **Drouet J.-L.**, 2009. Transfert vers le développement de l'outil NitroScape pour le raisonnement de la gestion de l'azote à l'échelle du paysage agricole. Réponse à l'Appel à Manifestation d'Intérêt du GIS GC-HP2E (Projet retenu par le GIS GC-HP2E).
- [E11] **Drouet J.-L.**, Duret S., Durand P., Cellier P., 2009. Mesure et modélisation des flux de N<sub>2</sub>O à l'échelle des paysages agricoles. Rapport 2008 du Programme PIREN-Seine, 12 p.
- [E12] Cellier, P., ..., **Drouet J.-L.**, ..., 2009. NitroEurope-IP, 3<sup>rd</sup> annual report of the C4 Component "Landscape analysis".
- [E13] Duret S., **Drouet J.-L.**, Durand P., Hutchings N.J., Theobald M.R., Salmon-Monviola J., Dragosits U., Maury O., Cellier P., 2008. NitroScape specifications. Cahier des charges du modèle NitroScape. Rapport interne au projet NitroEurope-IP, 33 p.
- [E14] Maury O., **Drouet J.-L.**, 2008. Functionalities of the C4 ("Landscape analysis") Data Centre and C4 data management. Description de la base de données "Paysage" du projet NitroEurope-IP, 12 p.
- [E15] Owen S., Steenberg-Larssen K., Kiese R., Homburg F., **Drouet J.L.**, Leip A., Reinds G.J., Bleeker A. Frumau A., Bealey B., Reis, S., 2008. NitroEurope-IP, 2<sup>nd</sup> annual report of the Data Management Committee (C7 Component).
- [E16] Cellier, P., ..., **Drouet J.-L.**, ..., 2008. NitroEurope-IP, 2<sup>nd</sup> annual report of the C4 Component "Landscape analysis".
- [E17] De Rudder A., Bealey B., Campbell C., Steenberg-Larssen K., Kiese R., Homburg F., **Drouet J.L.**, Leip A., Reinds G.J., Bleeker A. Reis, S., 2007. NitroEurope-IP, 1<sup>st</sup> annual report of the Data Management Committee (C7 Component).
- [E18] Cellier, P., ..., **Drouet J.-L.**, ..., 2007. NitroEurope-IP, 1<sup>st</sup> annual report of the C4 Component "Landscape analysis".
- [E19] Allirand J.-M., Gombert J., Jullien A., **Drouet J.-L.**, Savin A., Rossato L., Le Dily F., Ourry A., Ney B., 2004. Projet PROMOSOL-INRA : comportement variétal du colza en réponse à la fertilisation azotée. Comité de pilotage du projet, 13/05/2004, Paris, France.

#### **I.2.6 Documents d'animation**

- [F1] **Documents d'animation du projet ESCAPADE**, depuis 2012 : comptes rendus des réunions du Comité de Pilotage du projet, des assemblées générales du projet, présentations orales...
- [F2] **Réponse à l'Appel à projet de l'ANR « Agrobiosphère », 2012. ESCAPADE : Evaluation de Scénarios sur la Cascade de l'Azote dans les Paysages Agricoles et moDELisation territoriale. Coordinateur du projet, sélectionné pour une durée de 4 ans.**

- [F3] **Documents d'animation du groupe transversal « Approches intégrées pour l'évaluation des effets des pratiques agricoles sur les services écosystémiques des agrosystèmes** : agrégation d'impacts, spatialisation, évaluation environnementale, modélisation, analyse en cycle de vie » du projet d'UMR ECOSYS, 2013-2014 : présentations orales, documents divers.
- [F4] **Documents d'animation scientifique de l'axe « Intégration » de l'Equipe Biosphère-Atmosphère** : présentations orales, document définissant les orientations scientifiques de l'axe « Intégration ».
- [F5] **Documents d'animation du groupe de travail sur un projet de plateforme « Paysage » du département Environnement et Agronomie et inter-départements INRA, 2011-2013.**
- [F6] **Documents du groupe de travail « Flux dans les paysages » du département Environnement et Agronomie de l'INRA, dont Clastre P., Drouet J.-L., Dupont S., Fabre J.-C., Lavigne C., Louchart X., Mérot P., Olios A., Salmon-Monviola J., 2009.** Rapport de mission du groupe de réflexion sur l'opportunité d'un projet collectif « Flux dans les paysages », Rapport commandé par le département Environnement et Agronomie de l'INRA, 44 p.
- [F7] **Documents d'animation de la composante « Paysage » du projet européen NITROEUROPE, 2006-2011** : présentations orales, animations de sessions, rédaction ou participation à la rédaction des comptes-rendus (« Minutes ») des réunions de travail. Ces réunions de travail se sont tenues lors des assemblées générales annuelles du projet, lors de réunions spécifiques des partenaires européens de la composante « Paysage » (2 à 3 réunions par an) et lors de réunions internes à l'INRA et à l'équipe Biosphère-Atmosphère de l'UMR EGC. Ces réunions ont porté sur :
- le développement du modèle NITROSCAPE de transferts d'azote dans les paysages,
  - les données à acquérir puis acquises sur les sites « Paysages » du projet NITROEUROPE, dont en particulier le site français de l'ORE AgrHys en Bretagne,
  - la définition de scénarios agro-environnementaux de réduction des émissions de GES et des pollutions d'origine azotée, scénarios incluant des modifications des pratiques culturales, des systèmes de cultures ou de la structure du paysage,
  - l'application du modèle NITROSCAPE aux données des paysages et aux scénarios,
  - les projets de publications associées.
- [F8] **Documents d'animation du groupe de travail sur la modélisation des transferts de carbone et d'azote et bilans de GES à l'échelle de l'exploitation agricole, depuis 2006** : présentations orales, animations de sessions, rédaction des comptes-rendus des réunions de travail. Ces réunions ont essentiellement porté sur le développement du modèle couplé FARMSIM/PASIM/CERES-EGC, l'analyse de sensibilité du modèle et les projets de publications associées.
- [F9] **Documents d'animation de la Démarche Qualité dans l'UMR EGC, 2005-2008** : présentations orales, documents pour l'audit Qualité, plans d'actions Qualité, procédures de gestion de la documentation, des équipements, des échantillons, des cahiers de laboratoires...
- [F10] **Drouet J.-L., 2004. Démarche entreprise en vue d'une ré-orientation thématique. Proposition d'un projet scientifique.** Document pour le Département Environnement et Agronomie et l'Unité Environnement et Grandes Cultures à Grignon, 26 p.
- [F11] **Drouet J.-L., Pagès L., 1999. Modélisation architecturale de la dynamique de répartition des assimilats carbonés dans la plante entière de maïs. Couplage des systèmes aériens et racinaires.** Projet de séjour post-doctoral pour le Département Environnement et Agronomie, 3 p.
- [F12] **Drouet J.-L., 1997.** Procédure d'utilisation du digitaliseur 3D FASTRAK Polhemus. Document interne, 6 p.
- [F13] **Drouet J.-L., 1994.** Manuel des procédures de production des cartes d'estimation des pluies et des cartes d'indice de végétation en zone sahélienne à partir de l'information Meteosat et NOAA. Rapport interne Agrhymet/CILSS, 24 p. + annexes.

## I.3 Encadrement

Les noms des étudiant(e)s dont j'étais ou je suis l'encadrant principal sont soulignés.

### I.3.1 Thèses

- [G1] Projet de co-encadrement de thèse. Effets de l'affectation des sols sur le bilan environnemental des filières bio-sourcées. Application à l'analyse coûts-bénéfices de projets à base de bio-ressources. Co-encadrement avec B. Gabrielle (EGC, directeur de thèse) et P.A. Jayet (UMR Economie Publique, Thiverval-Grignon).
- [G2] Azouz N., 2013-2016. Evaluation, à partir d'une approche paysage, des incertitudes liées à la variabilité intra-maille des modèles régionaux de transferts atmosphériques. Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France ED129, UPMC. Encadrant principal, co-encadrement avec M. Beekmann (LISA Créteil), directeur de thèse P. Cellier.
- [G3] Dufossé K., 2010-2013. Bilan environnemental des filières de bioéthanol de 2<sup>ème</sup> génération. Ecole Doctorale ABIES, AgroParisTech. Co-encadrement avec B. Gabrielle (EGC, directeur de thèse).
- [G4] Duretz S., 2007-2010. Modélisation des transferts et transformations d'azote à l'échelle de la petite région agricole. Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France ED129, UPMC. Encadrant principal, co-encadrement avec P. Durand (UMR SAS Rennes), directeur de thèse P. Cellier.
- [G5] Maddonni G.A., 1999-2002. Architecture d'un couvert de maïs et relation avec l'environnement lumineux. Effets de l'arrangement spatial des plantes et du génotype. Thèse de l'Université de Buenos-Aires, Argentine. Contribution à la description et à la modélisation de la structure 3D des plantes.

### I.3.2 CDD Ingénieurs/Post-doctorants

- [G6] Lamboni M. (2015). Analyse de modèles de transferts et transformations d'azote dans les paysages agricoles. Post-doctorant, financement sur contrat ANR ESCAPADE.
- [G7] Benhamou C., 2014-2017. Modélisation des transferts et transformations d'azote dans les paysages. Post-doctorant, financement sur contrat ANR ESCAPADE.
- [G8] Carozzi M., 2013-2015. Evaluation critique de la capacité des modèles de prairies et de grandes cultures à reproduire l'effet des différents forçages anthropique sur le stockage de matière organique et les émissions de GES à l'échelle de la France. Post-doctorant, financement sur contrats ANIMALCHANGE-IP et AEGES-ADEME.
- [G9] Blanchon C., 2013-2014. Développement et déploiement d'applications informatiques pour le modèle NitroScope. Financement sur contrat ANR ESCAPADE.
- [G10] Chabbert, D., 2011-2012. Analyse comparée d'outils de couplage pour la modélisation spatio-temporelle des paysages. Financement INRA Département Environnement et Agronomie.
- [G11] Belleau C., 2006-2008. Gestion de projet, expérimentation végétale, gestion de données. Financement sur contrat NITROEUROPE-IP.
- [G12] Savin A., 2003-2006. Variabilité génétique du colza en réponse à la fertilisation azotée. Financement sur contrat PROMOSOL-INRA.

### I.3.3 Stages Masters

- [G13] Blanchon C., 2013. Modélisation couplée du fonctionnement des écosystèmes et des transferts atmosphériques dans les paysages. Master Physique Informatique (6 mois), Université de Montpellier 2.
- [G14] De Cacqueray-Valmenier Y., 2012. Modélisation des transferts d'azote atmosphérique à l'échelle du paysage. Master Modélisation et Calcul scientifique (6 mois), Université de Rennes 1.

- [G15] Picoche C., 2012. Modélisation des cultures pérennes. Master Bioinformatique et Modélisation (6 mois), INSA de Lyon.
- [G16] Fusis C., 2010. Sensibilité d'un modèle de bilans de gaz à effet de serre au sein d'exploitations agricoles à ses paramètres biophysiques et aux modalités de gestion des exploitations. Master Ingénierie de la Statistique (6 mois), Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines.
- [G17] Capian N., 2008. Sensibilité d'un modèle de bilans de gaz à effet de serre au sein d'exploitations agricoles à ses paramètres biophysiques et aux modalités de gestion des exploitations. Stage Master Ingénierie de la Statistique (6 mois), Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines.
- [G18] Duretz, S., 2007. Modélisation des transferts d'azote et réalisation de bilans de gaz à effet de serre au sein des exploitations agricoles. Master Informatique pour les sciences (6 mois), Université Montpellier 2.

### **I.3.4 Autres stages**

- [G19] Nicolas C., 2004. Paramétrisation de la forme des feuilles de colza. 1<sup>ère</sup> année INA Paris-Grignon.
- [G20] Guet S., Walbaum C., 2004. Quelle marge de manœuvre dans le pilotage de la qualité d'un co-produit : le touteau de colza ? 3<sup>ème</sup> année INA Paris-Grignon, spécialisation AGER, option Filières.
- [G21] Floriot M., 2003. Etude préliminaire à la modélisation des différences de comportement variétal chez le colza en réponse à la fertilisation azotée. Analyse bibliographique préliminaire à l'élaboration d'un modèle de fonctionnement du colza. DESS Gestion des Agroressources Amélioration et Diversification du végétal, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [G22] Raffy C., 2002. Simulation et modélisation de la structure géométrique du maïs. Maîtrise IUP Informatique, Université d'Avignon.
- [G23] Floriot M., 2002. Comparaison de l'acquisition et du transfert du carbone et de l'azote chez des génotypes de maïs différents par leur sénescence foliaire. Maîtrise IUP Biologie appliquée aux Productions Végétales et aux Industries Alimentaires, Amiens.
- [G24] Moreau D., 2001. Caractérisation du développement végétatif de trois génotypes de maïs. Étude du rythme d'installation des feuilles et de dimensions finales des phytomères. Ingénieur Institut Supérieur d'Agriculture, Lille.
- [G25] Gagneul D., 2000. Dosage et analyse des teneurs en sucres solubles et en amidon des organes de plantes de maïs en phase végétative. Maîtrise Biologie Cellulaire et Physiologie Végétale, Université Rennes 1.
- [G26] Lallau B., 1998. Représentation 3D des plantes par la méthode de stéréovision numérique. 2<sup>ème</sup> année IUT Mesures Physiques, Créteil.
- [G27] Bucamp S., 1997. Création de maquettes informatiques dynamiques de maïs par digitalisation 3D. 2<sup>ème</sup> année INA Paris-Grignon.
- [G28] Kostih K., 1995. Suivi non destructif de la position des organes chez le maïs par la méthode de stéréovision. 2<sup>ème</sup> année IUT Mesures Physiques, Créteil.

## I.4 Enseignement

- 2003** Exposé dans l'IUP « Génie de l'environnement », Paris VII (1 h).
- 1998-2002** Exposé dans l'UV « La recherche en Agronomie », 2<sup>ème</sup> année de l'INA-PG (1/2 j).
- 1998** Formation interne à l'Unité sur la digitalisation et modélisation 3D des plantes (1 j).
- 1998** Exposé dans le DEA « Biologie, diversité et adaptation des plantes cultivées » (INA-PG, Paris XI, Paris VI, ENSAM), et dans le DEA « Fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale » (INA-PG, Paris VI, ENS) (1 h).
- 1993** Transfert de technologie et formation des utilisateurs, Centre de la Météorologie Nationale, Ouagadougou, Burkina-Faso (1 semaine).

## I.5 Tâches administratives, participation, responsabilités dans des projets

### I.5.1 Dans l'UMR EGC

- Depuis 2013** Participant au groupe projet pour la reconfiguration de l'UMR EGC et sa fusion avec l'UMR PESSAC et l'équipe MOS de l'UMR BIOEMCO
- Depuis 2009** Animateur de l'un des deux axes scientifiques de l'équipe Biosphère-Atmosphère « Intégration des processus à des échelles supra-parcelle (du paysage à la région) »,  
Co-animateur Implication au sein de l'équipe Biosphère-Atmosphère dans un groupe de discussion autour des composantes du projet NITROEUROPE dans lesquelles l'équipe est impliquée (échelles locale, parcelle, paysage), ainsi que dans un groupe de réflexion sur la modélisation intégrée des flux azotés.
- 2009** Membre du Conseil de l'UMR.
- 2004-2008** Co-animateur du groupe Qualité de l'Unité, avec pour principales missions d'assurer la mise en œuvre du référentiel Qualité INRA, la cohérence et la transversalité de la démarche Qualité dans l'ensemble de l'Unité, la production d'outils de gestion du système Qualité de l'Unité.
- 2001-2003** Contribution à la mise en place du fonctionnement de l'équipe Plante suite à la restructuration de l'Unité en 2000,  
Co-animateur dans l'équipe Plante d'un projet sur les interactions génotype × environnement chez le colza.

### I.5.2 Dans le département Environnement et Agronomie de l'INRA

- 2012-2013** Participant au projet « Coordination des plateformes de modélisation » en réponse à l'appel à projets « Pari scientifique » du département EA.
- 2011-2013** Participant au groupe d'animation du projet de plateforme de modélisation des paysages du dépt EA, en partenariat avec d'autres départements (EFPA, MIA, SAD, SPE, GAP).
- 2009** Participant à un groupe de réflexion sur l'opportunité d'un projet collectif « Flux dans les paysages » dans le département EA.

### I.5.3 Au niveau régional

- Depuis 2013** Membre du comité scientifique de Fédération Ile-de-France de Recherche sur l'Environnement (FIRE)
- 2012-2019** Participant au LABEX « Biodiversité, Agroécosystèmes, Société, Climat (BASC) » regroupant plusieurs unités d'Ile-de-France,
- 2011-2014** Participant au pilier « Agriculture » du programme Piren-Seine Phase 6,

**2009-2010** Participant (avec présentation de mes travaux) à des séminaires organisés par le Piren-Seine et par la Fédération Ile de France de Recherche sur l'Environnement (FIRE) dont deux journées « paysage ».

#### **I.5.4 A l'INRA et au niveau national**

**Depuis 2012** Coordinateur du projet ESCAPADE (« Evaluation de Scénarios sur la Cascade de l'Azote dans les Paysages Agricoles et moDELisation territoriale ») en réponse à l'Appel à Projet du programme **ANR Agrobiosphère 2012**, sélectionné sur liste principale pour une durée de 4 ans, négociation en cours, montant de l'aide demandée : 1 086 k€.

Les partenaires et sous-contractants sont issus :

- des instituts de recherche : de l'INRA (EGC Grignon SAS Rennes, ASTER Mirecourt, SOLS Orléans, MIAJ Jouy-en-Josas, BIA Toulouse, PEGASE Rennes), du CNRS (SISYPHE Paris, ECOLAB Toulouse, LISA Créteil) et d'autres instituts (IRSTEA Antony, MINES ParisTech Fontainebleau, CESBIO Toulouse, CERFACS Toulouse, LISIC Calais),

- des instituts techniques : Arvalis-Institut du Végétal Boigneville, CETIOM Grignon,

- des coopératives : TERRENA Ancenis, TRISKALIA, Landerneau.

A ces partenaires et sous-contractants s'ajoutent des experts qui interviendront ponctuellement sur les différents volets du projet : INRA Economie Publique Grignon, AgroParisTech, Université Paris-Sud, Université d'Aarhus, UNIP, Institut de l'Elevage, CITEPA, ADEME, Syndicats des Eaux, Chambres d'Agriculture, Associations d'agriculteurs.

**Depuis 2012** Membre du comité de suivi du projet GESTER (« Gestion territoriale des résistances aux maladies en réponse aux nouvelles contraintes d'utilisation des pesticides en grande culture », 2012-2015, programme ANR Agrobiosphère 2011).

**Depuis 2011** Membre du comité de pilotage de la thèse de H. Ben Touhami (« Calibration Bayésienne et fusion de données pour modéliser l'impact du changement climatique »).

**2010-2012** Membre de la cellule de pilotage du groupe projet « cascade de l'azote » au sein du GIS GC-HP2E (« Grandes Cultures à Haute Performance Economique et Environnementale »),

Participant au séminaire « Cascade de l'azote » du GIS GC-HP2E.

**2010-2014** Participant au projet « Cadastres Ammoniac » en réponse à l'Appel à Projets de l'ADEME : « Réalisation de cadastres dynamiques des émissions d'ammoniac liées à la fertilisation azotée aux échelles régionale et nationale » (Coord. S. Générmont). Contribution à la constitution des bases de données spatialisées et à la modélisation spatialisée des émissions d'ammoniac.

**Depuis 2009** Implication dans l'UMT GES N<sub>2</sub>O regroupant à Grignon les Unités EGC et d'Agronomie, le CETIOM, sur les deux tâches traitant des émissions indirectes de N<sub>2</sub>O :

- modélisation des émissions indirectes de N<sub>2</sub>O avec le modèle NITROSCAPE,

- conception des principes d'aménagement des bassins versants pour réduire les émissions indirectes de N<sub>2</sub>O.

**2006-2010** **Animateur** d'un réseau de collaboration national (INRA EGC, UREP, ASTER, CIRAD, ENITAC) autour du modèle « FARMSIM » associant les bâtiments d'élevage, les cultures et les prairies pour la simulation des bilans de GES à l'échelle de l'exploitation agricole ; développement et analyse de sensibilité du modèle à ses paramètres biophysiques et aux pratiques culturales et d'élevage.

**2007** Participant au projet MAESTRIA (« Mesures Agro-Environnementales dans le bassin de la Seine : vulnérabilité, Résilience et Impacts environnementaux du système Agricole ») en réponse à l'appel à projet du programme ANR VMC (« Vulnérabilité Milieux Climat »). Coord. : P. Cellier, projet non sélectionné.

**2005** Participant à la construction et à la rédaction du projet TraBilAz (« Transferts et bilans d'azote à l'échelle d'une petite région ») en réponse à l'appel à projet du programme MEDD GICC (« Gestion et Impacts du Changement Climatique »). Coord. : P. Cellier, projet non sélectionné.

- 2005** Participant à la construction et à la rédaction du projet TraBilAz (« Transferts et bilans d'azote à l'échelle d'une petite région ») en réponse à l'appel à projet du programme ANR ECCO (« Ecosphère continentale – Risques environnementaux »). Coord. : P. Cellier, projet non sélectionné.
- 2004** Participant à la construction du projet et au projet « Étude et modélisation des interactions génotype × environnement (IGE). Quel(s) modèles(s) pour quel(s) usage(s) ? » sur crédits mutualisés UMR-DGER (EGC et Agronomie Grignon, Coord. : A. Jullien et M.H. Jeuffroy).
- 2002-2005** **Rédacteur du projet** et participant au projet PROMOSOL-INRA « Variabilité de la réponse à la fertilisation azotée du colza. Conséquences sur le rendement et le bilan environnemental de la culture » (EGC Grignon, EVA Caen, Association pour la PROMOTION des recherches Sur les OLéagineux, Coord. : B. Ney et A. Ourry).
- 2001-2003** Participant au projet inter-départements ÉCOGÈNE-PHYSIOGÈNE-Maïs « Étude des bases physiologiques et génétiques de l'absorption et de la mobilisation de l'azote au cours du remplissage du grain chez le maïs » (EA Grignon, BV Versailles, GAP Le Moulon, IBP Orsay, Coord. : B. Hirel et A. Gallais).

### I.5.5 Au niveau européen et international

- 2011-2015** **Projet ECLAIRE-IP (FP7)** « Effects of Climate Change on Air Pollution Impacts and Response Strategies for European Ecosystems » (Coord. M.A. Sutton, financement : 6 997 k€) :
- Contribution au WP 8 sur les relations entre échelles locales, paysagères et régionales pour, en particulier, analyser la variabilité intra-maille des modèles régionaux à partir de modèles fonctionnant à l'échelle du paysage.
- 2011-2015** **Projet ANIMALCHANGE-IP (FP7)** « AN Integration of Mitigation and Adaptation options for sustainable Livestock production under climate CHANGE » (Coord. J.F. Soussana, financement : 9 000 k€) :
- Contribution aux WP 4 et 5 sur l'évaluation du changement climatique sur la productivité des cultures depuis l'échelle locale jusqu'à l'échelle régionale.
- 2008** **Projet CLIMMANI (ESF)** « Climatic change : manipulation experiments in terrestrial ecosystems », coord. C. Beier), **Expert** sur la mise en place de la base de données du projet en tant que responsable de la gestion des données « paysage » du projet NITROEUROPE,
- 2006-2011** **Projet NITROEUROPE-IP (FP6)** « The nitrogen cycle and its influence on the European greenhouse gas balance » (Coord. M.A. Sutton, financement : 16 000 k€) :
- Animation scientifique dans le projet :
    - o Participation à la coordination de la composante « paysage » (C4) du projet (« Landscape analysis », Coord. P. Cellier),
    - o Implication dans l'ensemble des activités de la composante « paysage » : développement du modèle NITROSCAPE, acquisition des données sur les 6 paysages européens, application du modèle NITROSCAPE aux 6 paysages, définition des scénarios relatifs aux pratiques agricoles et à la structure du paysage et application du modèle NITROSCAPE à ces scénarios,
    - o Animateur ou rapporteur de plusieurs sessions de la composante « paysage » lors des assemblées générales du projet ou de réunions spécifiques de la composante « paysage » [63],
    - o **Responsable (« Activity Leader »)** d'une des 5 activités de la composante « paysage », celle traitant de l'application du modèle NITROSCAPE aux données des 6 paysages européens ; cette activité correspond à la mise en commun des activités de modélisation et de traitement des données expérimentales et représente donc une synthèse de l'ensemble des activités menées dans la composante « paysage » du projet.
  - Gestion des données « paysage » du projet :
    - o Membre du comité de gestion des données du projet (« Data Management Committee »),

o **Responsable « Data Manager »** (2006-2011) puis « **Data Centre Manager** » (2008-2011) lors de la création du site internet hébergeant les données « paysage » du projet.

**1999-2002** **Projet de coopération ECOS-Argentine.** « Développement de modèles de fonctionnement de cultures de blé et de maïs fondés sur une description architecturale tridimensionnelle des plantes ». Participant au projet (Coord. : R. Bonhomme et M.E. Otegui).

**Depuis 1999** **Relecteur d'articles** pour :

- Environmental Pollution, Biogeosciences, Agricultural Systems, Environmental Modelling and Software, Computers and Electronics in Agriculture sur ma thématique actuelle « Flux d'azote dans les exploitations agricoles et les paysages ».

- Functional Plant Biology, Functional Structural Plant Modelling, Annals of Botany, Ecological Modelling, Ecology Letters, Tree Physiology, Canadian Journal of Botany, Scientia Horticulturae, Journal of Zhejiang University sur ma précédente thématique « Modélisation structure-fonction des plantes et des peuplements végétaux ».

**1992-1994** **Responsable** de la collecte des données terrain, de la chaîne de traitement d'images satellitaires et de la rédaction d'un bulletin d'alerte précoce sur l'estimation des pluies à partir d'images satellitaires en région sahélienne (Agrhymet, Niger).



## **Chapitre II – Synthèse des travaux**



## II.1 Introduction : Parcours, mobilités géographiques et thématiques (Fig. 1)

Etant d'origine agricole et sensible aux problèmes de gestion rationnelle des ressources agricoles et naturelles, j'ai décidé de suivre une formation agronomique à l'École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (ENSAR, devenue Agrocampus Ouest). En me spécialisant dans des disciplines à la base des métiers de l'eau, de l'environnement et de l'aménagement (hydrologie, bioclimatologie, télédétection...), j'ai abordé l'agronomie dans son contexte environnemental et par une approche biophysique. Souhaitant découvrir le domaine de la recherche, j'ai effectué mon stage de fin d'études dans l'Unité de Bioclimatologie de l'INRA de Bordeaux, encadré par J. Riou. J'ai cherché à mieux comprendre la signification de la radiométrie moyen infrarouge en forêt landaise, dans le but d'en préciser les capacités pour l'évaluation des quantités de bois récoltées par éclaircies à l'échelle régionale. Afin de compléter ma formation dans un autre contexte et partager mes connaissances avec les pays du Sud, j'ai effectué mon service national dans l'organisme régional africain Agrhymet au Niger. En contribuant à la mise en place d'un système opérationnel d'estimation des pluies par satellite au Sahel, mon activité fut multi-disciplinaire (agronomie, climatologie, télédétection, informatique...).

L'aspect recherche m'ayant particulièrement intéressé et compte tenu de mon origine agricole et de mon intérêt pour la gestion des ressources en agriculture, j'ai ensuite entrepris des recherches dont l'objectif général est de produire des connaissances et des outils aidant à raisonner la gestion de l'azote et de l'espace dans les agro-écosystèmes<sup>1</sup>. Mes recherches se sont déroulées en deux grandes phases successives, caractérisées par des échelles d'étude des agro-écosystèmes différentes : de l'organe à la plante et au peuplement dans la première phase (de 1994 à 2007), puis de la parcelle à la région dans une deuxième phase, en me focalisant plus particulièrement sur les échelles de l'exploitation agricole et du paysage (depuis 2005). Malgré ces différences entre les échelles d'étude, mes recherches ont présenté de nombreux points communs, notamment en ce qui concerne les questions scientifiques abordées, les approches mises en œuvre, les objets traités. D'une manière générale, les questions scientifiques ont consisté ou consistent à étudier les interactions entre les structures (des plantes et des peuplements dans la première phase, puis des paysages et des exploitations agricoles dans la deuxième phase) et les fonctions d'échange (acquisition et répartition des assimilats azotés et carbonés dans la première phase, puis flux, transferts et bilans de composés azotés et carbonés dans la deuxième phase) au sein de ces structures. Les approches mises en œuvre ont consisté ou consistent en une analyse et la prise en compte des processus et des interactions à des échelles parfois beaucoup plus fines (e.g. organe resp. parcelle) que l'échelle d'intégration et d'analyse de leurs effets et leurs impacts sur les agro-écosystèmes (e.g. peuplement resp. paysage). Compte tenu de la complexité des systèmes étudiés<sup>2</sup>,

---

<sup>1</sup> L'**agro-écosystème** est un produit de la modification de l'écosystème par l'homme et constitue un espace d'interaction entre l'homme, ses savoirs et ses pratiques et la diversité des ressources naturelles. L'agro-écosystème est l'unité de base permettant d'étudier les relations entre une communauté humaine, son environnement et les services que les écosystèmes fournissent pour assurer sa subsistance. L'agro-écosystème est donc une association dynamique comprenant les cultures, les pâturages, le bétail, d'autres espèces de flore et de faune, l'atmosphère, les sols et l'eau en interaction avec les usages qu'en font les hommes sur la base de leurs systèmes de valeurs et traditions. Leur développement durable constitue sans doute un des principaux défis auquel devra faire face l'humanité dans les prochaines décennies (UNESCO, 2009).

<sup>2</sup> Un **système complexe** est un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de prévoir sa rétroaction, son comportement ou évolution par le calcul. C'est un système que la perte d'un de ses éléments fait changer de nature et à qui, à la limite, elle fait perdre sa qualité de complexe. Face à un système complexe, la méthodologie des modèles comporte nécessairement le choix d'un point de vue qui est l'homologue de l'analyse cartésienne dans l'étude des systèmes simples (Legay, 1997). La principale caractéristique d'un système complexe est sa causalité circulaire, c'est-à-dire l'existence de rétroactions des comportements collectifs et des propriétés émergentes sur le comportement des éléments constitutifs du système.

la modélisation<sup>3</sup> est un outil incontournable et a été largement développée en complément d'expérimentations et de collectes de données issues d'inventaires ou d'enquêtes. Parmi les autres points communs, les objets traités ont été ou sont les composés azotés, en interaction avec les composés carbonés et aussi l'eau.

Dans la première phase de mes recherches, je me suis d'abord investi dans des travaux permettant d'affiner la compréhension des interactions multiples au sein du système complexe sol-plante-atmosphère, en abordant le fonctionnement du milieu naturel par une approche écophysio-logique<sup>4</sup>. Recruté en 1994 en tant qu'Attaché Scientifique Contractuel, j'ai préparé une thèse dans l'Unité de Bioclimatologie de l'INRA de Grignon, encadrée par R. Bonhomme, sur le fonctionnement des peuplements végétaux à partir d'une approche architecturale. J'ai étudié les compétitions entre plantes et entre organes au sein de peuplements de maïs en relation avec leur environnement physique (hétérogénéité du rayonnement modulée par la géométrie des plantes) et le fonctionnement physiologique des plantes (hétérogénéité de la capacité photosynthétique modulée par la répartition de l'azote foliaire). Cette étude a montré l'intérêt de l'approche architecturale pour la modélisation du fonctionnement des peuplements. Elle a toutefois porté uniquement sur les organes aériens de la plante ainsi que sur la phase végétative du développement et le fonctionnement trophique.

Fort de ce constat, j'ai décidé d'effectuer un séjour post-doctoral dans l'Unité Ecophysio-logie et Horticulture (ECHO, devenue l'Unité Plantes et Systèmes Horticoles, PSH) de l'INRA d'Avignon, encadré par L. Pagès. J'ai développé un modèle architectural de croissance et de répartition des assimilats carbonés et azotés dans la plante entière de maïs en phase végétative. Ce travail a montré que, pour étudier le fonctionnement de la plante à partir d'une approche architecturale, il n'est pas concevable, d'une part de dissocier les aspects morphogénétiques et trophiques du fonctionnement, et d'autre part de négliger l'un des deux systèmes de la plante, aérien ou souterrain.

Recruté en 2000 dans l'UMR INRA/INA-PG Environnement et Grandes Cultures (EGC) à Grignon, j'ai d'abord exercé mes activités dans l'équipe Plante, dans la continuité de mes recherches en écophysio-logie. Ces recherches ont consisté à comprendre, conceptualiser et modéliser les interactions entre fonctionnements morphogénétique (production d'organes) et trophique (répartition des assimilats carbonés et azotés entre les organes) en intégrant à l'échelle de la plante entière (systèmes aérien et racinaire) et du peuplement (maïs et colza) des processus formalisés à l'échelle de l'organe.

Avec l'évolution progressive de l'équipe Plante vers des thématiques en lien de plus en plus fort avec la physiologie végétale, la génomique et l'amélioration des plantes, j'ai souhaité revenir à mes objectifs thématiques initiaux et s'inscrivant dans la continuité de ma formation d'ingénieur agronome généraliste, puis spécialisé en sciences du sol et du bioclimat, et de mes activités à l'INRA de Bordeaux et en Afrique sahélienne. Après avoir décidé d'effectuer un bilan de compétences en

---

<sup>3</sup> Le terme **modèle**, bien que relativement peu ancien d'un point de vue linguistique (XVI<sup>ème</sup> siècle), est extrêmement employé dans toutes les langues et offre une très grande richesse d'acceptions. Dans le langage ordinaire, si le mot modèle a de multiples usages, il désigne en premier lieu l'objet à imiter (Legay, 1997). Dans le cas des systèmes complexes que sont les agro-écosystèmes, le modèle peut aussi être considéré comme une représentation simplifiée de la réalité avec un certain point de vue. On peut distinguer différentes catégories de modèles suivant leurs objectifs, les hypothèses sous-jacentes, leurs formalismes... Par exemple on peut distinguer les modèles d'hypothèse des modèles de mécanismes ou des modèles de décision ou de prévision. On peut aussi distinguer les modèles dynamiques et statiques suivant que le temps intervient ou non, les modèles déterministes et stochastiques selon la manière de décrire le comportement du système, les modèles mécanistes et empiriques selon qu'ils décrivent les processus du système ou les relations entre variables sans explication. Cette liste n'est pas exhaustive et des analyses détaillées des types de modèles ou des méthodes des modèles ont été décrites dans de nombreux ouvrages (e.g. Legay, 1973 ; Pavé, 1994).

<sup>4</sup> L'**écophysio-logie** est une discipline de la biologie à la frontière entre l'écologie et la physiologie, qui étudie les réponses comportementales et physiologiques des organismes à leur environnement. Dans le cadre de ce mémoire, il s'agit plus précisément d'écophysio-logie végétale qui consiste à étudier les interactions entre le fonctionnement des plantes et leur environnement.

2003, j'ai élaboré plusieurs scénarios d'évolution possible vers des problématiques environnementales, soit dans le domaine des changements climatiques globaux, soit dans le développement régional, l'aménagement du territoire et la gestion de l'espace. En accord avec le Département Environnement et Agronomie de l'INRA et les acteurs de l'équipe Biosphère-Atmosphère de l'UMR EGC, j'ai choisi de développer un projet scientifique sur la modélisation des transferts et bilans d'azote à l'échelle du paysage agricole.

Ainsi, dans la deuxième grande phase de mes recherches, depuis 2005, mes travaux consistent en la caractérisation, la modélisation et la quantification des flux d'espèces azotées réactives ( $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $N_2O$ ,  $NO_x$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ) ainsi que l'évaluation de leurs impacts en termes de pollution azotée et de bilans de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle de l'exploitation agricole et du paysage (territoires de quelques  $km^2$  à quelques dizaines de  $km^2$ ).

Mon arrivée dans l'équipe Biosphère-Atmosphère en 2005 a permis d'aborder une nouvelle échelle d'étude des transferts d'azote dans l'équipe, l'échelle du paysage avec la prise en compte explicite de ses hétérogénéités spatiales. L'étude des flux d'azote à l'échelle du paysage constituait également un nouveau front de recherche en Europe avec le projet NITROEUROPE (FP6, 2006-2011) dont une composante était dédiée à l'analyse des flux d'azote dans les paysages. J'ai participé à la coordination et contribué à l'ensemble des activités de cette composante : mise en place d'un réseau de collaborations nationales et européennes, modélisation intégrée des flux d'azote dans les paysages agricoles, mise en place et suivi d'expérimentations, gestion de la base de données « paysage » du projet, participation à la définition de scénarios agro-environnementaux relatifs aux modifications de pratiques agricoles, de systèmes de cultures ou de structure des mosaïques paysagères, afin d'évaluer leurs impacts sur les pollutions azotées d'origine agricole et les émissions de GES. Ces recherches ont notamment permis de montrer le rôle des transferts latéraux par voies atmosphérique et hydrologique sur les flux d'azote dans et entre les agro-écosystèmes, et ainsi sur les émissions indirectes d'azote par des milieux non fertilisés (e.g. zones semi-naturelles, prairies). J'ai en outre exercé des responsabilités dans ce projet : « Activity Leader » et « Data Centre Manager » et encadré des étudiant(e)s en master et en thèse. Mes recherches sur ce thème se poursuivent notamment par la coordination du projet ESCAPADE (ANR Agrobiosphère, 2013-2017). Par ailleurs, j'anime depuis 2009 l'un des deux axes scientifiques de l'équipe Biosphère-Atmosphère et portant sur l'intégration des processus aux échelles supra-parcellaires (depuis des paysages de quelques  $km^2$  à quelques dizaines de  $km^2$  jusqu'à des territoires plus vastes de quelques centaines à quelques milliers de  $km^2$ ).

***Dans la suite du mémoire, les publications auxquelles j'ai contribué sont indiquées [entre crochets].***

*« Tous les modèles sont faux, certains sont utiles » (Box et Draper., 1987)*



## II.2 Des outils pour une meilleure gestion du milieu naturel

### II.2.1 Potentialités du rayonnement moyen infrarouge pour la détection des éclaircies en forêt landaise

La finalité des recherches menées par l'équipe « Télédétection » de l'Unité de Bioclimatologie de l'INRA de Bordeaux en 1991-1992 était de mettre au point des méthodes d'estimation de la ressource forestière et de quantification de la récolte annuelle en bois du massif forestier landais. Deux types d'intervention sylvicole ont un intérêt économique en forêt landaise : les coupes rases caractérisées par l'enlèvement complet des arbres et les éclaircies qui prélèvent environ 25% du volume de bois tous les cinq ans. Des études préliminaires avaient montré que la réflectance dans le domaine moyen infrarouge est particulièrement sensible aux changements de structure des forêts, notamment aux coupes rases. Mon travail a consisté à évaluer les potentialités de cette bande spectrale pour la détection des éclaircies.

Outre son intérêt économique, cette étude, en s'insérant dans un projet CNES/PNTS<sup>5</sup> sur l'« utilisation des données SPOT4/MIR<sup>6</sup> », a également contribué à affiner les connaissances sur la signification du rayonnement moyen infrarouge en forêt. En effet, de nombreux auteurs soulignaient la difficulté à interpréter les mesures de réflectance dans ce domaine de longueur d'onde sur les peuplements forestiers et les résultats obtenus étaient souvent contradictoires.

Pour mettre en évidence les éclaircies à partir de cette bande spectrale, j'ai d'abord constitué une base de données spatialisées d'une forêt test de 2500 hectares : à l'aide d'un Système d'Information Géographique, j'ai produit des cartes numériques renseignées par les données de terrain ; j'ai ensuite associé le parcellaire ainsi obtenu aux données satellitaires Landsat TM<sup>7</sup> (Fig. 2, Drouet, 1992 [D2]).

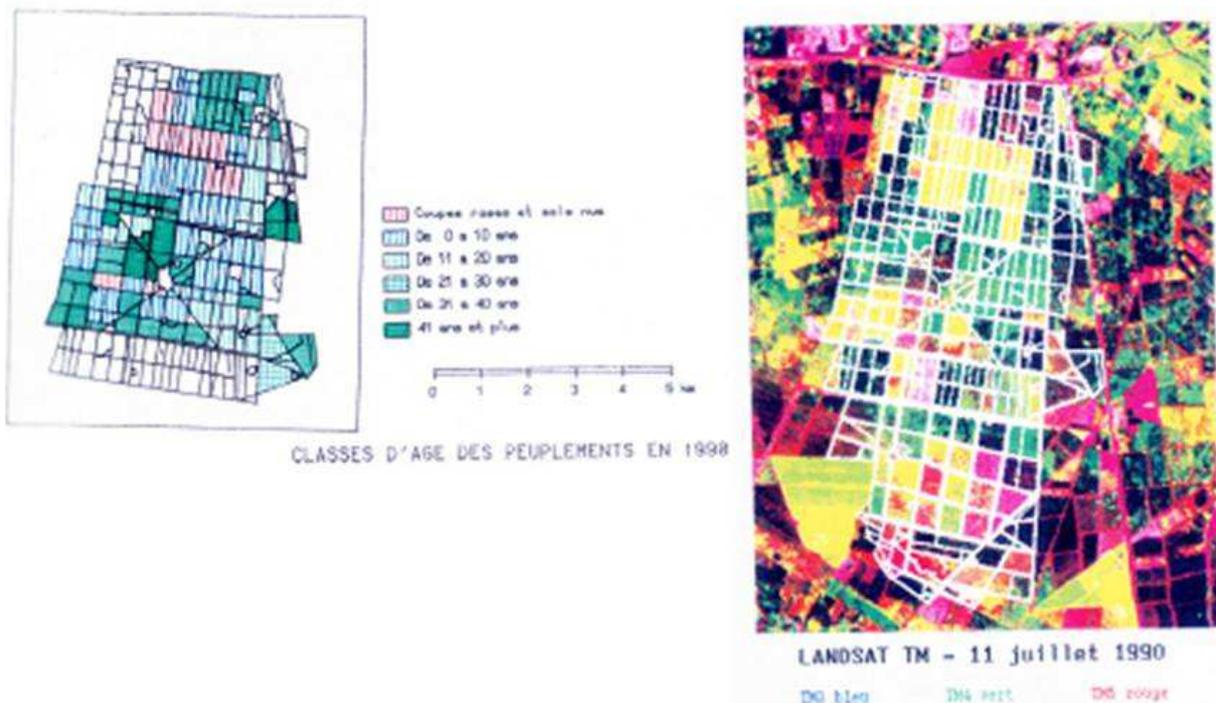


Fig. 2. Classes d'âge des peuplements de la forêt test (obtenues par traitement de données sous Système d'Information Géographique) et résultat d'une composition colorée de données satellitaires Landsat TM (obtenu par traitement d'images) (d'après Drouet, 1992, [D2]).

<sup>5</sup> Centre National d'Etudes Spatiales / Programme National de Télédétection Spatiale.

<sup>6</sup> Moyen InfraRouge.

<sup>7</sup> Landsat Thematic Mapper.

L'analyse des changements radiométriques dans le moyen infrarouge, consécutifs à une éclaircie ou un débroussaillage sur des parcelles de référence, m'a permis d'établir un modèle statistique d'identification de ces changements entre deux dates successives (Fig. 3). Après avoir mis au point sur l'ensemble d'une forêt test une méthode de vérification des résultats obtenus sur les parcelles de référence, j'ai montré qu'il était possible d'identifier dans environ 75% des cas les peuplements non éclaircis et ceux débroussaillés et/ou éclaircis (Drouet, 1992, [D2] ; Guyon et al., 1996, [C84]).

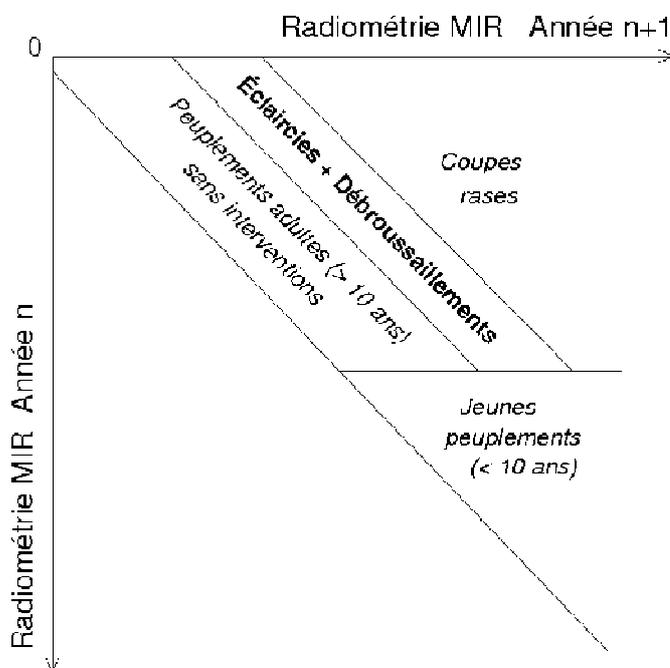


Fig. 3. Modèle statistique d'identification des interventions sylvicoles entre deux années successives : classification des pixels en fonction de leurs valeurs radiométriques observées sur deux années successives dans une bande spectrale moyen infrarouge (MIR, 1550-1750 nm) du capteur TM de Landsat (d'après Drouet, 1992, [D2]).

## II.2.2 Estimation des pluies en zone sahélienne

Les régimes pluviométriques sont d'une importance vitale pour l'agriculture et le pastoralisme au Sahel. Les systèmes culturels traditionnels, notamment les cultures vivrières, ne prennent en compte ni irrigation, ni apport d'intrants ; la fréquence des pluies et la quantité d'eau reçue sont donc déterminantes pour les productions céréalières comme pour les pâturages naturels. La grande sécheresse qui a frappé cette région entre 1968 et 1973 a entraîné la création d'un Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS) regroupant neuf pays de la bande sahélienne et dont le Centre Agrhymet (Niamey, Niger) coordonne les activités à l'échelle régionale.

### *Suivi opérationnel*

Compte tenu de la faible densité du réseau pluviométrique du CILSS, l'information satellitaire est un outil primordial pour estimer les hauteurs de pluie à l'échelle régionale et alerter précocement les autorités en cas de sécheresses prononcées. J'étais responsable de l'ensemble de la chaîne de traitement des données. De 1992 à 1994, mon travail consistait à estimer les champs pluviométriques à partir d'indicateurs satellitaires Meteosat et des données de terrain (Fig. 4 ; Drouet et al., 1993, [A27] ; Drouet, 1994, [A26]), puis à rédiger chaque décade un article de synthèse sur la situation pluviométrique en Afrique de l'Ouest.

J'ai également participé au suivi de la végétation et de son état phytosanitaire (présence de Criquets pèlerins) en liaison avec les experts du Centre Agrhymet. D'une part, à partir de données

satellites NOAA<sup>8</sup>, j'ai participé à la production décadaire d'images de synthèse de l'indice de végétation (Roy et al., 1994, [A25]) pour suivre qualitativement la progression de la végétation au cours de la saison des pluies. D'autre part, suite à la présence de foyers grégarigènes de Criquet pèlerin au Sahel, j'ai étudié l'intérêt des produits satellitaires et météorologiques disponibles en temps réel au Centre pour le suivi de la situation acridienne.

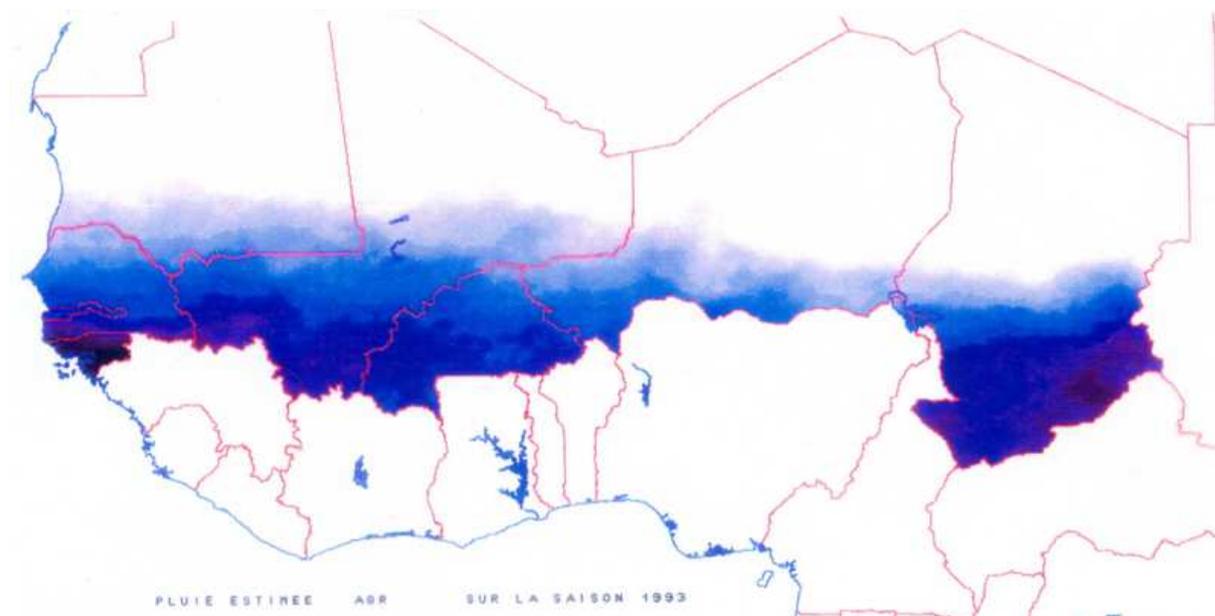


Fig. 4. Pluie cumulée sur la saison des pluies 1993 au Sahel et estimée à partir des indicateurs satellitaires Meteosat (« occurrences de nuages à sommet froid » et « températures radiatives ») et des données de terrain (données des postes pluviométriques) (d'après Drouet, 1994, [A26]).

#### **Recherche d'indicateurs pertinents**

Au cours de la campagne pluviale, je ne me suis pas limité à un suivi opérationnel. En évaluant la pertinence d'un grand nombre d'indicateurs satellitaires, j'ai cherché, en collaboration avec l'ORSTOM<sup>9</sup>, devenu l'IRD<sup>10</sup>, de Niamey, à améliorer les méthodes opérationnelles d'estimation des pluies existantes.

Les méthodes Epsat-Lannion (Cadet et Guillot, 1991) et Tamsat-Reading (Flitcroft et al., 1989) utilisaient les indicateurs satellitaires « occurrences de nuages à sommet froid » et « températures maximales radiatives ». J'ai voulu tester, sur la campagne pluviale 1993, la qualité de ces estimateurs en y ajoutant les « températures minimales radiatives » (Drouet et al., 1993, [A27]). Une analyse statistique a permis de dégager les avantages et inconvénients de chacune de ces trois méthodes, afin de définir une procédure opérationnelle d'estimation des pluies pour les prochaines saisons (Drouet, 1994, [A26]).

Ces travaux ont été à l'origine d'un atelier dont le but était de comparer et de valider les méthodes d'estimation des pluies par satellite en les replaçant dans un contexte plus général de qualité d'indicateurs. J'ai participé à son organisation et je m'y suis fortement impliqué à travers trois communications ([C85, C86, C87]).

<sup>8</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration.

<sup>9</sup> Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer.

<sup>10</sup> Institut de Recherche pour le Développement.

### II.2.3 Que m'ont apporté ces activités de recherche et de suivi opérationnel ?

Ces deux expériences m'ont permis de me familiariser à la recherche scientifique avec le souci de son application à la gestion de l'espace régional. Dans le premier cas, l'objectif était double : produire des connaissances sur la caractérisation du milieu naturel par des paramètres physiques et développer un modèle opérationnel d'évaluation de la ressource en bois sur l'ensemble d'un massif forestier. Dans le second cas, l'aspect recherche occupait une place moins importante sans être toutefois occulté. Il était en effet nécessaire de rechercher des paramètres physiques pertinents à l'échelle d'une région entière afin d'identifier les situations pluviométriques critiques et mieux répartir les aides.

L'aspect appliqué des recherches m'a permis de les resituer dans leur contexte économique : les premières intéressaient directement les organismes forestiers (ONF<sup>11</sup>, IFN<sup>12</sup>) et les industriels du bois. Les secondes s'inséraient pleinement dans le dispositif d'aide aux pays sahéliens et impliquaient des liens multi-disciplinaires internes au Centre Agrhymet et un partenariat avec d'autres organismes africains (ACMAD<sup>13</sup>, DPV<sup>14</sup>, DMN<sup>15</sup>) ou non (ORSTOM, FAO<sup>16</sup>).

---

<sup>11</sup> Office National des Forêts.

<sup>12</sup> Inventaire Forestier National.

<sup>13</sup> African Centre for Meteorology Applied to Development.

<sup>14</sup> Département de Protection des Végétaux.

<sup>15</sup> Direction de la Météorologie Nationale.

<sup>16</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations.

## **II.3 Approche architecturale du fonctionnement des plantes et des peuplements**

### **II.3.1 Contexte**

L'évolution de l'agriculture d'une production de masse vers une production de qualité s'est traduite par de nouveaux enjeux : maintenir une agriculture compétitive, par la sélection de nouveaux génotypes et l'amélioration des techniques culturales, et respectueuse de l'environnement, grâce à une meilleure gestion des intrants et des ressources naturelles. Ces défis nécessitent de mieux connaître le fonctionnement des plantes, en relation avec leur environnement physique. Les approches classiques du fonctionnement des peuplements assimilent le peuplement à un ensemble de « plantes moyennes » (Jones et Kiniry, 1986 ; Muchow et al., 1990 ; cf. Bonhomme et al., 1995, [B7] ; Brisson et al., 1996, [B5]) et négligent le rôle de l'architecture de la plante dans son fonctionnement. Toutefois, lorsque la disponibilité en ressources est réduite (e.g. diminution des apports d'azote), les compétitions entre plantes et entre organes augmentent l'hétérogénéité du peuplement (notamment les cultures en rangs), d'où la nécessité de prendre en compte le fonctionnement architecturé des plantes.

L'approche « architecturale » correspond à une caractérisation des processus de développement à l'échelle de l'organe et son intégration à l'échelle de plante et du peuplement végétal. Je la définis par deux composantes : l'une, structurale, caractérise la géométrie (en 3 dimensions, 3D) des organes et leur déploiement dans l'espace, elle détermine l'acquisition des ressources du milieu (carbone et azote) et résulte des compétitions entre plantes ; l'autre, fonctionnelle, caractérise la topologie, l'ontogénèse, les échanges de matière entre organes, elle détermine la répartition des ressources dans la plante et dépend des compétitions entre organes individuels. Je me suis d'abord essentiellement intéressé à la composante structurale du système aérien. Puis l'évolution de mes activités vers la composante fonctionnelle s'est traduite par des recherches complémentaires des précédentes, dans lesquelles j'ai développé une approche dynamique et intégrée du fonctionnement de la plante entière. J'ai ensuite mis en œuvre cette approche dans un projet d'équipe sur les interactions génotype × environnement.

### **II.3.2 Compétitions entre plantes, occupation de l'espace, répartition de la lumière et de l'azote intra- et inter-plantes, photosynthèse et production de biomasse du peuplement**

De 1994 à 1999, l'objectif général de l'équipe « Fonctionnement spatialisé des cultures » de l'Unité de Bioclimatologie de l'INRA de Grignon était de caractériser et de modéliser les phénomènes physiques et les processus biologiques intervenant dans les compétitions intra- et inter-plantes pour l'accès aux ressources du milieu (lumière, azote). En m'insérant dans cette problématique, j'ai étudié les régulations du développement de plantes de maïs en peuplement en fonction de l'environnement local des organes (Drouet, 1998, [D1]).

Mon travail a d'abord consisté à analyser expérimentalement, à partir d'une approche architecturale, les variations spatio-temporelles de deux facteurs liés aux conditions environnementales et déterminant la production potentielle (en conditions de nutrition hydrique et minérale peu limitantes) des peuplements au cours de leur phase végétative (Fig. 5 ; Drouet, 1998, [D1]) : i) la disposition spatiale des organes aériens déterminant la captation d'énergie lumineuse et donc l'alimentation carbonée de la plante (e.g. Monsi et Saeki, 1953 ; Chartier, 1966), ii) la répartition spatiale de l'azote foliaire déterminant la capacité photosynthétique des feuilles (e.g. Natr, 1975 ; Field et Mooney, 1986 ; Evans, 1989). A partir d'un modèle d'échanges radiatifs utilisant une approche volumique (Sinoquet et Bonhomme, 1992), couplé à un modèle de photosynthèse foliaire (Chartier, 1966), j'ai ensuite quantifié l'effet de ces variations sur la production potentielle de peuplements de maïs (Drouet et al., 1999, [A23] ; Drouet, 2003, [A19] ; Drouet et Bonhomme, 2004, [A17]) et analysé l'effet local de l'éclairement sur la teneur en azote foliaire (Drouet et Bonhomme, 1999, [A22], publication jointe ; Drouet et Bonhomme, 2004 [A17]).

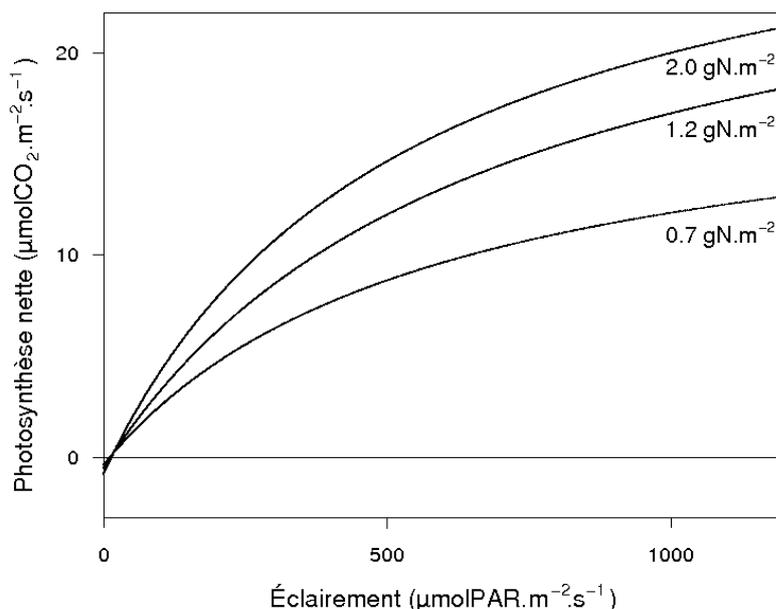


Fig. 5. Courbes de réponse photosynthétique à l'éclairement pour différentes teneurs en azote par unité de surface foliaire (d'après Drouet, 1998, [D1]).

Ce travail a présenté plusieurs originalités. L'approche architecturale permet d'étudier les interactions entre le peuplement et les conditions environnementales à l'échelle de l'organe, la feuille principalement, et non plus à l'échelle de la « plante moyenne ». Dans les approches fonctionnelles classiques, seule la quantité de surface foliaire (Watson, 1947 ; Bonhomme et al., 1971) et parfois sa distribution verticale (Duncan, 1971 ; Ross, 1981 ; Myneni et al., 1986) sont prises en compte. De même, la répartition de l'azote foliaire n'est pas prise en compte ou seulement son hétérogénéité verticale (e.g. Hirose et Werger, 1987 ; Lemaire et al., 1991). Ces simplifications sont acceptables pour les peuplements denses, mais elles ne sont plus valables pour les peuplements en rangs caractérisant les plantes de grande culture. Je me suis donc intéressé à des peuplements de maïs principalement qui présentent une forte hétérogénéité verticale et aussi horizontale au cours de la phase végétative. J'ai adopté une démarche à la fois expérimentale et modélisatrice (Fig. 6 ; Drouet, 1998, [D1]).

### II.3.2.1 Approche expérimentale de la dynamique de mise en place de la structure aérienne

#### *Suivi de la mise en place de la structure aérienne*

Afin de mieux comprendre le déterminisme de la mise en place des structures aériennes d'une plante de maïs au cours de la phase végétative, j'ai cherché à tester l'influence de l'environnement local des feuilles (lumière, gêne mécanique entre feuilles de plantes voisines) sur leurs réorientations spatiales au cours du temps et à identifier les mécanismes impliqués. Face à cet objectif et en collaboration avec B. Moulià (INRA Bioclimatologie Grignon), une expérimentation a été menée au champ en conditions peu limitantes de nutrition hydrique et minérale.

Puisque la dynamique de répartition azimutale des feuilles de maïs n'était alors pas étudiée à notre connaissance, les plantes ont été placées initialement dans deux situations extrêmes de compétition. Comme les premiers rangs foliaires d'une plantule de maïs se développent dans un plan vertical (Ledent et al., 1990), les plantes ont été repiquées dans un premier (resp. second) traitement avec leur plan azimutal perpendiculaire (resp. parallèle) au rang, produisant ainsi une compétition minimale (resp. maximale) entre feuilles de plantes voisines. Pour suivre la dynamique de mise en place du système foliaire spatialement, de façon non destructrice et si possible faiblement perturbatrice, j'ai effectué des mesures de trois paramètres caractérisant la structure géométrique en trois dimensions (3D) des plantes : azimuts, inclinaisons et hauteurs d'insertion foliaire.

## Modélisation de l'architecture 3D

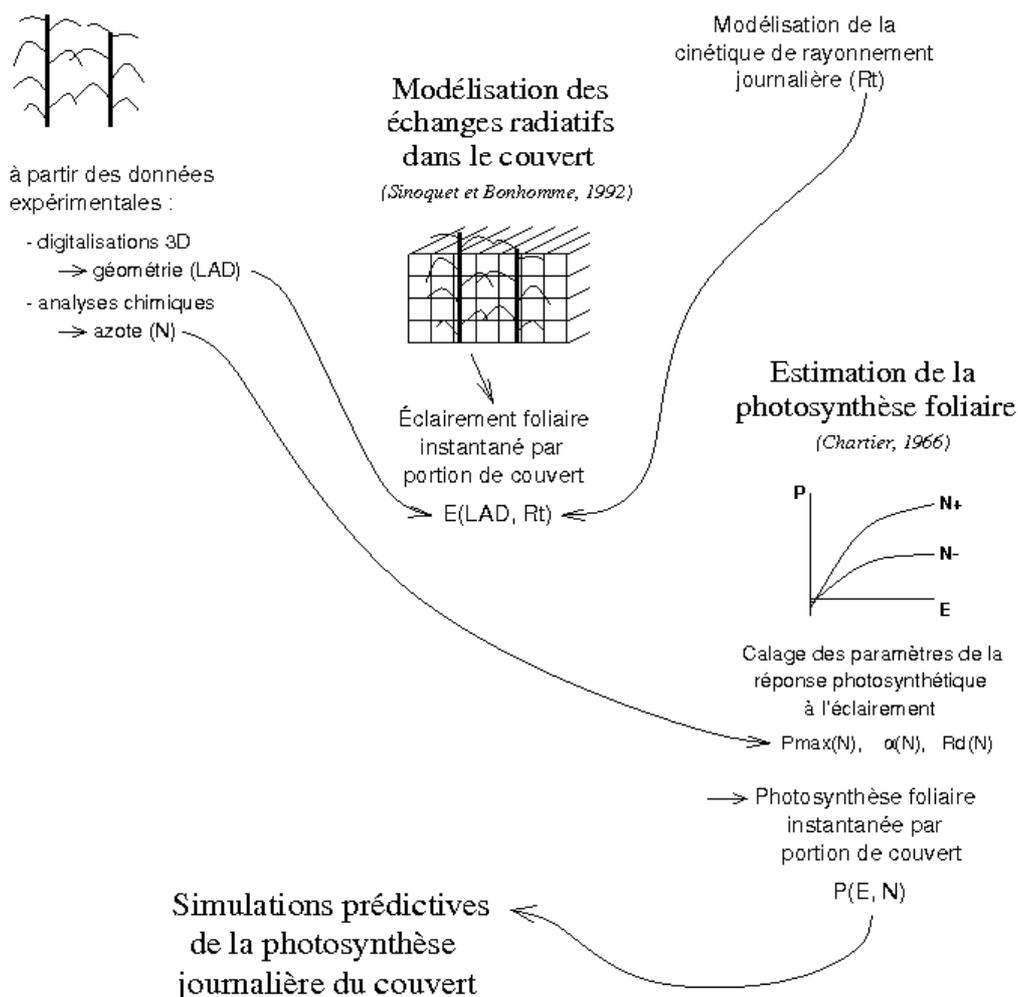


Fig. 6. Les différentes étapes du modèle architectural prédictif de la production potentielle de biomasse d'un peuplement de maïs (d'après Drouet, 1998, [D1]).

### Suivi de la mise en place du potentiel photosynthétique au sein de la structure aérienne

L'exploitation des données expérimentales a mis en évidence des réorientations azimutales des feuilles au cours de la phase végétative, amenant de nouvelles questions : quel est le déterminisme des réorientations foliaires et quelle est leur influence sur la captation d'énergie lumineuse du peuplement et, par conséquent, sur sa production photosynthétique ? Puisque le fonctionnement photosynthétique des feuilles dépend également de leur teneur en azote (Evans, 1989), j'ai décrit la répartition spatiale de l'azote foliaire total dans les structures mises en place et évalué l'influence de cette répartition sur la production photosynthétique du peuplement. J'ai finalement cherché à mettre en évidence, à l'échelle de l'organe « feuille », des relations entre la structure 3D des plantes (position spatiale des organes conditionnant l'éclairement reçu) et le fonctionnement photosynthétique des organes (teneur en azote total par unité de surface foliaire).

A partir d'une expérimentation au champ, j'ai décrit la répartition spatiale des structures aériennes et de l'azote foliaire au sein de peuplements de maïs de densités variées (10 et 20 plantes.m<sup>-2</sup>) et à trois stades du développement (entre le début de la montaison et la fin de la floraison femelle). L'étude a été menée en conditions peu limitantes de nutrition hydrique et minérale. J'ai mis en œuvre à Grignon une méthode d'acquisition de la structure aérienne des plantes basée sur le principe de la digitalisation magnétique 3D, portable au champ (Polhemus, 1993). Arrivée à l'INRA au début des années 1990, cette technologie a été utilisée notamment pour la description de l'architecture des arbres (Godin et al., 1997 ; Sinoquet et Rivet, 1997). Je me suis

formé à cet outil en collaboration avec H. Sinoquet et P. Rivet (INRA PIAF<sup>17</sup> Clermont-Ferrand) et je l'ai appliqué à l'étude des graminées à Grignon (Drouet, 2003, [A19]). Des analyses d'azote total ont été réalisées sur des organes entiers ou des portions d'organes. Afin d'évaluer la capacité photosynthétique des feuilles ou portions de feuilles, j'ai effectué, à l'aide d'une chambre à photosynthèse (LICOR-6400), des mesures de réponse photosynthétique à l'éclairement, pour des feuilles à teneurs en azote variées.

### II.3.2.2 Modélisation architecturale de la production de biomasse du peuplement

#### ***Comment représenter les plantes en 3D ?***

A partir des données de digitalisation et des données associées de taille et de forme d'organes acquises au laboratoire, j'ai développé en langage C des procédures originales de reconstruction des plantes en 3D, en adaptant une procédure de lissage d'organes développée par P. Lewis (University College, Londres) et en paramétrant un modèle de forme de feuille (d'après Bonhomme et Varlet-Grancher, 1978) et de tige. Les plantes sont alors représentées en 3D par un ensemble de triangles, format communément admis par l'ensemble de l'équipe « Fonctionnement spatialisé des cultures » (Fig. 7, 1<sup>ère</sup> ligne).

#### ***Quels modèles adopter en fonction des objectifs ?***

Pour modéliser la production de biomasse d'une culture dans un contexte architectural, nous avons retenu l'approche de de Wit (1965) : la photosynthèse de la culture est calculée comme la somme des photosynthèses des surfaces élémentaires. Le modèle comporte deux étapes distinctes : la simulation des échanges radiatifs au sein du peuplement puis celle de la réponse photosynthétique de l'élément de surface foliaire à son éclairement (Fig. 6).

Deux types de modèles d'échanges radiatifs étaient adaptés à l'objectif. Dans l'approche volumique, le peuplement est assimilé à un milieu diffusant (« turbid medium ») et est représenté par des couches de végétation dans les premiers modèles (synthèses dans Ross, 1981 ; Goel, 1988 ; Myneni et al., 1989). Adaptée par la suite aux peuplements hétérogènes (RIRI<sup>18</sup>, Sinoquet et Bonhomme, 1992), cette approche permet une bonne estimation des flux moyens à l'échelle d'une portion de peuplement. Dans l'approche surfacique, le peuplement est représenté par un ensemble de surfaces entre lesquelles s'effectuent les échanges radiatifs. Les flux sont bien décrits à l'échelle de l'organe mais ce type de modèle n'était pas disponible à Grignon en 1997 (Chelle et Andrieu, 1998). J'ai donc utilisé le modèle volumique RIRI, déjà vérifié sur maïs. Je l'ai modifié afin d'obtenir en sortie les éclaircissements de surface foliaire nécessaires aux calculs de photosynthèse. Pour pouvoir utiliser les structures reconstruites en 3D comme données d'entrée, les données surfaciques ont été transformées en données volumiques (Fig. 7, 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> lignes ; Drouet et Bonhomme, 1999, [A22]).

Parmi les nombreux modèles de photosynthèse existants, les modèles mécanistes sont fondés sur les principes théoriques qui rendent compte des processus photosynthétiques (Farquhar et al., 1980), mais les paramètres à ajuster sont nombreux. Les modèles empiriques sont établis à partir de relations statistiques entre la réponse photosynthétique foliaire et les variables biophysiques qui sont présumées l'influencer (Rabinovitch, 1951 ; Chartier, 1966 ; Johnson et Thornley, 1984). Ils requièrent un nombre réduit de paramètres et sont de bonne valeur prédictive (Pachepsky et al., 1996). J'ai donc retenu un modèle prédictif simple (Chartier, 1966), le nombre de paramètres à ajuster étant ainsi limité à trois : la photosynthèse à saturation lumineuse, le rendement quantique et la respiration à l'obscurité qui dépendent de la teneur en azote par unité de surface foliaire (Fig. 5). Je l'ai couplé au modèle d'échanges radiatifs. Les paramètres ont été calés à partir des mesures de réponse photosynthétique à l'éclairement et de teneur en azote associée. Les sorties de simulations ont été vérifiées à l'échelle du peuplement par comparaison aux valeurs d'efficacité de conversion trouvées par Bonhomme et al. (1982).

<sup>17</sup> Physiologie Intégrée de l'Arbre Fruitier.

<sup>18</sup> Radiation Interception in Row Intercropping.

Jours après semis (JAS) = 60

Jours après semis (JAS) = 90

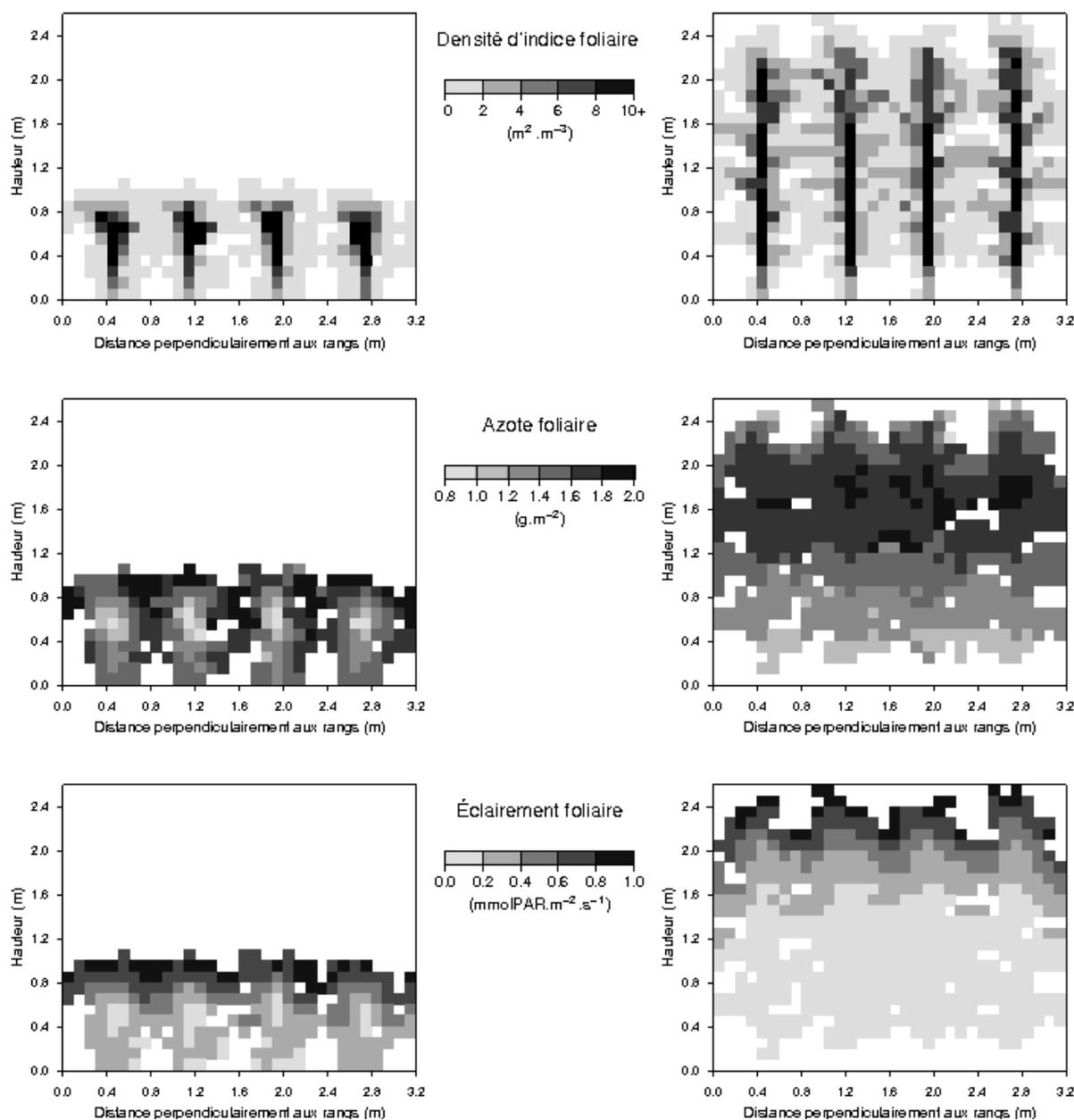


Fig. 7. Description en 3 dimensions (3D) de la répartition spatiale des structures aériennes dans un peuplement de maïs de densité  $10 \text{ plantes} \cdot m^{-2}$  à deux stades du développement (début montaison, 60 jours après semis ; fin floraison, 90 jours après semis). Profils verticaux correspondants de densité d'indice foliaire, de teneur en azote total par unité de surface foliaire et d'éclairement foliaire moyen lors d'une journée ensoleillée ( $25 \text{ MJ} \cdot m^{-2}$ ) (d'après Drouet et Bonhomme, 1999, [A22]).

### II.3.2.3 Principaux résultats

#### **Répartition 3D des structures aériennes – Effet sur la captation d'énergie lumineuse du peuplement**

La plupart des études se sont focalisées sur l'hétérogénéité verticale de la structure aérienne du peuplement, caractérisée par les inclinaisons et les hauteurs d'insertion foliaire. De plus, les rares travaux sur la distribution azimutale des feuilles ont décrit seulement la fin de la phase végétative (e.g. Girardin et Tollenaar, 1992). En conséquence, l'effet des variations de l'hétérogénéité horizontale de la structure aérienne sur la captation d'énergie lumineuse du peuplement n'a pas été étudié pour les peuplements en rangs.

Par le suivi au cours de la phase végétative de trois paramètres de structure (azimut foliaire, inclinaison et hauteur d'insertion foliaire), nous avons montré que les variations de la position spatiale des feuilles entre plantes au sein d'un peuplement sont essentiellement dues à des réorientations azimutales. Ces mouvements s'observent surtout lorsque les feuilles sont en croissance, qu'elles sont de grande taille et que l'agrégation initiale de la végétation sur le rang est forte (Fig. 8 ; Drouet et Moulia, 1997, [A24]). L'absence de relation observée entre la position azimutale des feuilles et les torsions au niveau de la tige suggère que les réorientations azimutales s'effectueraient au niveau de chaque feuille par une réaction aux conditions de l'environnement (microclimat lumineux et agrégation végétale) plutôt qu'à l'échelle de la plante entière par une stratégie d'optimisation de son fonctionnement.

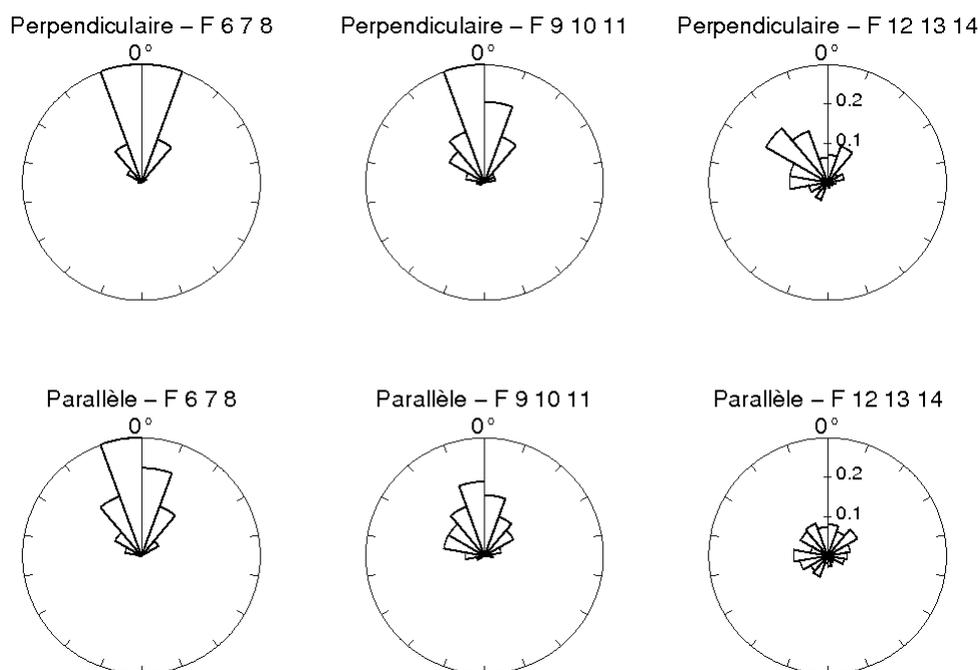


Fig. 8. Fréquences des différences entre les azimuts foliaires mesurés à floraison et les azimuts initiaux des plantes de maïs dans deux configurations expérimentales : azimuts initiaux perpendiculaires au rang et parallèles au rang. Les rangs foliaires ont été regroupés par trois : (6, 7, 8), (9, 10, 11) et (12, 13, 14) (d'après Drouet et Moulia, 1997, [A24]).

Nous avons ensuite cherché à évaluer les hypothèses sur les azimuts foliaires classiquement utilisées dans la bibliographie pour estimer la production de biomasse des peuplements de maïs. A partir des représentations 3D d'architecture des plantes, j'ai simulé des plantes de structure hypothétique en modifiant uniquement la position azimutale des feuilles (Fig. 9 ; Drouet et al., 1999, [A23]). Par simulation des échanges radiatifs au sein des peuplements réels et hypothétiques, nous avons montré, avec le degré de précision du modèle, que les réorientations azimutales n'avaient pas d'effet significatif sur la captation d'énergie lumineuse journalière des peuplements, quelle que soit la disposition azimutale des feuilles (Fig. 10 ; Drouet et al., 1999, [A23]). Il n'est donc pas nécessaire

de prendre en compte les variations d'azimuts foliaires dans les modèles de prédiction de l'interception du rayonnement et de la production de biomasse de peuplements de maïs. Afin de vérifier ce résultat à l'aide d'un modèle d'échanges radiatifs surfacique, dans lequel le nombre d'hypothèses simplificatrices est réduit, une collaboration a été menée avec M. Chelle (INRA Bioclimatologie, Grignon ; Chelle et Drouet, 1998, [C79]) et G. Maddonni (Université Buenos-Aires, Argentine ; Maddonni et al., 2001, [A21]).

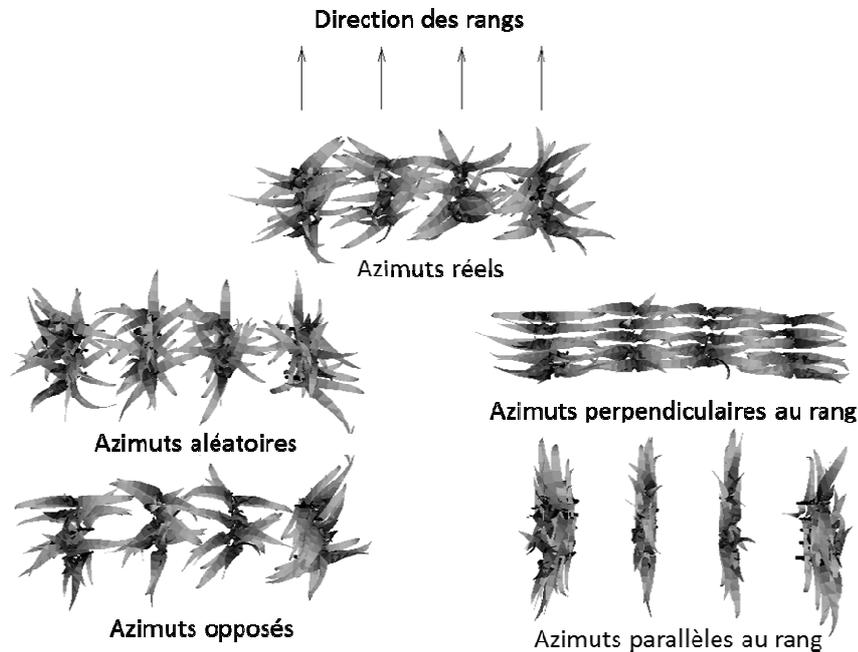


Fig. 9. Vue verticale d'un couvert de maïs de densité  $10 \text{ plantes.m}^{-2}$  au stade fin montaison (74 jours après semis) modélisé à partir des données de digitalisation. Simulation de situations classiquement utilisées dans la littérature pour le maïs (ré-arrangement des azimuts selon une disposition aléatoire ou opposée) ou extrêmes en termes d'interception du rayonnement (ré-arrangement des azimuts selon une disposition perpendiculaire ou parallèle au rang) (d'après Drouet et al., 1999, [A23]).

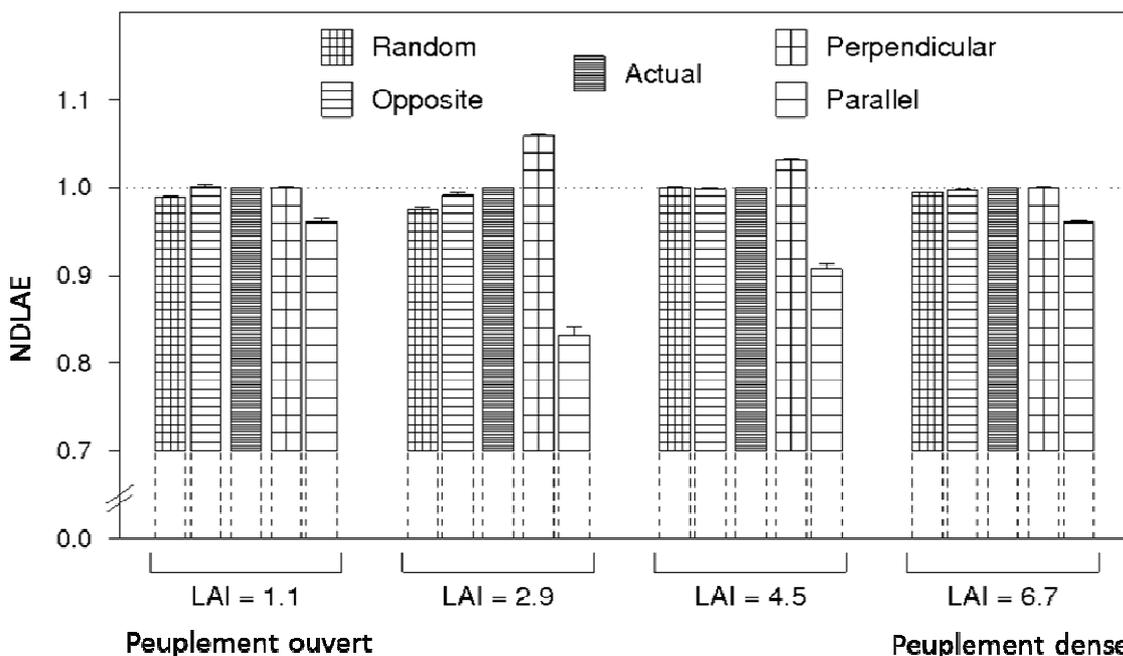


Fig. 10. Efficacité d'absorption du rayonnement journalière et normalisée de peuplements observés et hypothétiques dans lesquels les positions azimutales des feuilles ont été ré-arrangées selon la Fig. 9 (d'après Drouet et al., 1999, [A23]).

### Répartition 3D de l'azote foliaire - Effet sur la production potentielle du peuplement

De nombreuses études ont porté sur l'hétérogénéité verticale de la répartition de l'azote foliaire dans des peuplements denses (e.g. Hirose et Werger, 1987 ; Anten et al., 1995). Toutefois, son hétérogénéité horizontale est non négligeable dans le cas d'un maïs en phase végétative. En effet, les feuilles de maïs sont de grande longueur et l'hétérogénéité du microclimat lumineux dans les peuplements en rangs peut entraîner une forte hétérogénéité de la répartition de l'azote foliaire.

Ce travail a montré que, dans des peuplements de maïs en rangs, des gradients intra-limbes puis inter-limbes d'azote foliaire apparaissent successivement au cours de la phase végétative (Drouet et Bonhomme, 1999, [A22], publication jointe). L'hétérogénéité horizontale de la répartition de l'azote foliaire est particulièrement marquée durant les premiers stades de la mise en place du peuplement, avant la fermeture des rangs (Fig. 7, 3<sup>ème</sup> ligne). Etant donnée la forte hétérogénéité de la répartition de l'azote foliaire au sein d'un peuplement de maïs en phase végétative, nous avons testé la validité des hypothèses sur la répartition de l'azote foliaire classiquement utilisées dans les modèles de fonctionnement des plantes. Les simulations suggèrent que les gradients d'azote observés permettent d'accroître significativement la photosynthèse journalière du peuplement par rapport à une distribution uniforme sur tout le peuplement (Drouet et Bonhomme, 2004, [A17]). Négliger l'hétérogénéité de la répartition de l'azote foliaire dans les modèles de fonctionnement reviendrait donc à sous-estimer les réserves accumulées jusqu'à la floraison dans les parties végétatives et, finalement, le rendement en grains.

### Relations entre azote et éclairage à l'échelle de l'organe « feuille »

La bibliographie indique que le potentiel photosynthétique des feuilles, déterminé par leur teneur en azote, varie en fonction de leur microclimat lumineux, c'est-à-dire en fonction de la géométrie du peuplement (e.g. Hirose et al., 1988 ; Lemaire et al., 1991). Toutefois, la plupart des travaux ont porté sur des peuplements denses de plantes ne développant pas d'épi ; le degré de dépendance entre capacité photosynthétique et éclairage est alors évalué globalement à l'échelle du peuplement. L'approche architecturale permet de reconsidérer la question à l'échelle plus fine de l'organe et de l'étendre aux peuplements en rangs, fortement hétérogènes. Ainsi, la dynamique de répartition de l'azote en fonction de l'éclairage varie au cours de la phase végétative (Fig. 7, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> lignes) et les relations de la bibliographie ne sont retrouvées que partiellement à la fin de la phase végétative dans les peuplements denses (Fig. 11 ; Drouet et Bonhomme, 1999, [A22]). Une interprétation de ce résultat est que l'épi, déjà formé à ce stade, constituerait un puits important pour les ressources carbonées et azotées qui seraient remobilisées des feuilles vers les grains.

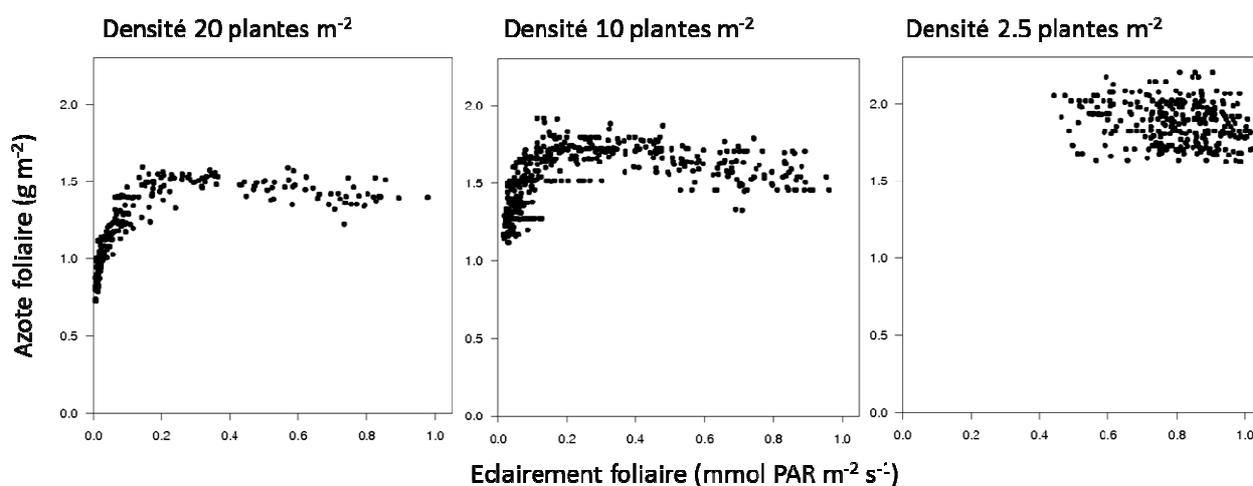


Fig. 11. Relations entre la teneur en azote par unité de surface foliaire et l'éclairage foliaire journalier dans des peuplements de maïs de différentes densités à la fin de la phase végétative (90 jours après semis). Le peuplement de densité 2.5 pl.m<sup>-2</sup> a été semé à une densité de 10 pl.m<sup>-2</sup> et a été éclairci uniformément 60 jours après le semis pour obtenir une densité de 2.5 pl.m<sup>-2</sup> (d'après Drouet et Bonhomme, 1999, [A22]).

### Rôle de la teneur en azote par unité de masse et de la masse surfacique des feuilles

La plupart des travaux de la bibliographie ont montré que l'azote par unité de surface foliaire dépend de la masse surfacique des feuilles et ont porté sur des plantes à métabolisme en C3 (e.g. Le Roux et al, 2001 ; Meir et al, 2002). Dans le cas du maïs, plante à métabolisme en C4, nous avons montré que, même si la masse surfacique joue un rôle dans la teneur en azote par unité de surface foliaire, la teneur en azote par unité de masse joue aussi un rôle non négligeable (Fig. 12 ; Drouet et Bonhomme 2004, [A17]).

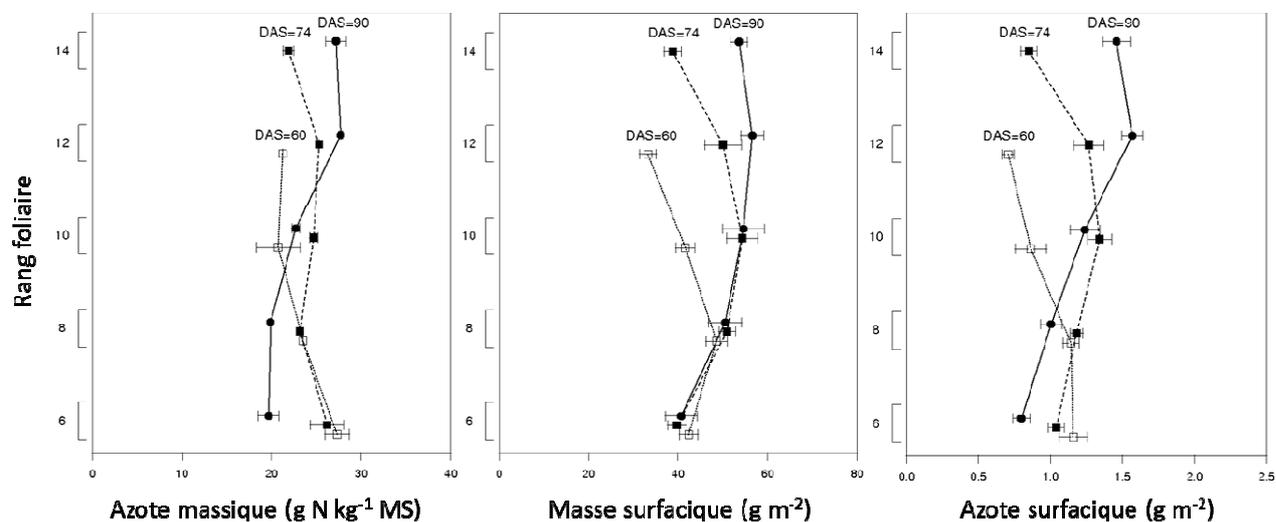


Fig. 12. Profils d'azote massique, de masse surfacique et d'azote surfacique dans un peuplement de maïs de densité 20 plantes.m<sup>2</sup> à trois stades de développement (60, 74 et 90 jours après semis, DAS) (d'après Drouet et Bonhomme, 2004, [A17]).

#### II.3.2.4 Autres applications, collaborations, transferts de connaissances

J'ai fait bénéficier l'ensemble de l'équipe de mon expérience sur les techniques de digitalisation et de modélisation 3D des plantes dans le cadre de formations internes à l'équipe. Cette démarche a été appliquée dans le cas d'autres graminées (blé, sétaire et sorgho) par des doctorants de l'équipe (S. Ljutovac et A. Marquez-Gomez) et d'autres unités de recherche (D. Combes, INRA UEPF<sup>19</sup> Lusignan et PIAF Clermont-Ferrand). Je l'ai également utilisée en collaboration avec I. Nijs et G. Popa (Université d'Anvers, Belgique) dans le cadre d'un projet sur l'acquisition de la structure aérienne d'herbacées en mélange et l'évaluation de l'interception du rayonnement (Drouet et al., 2000, [B4]).

L'ensemble de ces travaux ont permis de développer des collaborations avec des équipes nationales, notamment dans le cadre d'un projet multi-disciplinaire ÉCOGÈNE (avec les équipes INRA NAP<sup>20</sup> à Versailles et Génétique au Moulon) sur la remobilisation de l'azote et sa variabilité génotypique chez le maïs (Drouet et al., 2003, [C65] ; Drouet et al., 2004, [C60] ; Hirel et al., 2005, [A15]). J'ai aussi mené des collaborations avec des équipes internationales autour de l'interception du rayonnement par des peuplements décrits en 3D : projet franco-argentin ECOS<sup>21</sup> (avec les Universités de Buenos-Aires, de Mar del Plata et l'INTA<sup>22</sup> de Balcarce) au cours duquel j'ai contribué à la thèse de G. Maddonni (1999-2002) en l'encadrant sur la description et la modélisation de la structure 3D des plantes (Maddonni, 2002, [G5]). J'ai également établi des collaborations avec les Universités d'Anvers et de Bucarest (Drouet et al., 2000, [B4]), ou encore avec l'USDA-ARS<sup>23</sup>, Texas (Drouet et Kiniry, 2008, [A13]).

<sup>19</sup> Unité d'Ecophysiologie des Plantes Fourragères.

<sup>20</sup> Nutrition Azotée des Plantes.

<sup>21</sup> Evaluation-orientation de la Coopération scientifique.

<sup>22</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

<sup>23</sup> U.S. Department of Agriculture/Agricultural Research Service.

### II.3.3 Interactions entre croissance et répartition des assimilats carbonés et azotés dans la plante entière

En 1999-2000, j'ai initié dans l'Unité ECophysiology et HOrticulture (ECHO, devenue ensuite PSH, Plantes et Systèmes Horticoles) de l'INRA d'Avignon le travail mené ensuite dans l'équipe Plante de l'UMR EGC à Grignon. Mes activités ont consisté à développer un modèle architectural de la dynamique de croissance et de répartition des assimilats en intégrant les processus de l'organe à la plante entière au cours de la phase végétative du développement.

Les modèles architecturaux de plante récemment développés pour les graminées négligeaient soit le système aérien, soit le système racinaire et portaient essentiellement sur le fonctionnement morphogénétique de la plante (Fournier et Andrieu, 1998, système aérien ; Mollier, 1999, système racinaire). Un modèle architectural de croissance et de répartition des assimilats carbonés avait été récemment développé pour l'hévéa (Thaler et Pagès, 1998). Toutefois l'effort portait sur le système racinaire alors que le système aérien était décrit succinctement. En parallèle des modèles de fonctionnement morphogénétique, des modèles avaient été développés pour la répartition des assimilats (Tabourel-Tayot et Gastal, 1998 ; Lemaire et Millard, 1999 ; Lacoïnte, 2000). Ces modèles à compartiments ne considéraient pas les interactions entre organes individuels et ne permettaient donc pas de traiter le développement morphogénétique des plantes.

#### II.3.3.1 Choix de modélisation

L'approche architecturale permet de gérer les processus de développement à l'échelle de l'organe et donc de dépasser la démarche classique de répartition du pool d'assimilats entre compartiments globaux (Brouwer, 1962 ; modèles du type CERES, Jones et Kiniry, 1986, ou STICS, Brisson et al., 1998). A l'aide de cette approche, nous avons cherché à formaliser dans le modèle GRAAL (GRowth And ALlocation), d'une part, un programme morphogénétique générateur d'organes et modulé par les facteurs environnementaux et, d'autre part, un fonctionnement trophique homogène entre chaque organe et modulé par la disponibilité en assimilats carbonés (Drouet et Pagès, 2003, [A20]). Ce couplage entre morphogénèse et échanges trophiques est nécessaire car le développement architectural des organes aériens conditionne l'acquisition du carbone et, simultanément, le développement architectural des organes de la plante entière dépend de la disponibilité en assimilats carbonés. En outre, l'intégration des processus à l'échelle de la plante entière implique que les deux systèmes, aérien et racinaire, soient traités avec le même niveau de résolution. Compte tenu de l'indissociabilité des métabolismes carboné et azoté, nous avons ensuite développé une nouvelle version du modèle, GRAAL-CN, dans laquelle les hypothèses pour la répartition de l'azote sont similaires à celles sur le carbone (Drouet et Pagès, 2007, [A14], publication jointe). L'azote y est considéré comme une ressource de même statut que le carbone et non plus comme une contrainte à la production de carbone, comme c'était le cas par exemple dans les modèles du type CERES ou STICS.

Les modèles GRAAL et GRAAL-CN reposent sur l'hypothèse centrale, simple et unique pour toute la plante, d'une croissance des organes modulée par leur force de puits<sup>24</sup> et par la quantité d'assimilats disponibles dans la plante entière. Les assimilats carbonés étaient caractérisés par des teneurs en glucides. Un modèle basé sur la variable synthétique « matière sèche » ne permettrait pas de bien rendre compte des flux carbonés (resp. azotés), les glucides (resp. assimilats azotés) intervenant sous diverses formes dans la plante : glucides (resp. azote) disponibles (sucres, resp. nitrates, ammonium), mise en réserve (amidon, resp. acides aminés), investissement dans les structures (cellulose..., resp. protéines). L'offre globale en carbone (ou pool d'assimilats carbonés disponibles) de la plante est calculée à partir de l'offre de la graine, des réserves et de la photosynthèse des feuilles ; celle-ci est évaluée, dans un premier temps, à l'aide d'un modèle simple d'acquisition du carbone (Monteith, 1972). Pour chacun des organes, les demandes d'entretien sont considérées comme proportionnelles à la masse de l'organe affectée d'un coefficient lié à la

---

<sup>24</sup>La force de puits d'un organe est définie par ses demandes d'entretien et de croissance potentielle.

température (loi  $Q_{10}$ , Penning de Vries, 1975). Si l'offre est supérieure à la demande d'entretien de tous les organes, alors ces demandes sont satisfaites et l'excédent est affecté aux demandes de croissance de chacun des organes, déterminées par leur croissance potentielle. Les lois de croissance des organes en surface et en volume sont extrêmement simples et dépendent de la température. La croissance d'un organe donné se fait au prorata de sa demande ; si les demandes de croissance sont entièrement satisfaites, l'excédent est stocké dans le compartiment de réserves. Le pas de temps du modèle est la journée, intégré sur la première partie de la phase végétative (un mois environ).

Face à cet objectif de modélisation, nous nous sommes posés la question du choix de l'outil. Le formalisme L-système (Prusinkiewicz et Lindenmayer, 1990) convenait particulièrement bien, par sa conception, à la modélisation du fonctionnement morphogénétique de la plante. Mais, compte tenu de sa spécificité au moment de ces travaux, il ne permettait pas de coupler correctement les aspects morphogénétiques et trophiques du développement. En revanche, le formalisme « orienté-objet » (Muller, 1997) était bien adapté à la gestion des systèmes complexes tels que les plantes où des interactions multiples entre les organes ont lieu au cours du développement de la plante. Par sa généralité, il constituait un bon outil d'intégration et de discussion multi-disciplinaire.

En utilisant le formalisme « orienté-objet », les modèles GRAAL et GRAAL-CN sont constitués d'une structure générique à de nombreuses plantes (Fig. 13, objets en gras ; Drouet et Pagès, 2003, 2007, [A14], publication jointe, [A20]), représentant par des objets les différents niveaux d'organisation de la plante (réseau, axe, article, organe).

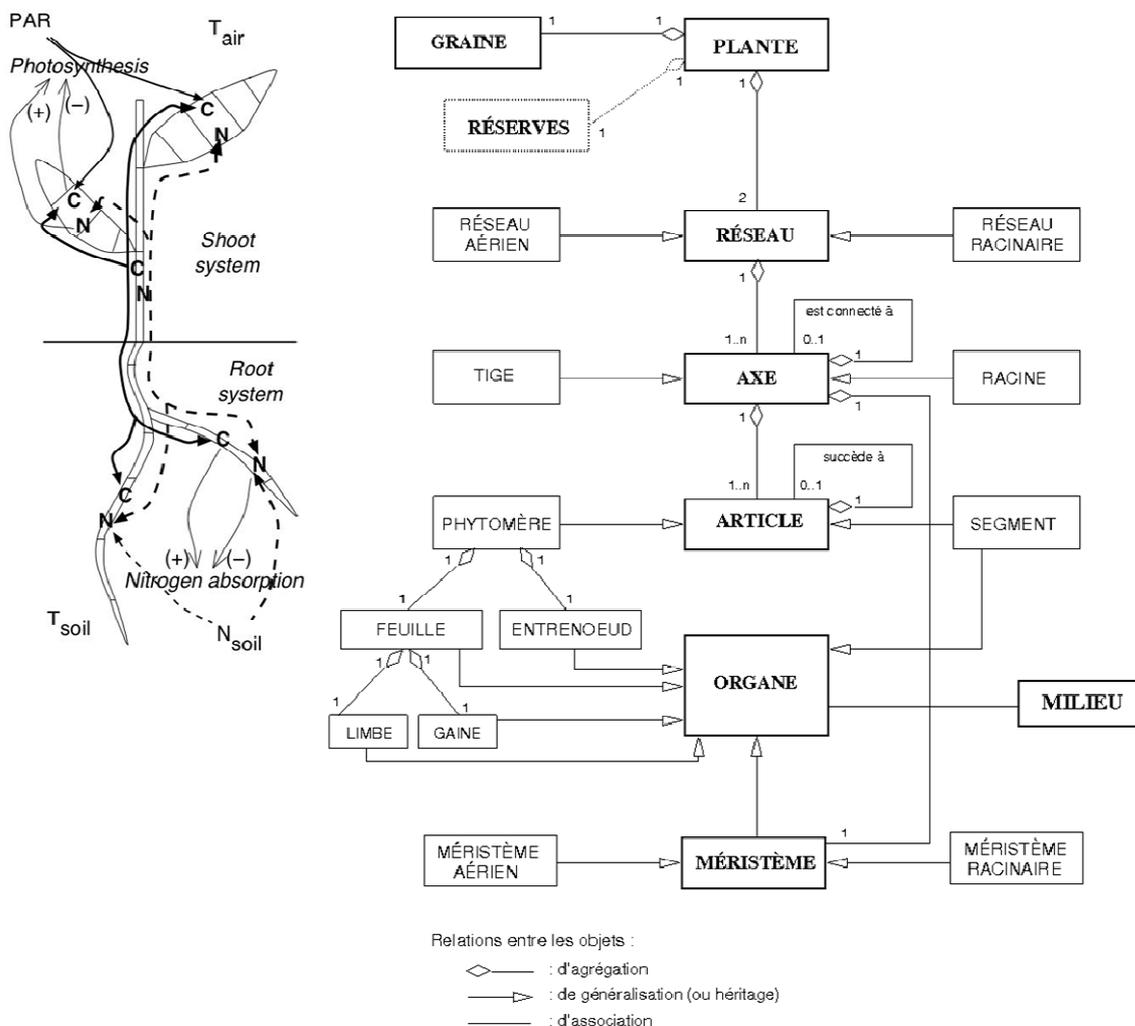


Fig. 13. Schéma conceptuel de l'acquisition et de la répartition des assimilats carbonés et azotés dans une plante. Représentation « orientée-objet » simplifiée du modèle architectural GRAAL (et GRAAL-CN) de croissance et de répartition des assimilats carbonés et azotés dans la plante entière de maïs (d'après Drouet et Pagès, 2003, 2007 [A14, A20]).

Des compartiments plus spécifiques, caractérisés par leurs propriétés locales, héritent des propriétés de ces compartiments généraux : les tiges et les racines sont deux catégories d'axes ayant des propriétés communes, de même pour les deux types d'articles que sont les phytomères et les segments racinaires. Le modèle permet ainsi de prendre en compte les propriétés locales de chacun des organes (son état e.g. sa masse de carbone, et des fonctions le faisant évoluer e.g. la photosynthèse) tout en conservant une structure globale simple et donc aisément modulable.

### II.3.3.2 Principaux résultats

Ces développements ont abouti aux modèles GRAAL (et GRAAL-CN) permettant de simuler et d'analyser les interactions entre morphogénèse et répartition des assimilats carbonés (et azotés) dans le cas de plantes de maïs en phase végétative (Fig. 14 ; Drouet et Pagès, 2003, [A20]). Plusieurs résultats originaux ont été mis en évidence à partir de ces modèles : i) les propriétés globales de la plante (rapports feuilles/tiges, aérien/racinaire) émergent des propriétés locales des organes et des processus de croissance, ii) les priorités successives entre les organes résultent de la combinaison entre un schéma de répartition au prorata des demandes et l'état de développement des organes (déterminant leur demande de croissance potentielle), iii) les masses surfacique et volumique des organes (variables d'entrée clés dans les modèles de fonctionnement des cultures) apparaissent comme des variables de sortie résultant de l'association des processus de croissance en taille (Pagès et al., 2004, [A18]) et de croissance en masse des organes (Drouet et al., 2005, [A16]), iv) le compartiment global « réserves », classiquement utilisé dans les modèles bien que ne correspondant à aucune réalité physiologique, disparaît et chaque organe devient un compartiment de réserves potentiel.

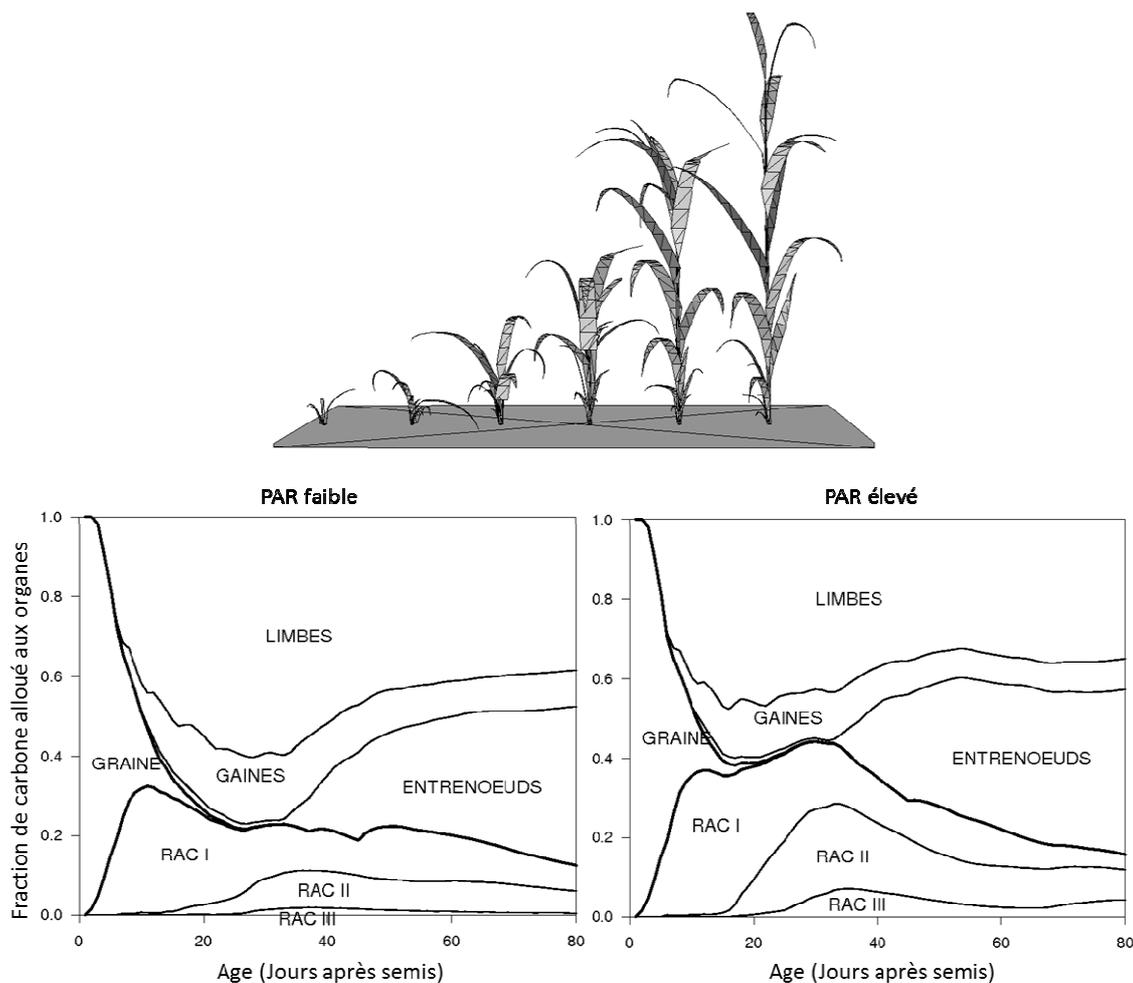


Fig. 14. Sorties du modèle GRAAL : en haut, simulation de la morphogénèse (exemple des organes aériens) ; en bas, simulation de la répartition de carbone entre organes dans deux conditions de Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR) (d'après Drouet et Pagès, 2003, [A20]).

Les modèles GRAAL et GRAAL-CN se sont avérés être des outils pertinents pour hiérarchiser, dans une perspective « plante entière », les fonctions élémentaires du développement et quantifier leur variabilité (liée au génotype) en relation avec les conditions environnementales (disponibilité en carbone et azote). Toutefois, la mise en place des organes (au moins aériens) du maïs est peu sensible à la nutrition azotée, d'où l'intérêt de caractériser le rôle de l'azote, sur une plante sensible, le colza, autre plante modèle de l'équipe Plante. Le colza est en effet une culture très sensible aux carences de nutrition azotée ; il est connu pour absorber des quantités d'azote largement supérieures à d'autres cultures, quand celui-ci est disponible. Cette caractéristique en fait une culture potentiellement épuratrice de l'excédent nitrique du sol. Cependant, l'azote absorbé n'est pas forcément valorisé par la culture en terme de rendement ni de qualité protéique des graines, en raison de l'abscission précoce des feuilles dont la teneur en azote peut rester élevée. En outre, le tourteau de colza est encore considéré comme un sous-produit de la production d'huile bien qu'il représente un produit de substitution potentiel au tourteau de soja américain.

Au début des années 2000, les objectifs des travaux développés sur le colza dans l'équipe Plante étaient i) d'identifier, quantifier et hiérarchiser les processus de croissance et de développement à l'origine des différences variétales en termes de gestion de l'azote chez le colza, ii) d'intégrer les processus dans deux types de modèles : le modèle architectural GRAAL-CN en l'adaptant au colza et le modèle de cultures CERES existant déjà pour le colza, iii) construire, à partir des résultats obtenus, une grille d'interprétation du comportement variétal à l'usage des améliorateurs pour la sélection de nouvelles variétés et la création variétale (e.g. idéotypes). J'ai contribué à ces travaux de 2002 à 2004 avant mon évolution thématique en 2004 (Savin et al., 2004, [C62] ; Drouet et al., 2004, [C59] ; Jullien et al., 2004, [C55]).

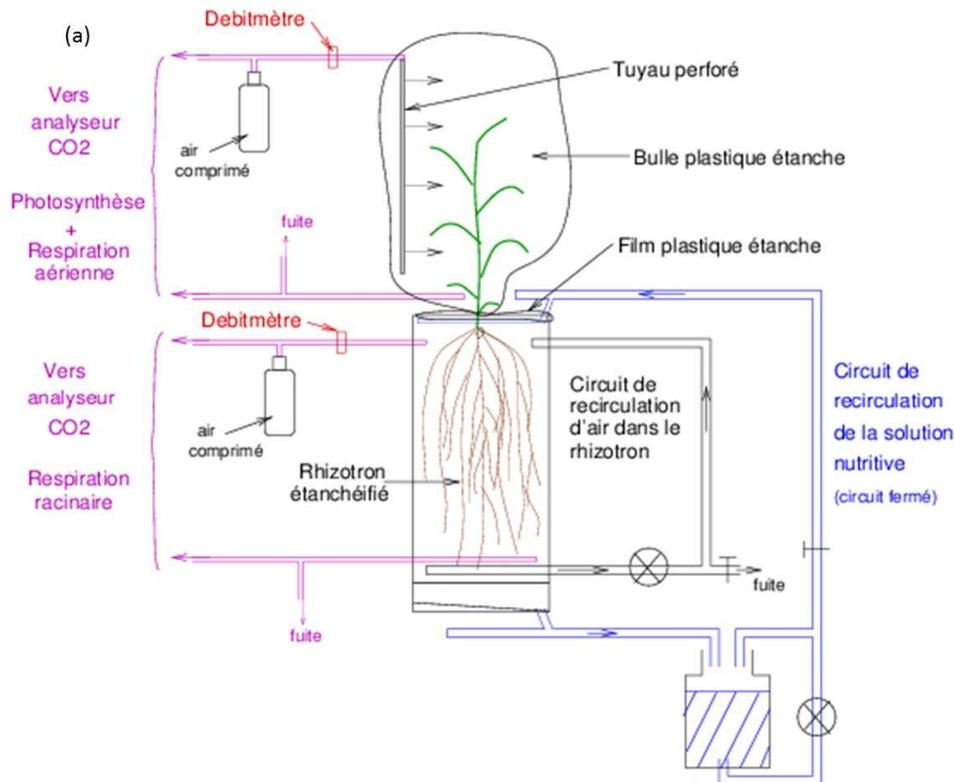
### II.3.3.3 Apports de l'expérimentation

Parallèlement à l'élaboration du modèle, j'ai mis en place des expérimentations en chambre de culture sur maïs à Avignon puis sur colza à Grignon. Elles avaient pour but de caractériser les dynamiques de croissance et de répartition des assimilats carbonés dans les organes aériens et racinaires, caler les paramètres du modèle pour lesquels les valeurs ne sont pas disponibles dans la bibliographie, et également de vérifier les sorties du modèle, pour ces deux plantes contrastées en termes de cycle de développement, de structures aérienne et racinaire, de fonctionnement vis-à-vis de l'azote (e.g. remobilisation de l'azote foliaire) (Drouet et al., 2005, [A16]).

L'expérimentation menée sur maïs à Avignon en 2000 comportait deux modalités afin de faire varier l'offre en assimilats carbonés : des plantes sans ombrage et des plantes avec ombrage. Des mesures de croissance (forme et taille) des organes aériens et souterrains ont été effectuées sur 12 plantes de maïs placées en rhizotron sur solution nutritive (Fig. 15) et considérées comme isolées. Des analyses chimiques ont permis d'évaluer les teneurs en carbone et azote total, en sucres solubles et en amidon. Dans la continuité de mes activités précédentes sur la masse surfacique et les teneurs en azote surfacique et massique des feuilles mesurées au champ, cette expérimentation en conditions contrôlées a montré que la masse surfacique foliaire et la masse volumique racinaire varient fortement au cours du développement végétatif, sans mettre en évidence de relation claire entre ces variables et l'âge ou le type de l'organe (Drouet et al., 2005, [A16]). Un dispositif a été mis au point pour mesurer la photosynthèse nette des parties aériennes ainsi que la respiration aérienne à l'obscurité et la respiration racinaire (Fig. 15). Les résultats n'ont pas pu être exploités compte tenu des faibles flux mesurés et des fortes incertitudes liées en partie à la non-étanchéité du dispositif.

Avec une approche similaire, j'ai mené en 2003 une série d'expérimentations en conditions contrôlées et pour quatre traitements croisant deux niveaux de nutrition azotée et deux niveaux de nutrition carbonée (i.e. rayonnement). Leur objectif était de suivre la mise en place des systèmes aériens et racinaires du colza en phase végétative à partir d'une approche architecturale, inexistante dans la bibliographie pour la plante entière de colza. Des mesures de croissance des organes aériens et racinaires souterrains ont été effectuées sur 11 plantes de colza par traitement, placées en rhizotron sur solution nutritive. Des analyses chimiques ont permis d'évaluer les teneurs en carbone et azote total, en sucres solubles, amidon et nitrates et acides aminés.

En parallèle, en 2003-2004, j'ai contribué à une expérimentation au champ croisant trois génotypes contrastés et deux niveaux de nutrition azotée. Cette expérimentation incluait des mesures sur « plante moyenne », ainsi que sur « plante architecturée », complémentaires de celles effectuées en chambre de culture. Cette complémentarité avait pour but de fournir des indications sur les régulations du développement lors du passage de la plante isolée au peuplement et aussi lors du passage des conditions contrôlées au champ. La confrontation des deux approches de modélisation, classiquement dissociées (architecture vs. plante moyenne), avait pour objectif d'apporter des éclairages différents sur un objectif commun, avec des sorties vers les partenaires du développement agricole et les sélectionneurs.



Dispositif expérimental en chambre de culture

Croissance d'une plante de maïs en rhizotron

Suivi quotidien de l'élongation racinaire



Fig. 15. En haut, dispositif expérimental en chambre de culture et en rhizotrons pour le suivi de la croissance des organes aériens et souterrains de plantes de maïs et pour la mesure de leur photosynthèse et de leur respiration aérienne et racinaire. En bas, photographies du dispositif et du suivi de croissance, chaque couleur représentant l'élongation racinaire journalière.

### II.3.3.4 Autres applications, collaborations, transferts de connaissances

En outre, j'ai mené, au sein de l'équipe Plante, plusieurs activités s'insérant dans la problématique environnementale de l'UMR EGC et dans le cadre général de l'analyse des interactions génotype  $\times$  environnement, avec des partenariats extérieurs variés. Il s'agissait de i) la co-construction d'un projet d'équipe sur le colza (Fig. 16), dans lequel j'ai notamment apporté ma vision intégrée du fonctionnement de la plante, en parallèle d'un projet d'équipe sur *Arabidopsis* bénéficiant des apports de la génomique et de la physiologie végétale (collaboration NAP Versailles, BPMP Montpellier), ii) la co-construction, en collaboration avec l'équipe EVA Caen, du projet PROMOSOL-INRA avec des partenaires de la sélection variétale (AMSOL), du développement agricole et des instituts techniques (CETIOM), iii) l'établissement de liens avec l'enseignement (CEREOPA, INA-PG).

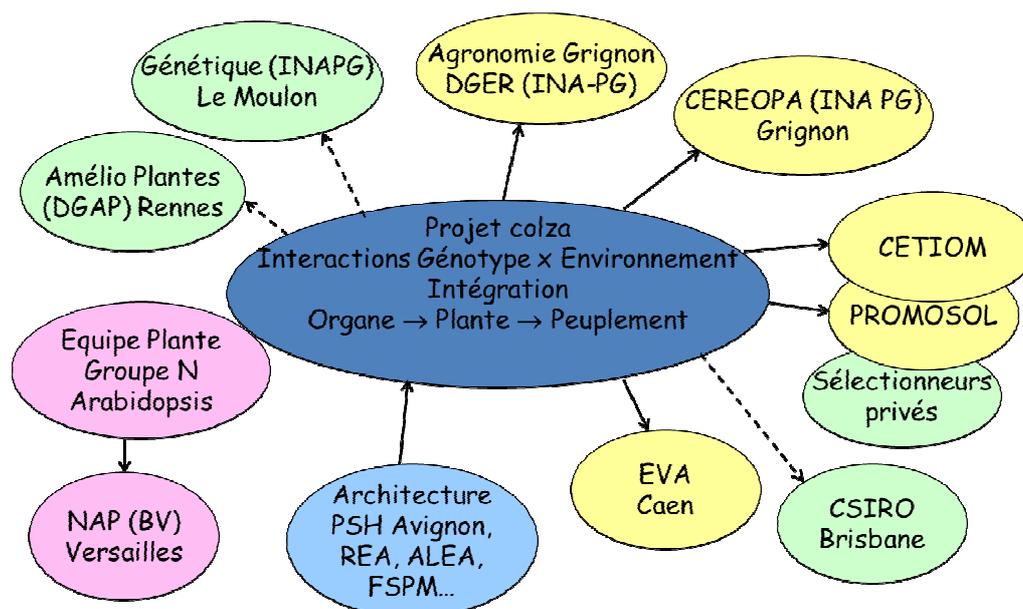


Fig. 16. Contexte du projet « colza » de l'équipe Plante en 2004 : apports méthodologiques sur le fonctionnement architectural des plantes (en bleu), interactions avec le projet « Arabidopsis » de l'équipe Plante en relation avec des équipes de physiologie végétale (en magenta), collaborations effectives avec les partenaires de la recherche et ceux du développement agricole sur le colza (en jaune) et collaborations en projet (en vert)<sup>25</sup>.

### II.3.4 Que m'ont apporté ces activités de recherche ?

A mon arrivée à l'INRA en 1994 dans l'Unité de Bioclimatologie à Grignon, l'approche architecturale du fonctionnement des plantes commençait à se développer dans l'Unité. En m'insérant dans cette nouvelle thématique à Grignon puis dans le contexte de l'Unité ECHO de l'INRA d'Avignon, mes activités ont été multiples entre questionnements, acquisition des connaissances, expérimentation, modélisation, programmation informatique et communication des résultats et des connaissances, m'amenant à établir plusieurs collaborations aux échelles nationale et internationale. J'ai encadré du personnel technique, plusieurs stagiaires et un doctorant sur une partie de sa thèse. La complémentarité des expériences grignonnaise et avignonnaise m'a permis d'acquérir la double

<sup>25</sup> REA : Réseau Ecophysiologique de l'Arbre ; NAP : Laboratoire de Nutrition Azotée des Plantes, Versailles ; BPMP : UMR Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes, Montpellier ; ALEA : plateforme de modélisation des plantes ; FSPM : Functional-Structural Plant Models ; DGAP : Département INRA de Génétique et d'Amélioration des plantes ; EVA : UMR Ecophysiologie Végétale et Agronomie, Caen ; CEREOPA : Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales, Grignon ; PROMOSOL : Association pour la PROMotion des recherches Sur les Oléagineux ; CSIRO : The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australie.

compétence de l'écophysiologiste, sur le fonctionnement physiologique des plantes et la prise en compte de l'environnement physique. J'ai adopté une démarche intégratrice et multi-disciplinaire nécessaire pour comprendre les systèmes complexes que sont les plantes et les peuplements végétaux. Cette démarche a été formalisée dans des modèles associant la structure et le fonctionnement des plantes et des peuplements.

Toutefois, les objectifs des travaux que j'ai menés pendant cette période se sont éloignés du contexte agricole, économique et social, ainsi que de mes choix thématiques initiaux. Le contexte était de mieux connaître le fonctionnement de la plante, afin de contribuer aux recherches visant à fournir aux disciplines situées en aval de nouvelles pistes de gestion des agro-écosystèmes (e.g. amélioration des techniques culturales dont une meilleure gestion des intrants, définition d'idéotypes et recherche de variétés mieux adaptées à leur environnement). De plus, la restructuration de l'UMR EGC m'a amené à exercer mes activités dans l'équipe Plante où les choix d'orientation thématique ont conduit à développer des liens de plus en plus forts avec des disciplines (physiologie végétale, génomique, amélioration des plantes, génétique) prenant en compte des échelles trop fines par rapport à mes choix initiaux. En travaillant sur les processus internes à la plante, j'ai perdu de vue les applications concrètes de mes travaux pour l'agriculture, le développement régional et agricole, la gestion de l'espace, l'aménagement du territoire, les problématiques agro-environnementales (Drouet, 2004, [F10]).

La volonté de me rapprocher de telles sorties plus appliquées m'a donné l'opportunité d'évoluer vers des échelles plus larges (exploitation agricole, paysage, région, pays, Europe) que celles de l'écophysiologie fine et d'être en relation avec des équipes travaillant à ces échelles (e.g. organismes ou instituts de recherche nationaux et européens traitant des problématiques agro-environnementales, organismes de développement agricole et régional). Cette volonté s'est traduite par une évolution contextuelle et thématique forte, tout en restant un chercheur. Les activités de recherche que j'ai menées jusqu'à mon évolution m'ont permis d'acquérir les compétences nécessaires à la prise en charge de mon nouveau projet de recherche sur la cascade de l'azote aux échelles supra-parcellaires, notamment dans les paysages agricoles : bibliographie, questionnements scientifiques, démarches intégratrices et multi-disciplinaires, modélisation des fonctions des paysages en interaction avec leurs structures, mise en place d'expérimentations et acquisition des données, test d'hypothèses et évaluation de scénarios, traitement et interprétation des résultats obtenus, communications diverses, encadrements divers.

## II.4 Cascade de l'azote aux échelles supra-parcellaires : exploitations agricoles, paysages<sup>26</sup> et territoires plus vastes<sup>27</sup>

Le contexte général de mes travaux sur la cascade de l'azote dans les territoires est le même que celui de mes travaux sur le fonctionnement des plantes et des peuplements : maintenir une agriculture à la fois compétitive et respectueuse de l'environnement. Toutefois, les objectifs scientifiques, les questions de recherche, les échelles spatiales et temporelles et par conséquent les réseaux scientifiques sont différents.

### II.4.1 Contexte politique, socio-économique et agro-environnemental

#### II.4.1.1 De nouveaux enjeux pour la gestion de l'azote aux échelles supra-parcellaires

L'un des enjeux agro-environnementaux et socio-économiques de l'agriculture est de maintenir la production agricole tout en limitant le recours aux intrants azotés, remettant ainsi en cause les systèmes de production mis en place dans les décennies précédentes. En effet, avec l'augmentation de la population mondiale depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, la fixation symbiotique d'azote atmosphérique (N<sub>2</sub>) n'était et n'est toujours pas suffisante pour assurer l'augmentation de la production agricole et la diversité alimentaire. La mise au point au début du XX<sup>ème</sup> siècle du processus Haber-Bosch permettant de produire de l'azote réactif<sup>28</sup> (N<sub>r</sub>) ammoniacal à partir du diazote atmosphérique (N<sub>2</sub>), puis son développement à l'échelle industrielle dans la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle ont permis d'accroître fortement la production végétale. La production industrielle d'azote réactif en Europe en 2008 atteignait près de 34 millions de tonnes, dont près de 75% étaient destinés aux fertilisants.

L'entrée de fortes quantités d'azote dans les agro-écosystèmes alimente une cascade<sup>29</sup> de processus générant des pertes d'azote vers l'environnement et des transformations à chaque étape de la cascade (Galloway et al., 2003 ; Fig. 17). Les coûts globaux de ces pertes d'azote en Europe sont estimés entre 70 et 320 millions d'euros par an et dépasseraient ainsi les bénéfices économiques directs de l'utilisation d'azote en agriculture (Sutton et al., 2011). Les impacts environnementaux et sociétaux des pertes d'azote réactif sont nombreux : dégradation de la qualité de l'air, de l'eau et des

---

<sup>26</sup> La **notion de paysage** peut revêtir un grand nombre de définitions selon les disciplines. Il s'agit ici d'un **'petit' territoire de quelques km<sup>2</sup> à quelques dizaines de km<sup>2</sup>**, typiquement de la taille d'un petit bassin versant, comportant quelques (ou quelques dizaines) d'exploitations agricoles, et au sein duquel des puits et des sources d'azote d'intensités variables interagissent spatialement et temporellement en fonction des conditions pédo-climatiques et des activités anthropiques. Cette définition résulte de discussions collectives.

<sup>27</sup> La notion de **territoire plus vaste que le paysage** fait référence ici à un **'grand' territoire de quelques centaines à milliers de km<sup>2</sup>**. Dans la suite du document, les notions de paysage ou de 'petit' territoire seront équivalentes, de même que les notions de 'grand' territoire ou de territoire plus vaste ; le terme 'territoire' englobera ces deux échelles.

<sup>28</sup> L'**azote réactif** (N<sub>r</sub>) regroupe toutes les formes azotées biologiquement, chimiquement ou radiativement actives dans l'atmosphère et la biosphère terrestre et aquatique. L'azote réactif inclut donc les formes de l'azote réduites (par exemple l'ammoniac [NH<sub>3</sub>] et l'ammonium [NH<sub>4</sub><sup>+</sup>]) ou oxydées (par exemple les oxydes d'azote [NO<sub>x</sub>], l'acide nitrique [HNO<sub>3</sub>] et l'acide nitreux [HONO], le protoxyde d'azote [N<sub>2</sub>O], le nitrate [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>], les nitrites [NO<sub>2</sub><sup>-</sup>]) et les formes organiques de l'azote (par exemple l'azote organique dissous [DON], l'urée, les amines, les protéines et les acides nucléiques).

<sup>29</sup> La **cascade de l'azote** est définie ici comme le cheminement de l'azote réactif (N<sub>r</sub>), initialement introduit dans un territoire par des processus naturels (fixation chimique, symbiotique ou non symbiotique d'azote atmosphérique) ou par l'action de l'homme (production industrielle d'engrais de synthèse ou importation d'aliments), et transféré ensuite à travers les différents compartiments de la pédosphère, de la biosphère, de l'hydrosphère et de l'atmosphère, avant qu'il ne rejoigne le réservoir inerte de diazote atmosphérique. La notion de cascade sous-entend un système ouvert avec une(des) entrée(s) d'azote et une(des) sortie(s) d'azote du système, contrairement à la notion de cycle qui sous-entend un système fermé ne permettant pas de prendre en compte de manière explicite les pertes d'azote dans l'environnement.

sols, acidification des écosystèmes et impact sur la biodiversité suite aux dépôts d'azote réactif, altération des sols et des bilans de CO<sub>2</sub>, pollution nitrique des milieux aquatiques et des zones littorales entraînant notamment l'eutrophisation des écosystèmes (exemple des algues vertes), réchauffement climatique avec l'émission de gaz à effet de serre tels que le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), émission d'oxydes d'azote précurseurs d'ozone, effets sanitaires en particulier sur la santé humaine.

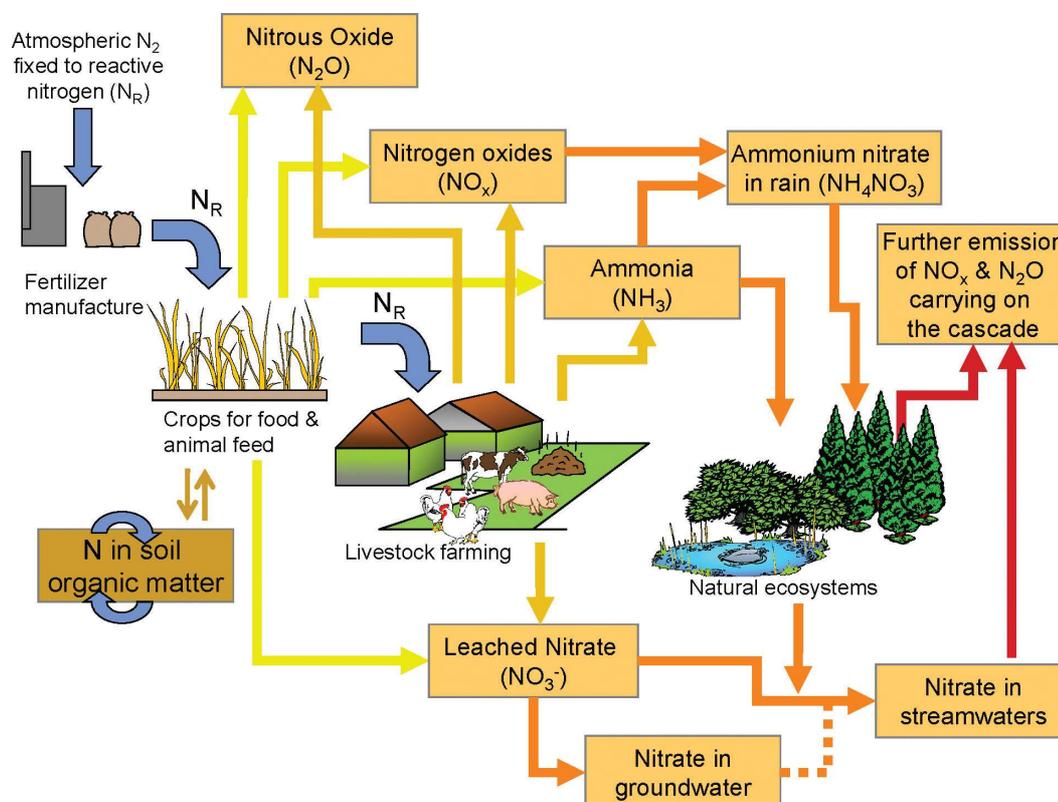


Fig. 17. Schéma simplifié de la cascade de l'azote (d'après Sutton et al., 2011).

En France, l'agriculture et la sylviculture contribuent significativement aux pertes d'azote dans l'environnement. Elles représentent 97% des émissions d'ammoniac avec une contribution très majoritaire de l'élevage (73% provenant des bâtiments et des aires de stockage et d'épandage des effluents), 10% des émissions d'oxydes d'azote, 89% des émissions de N<sub>2</sub>O (CITEPA, 2013) et plus de 60% des émissions de nitrate. Les émissions indirectes<sup>30</sup> de N<sub>2</sub>O peuvent représenter jusqu'à 40% des émissions totales de N<sub>2</sub>O. Les pertes d'azote dans l'environnement résultent d'interactions spatiales entre les éléments du paysage, d'une part des transferts par voie atmosphérique et des dépôts d'ammoniac en aval des zones d'apport d'engrais et de volatilisation et, d'autre part, des transferts par voie hydrologique et des transformations d'azote nitrique en aval des zones d'apport suite à la lixiviation. Les actions locales, à l'échelle de la parcelle ou du bâtiment, ne permettront donc pas de maîtriser tous les impacts des pertes d'azote. Des leviers doivent être désormais recherchés à des échelles plus larges, supra-parcellaires, correspondant aux échelles d'évaluation des impacts. Ceci nécessite d'intégrer les flux d'azote dans l'ensemble des compartiments des territoires (biosphère, atmosphère, hydro-pédosphère, anthroposphère i.e. exploitations agricoles), de considérer l'azote sous toutes ses formes et d'avoir ainsi une vision globale des transferts et des transformations

<sup>30</sup> Les **émissions indirectes** correspondent ici aux émissions d'azote au niveau de zones situées en aval de parcelles fertilisées ou de bâtiments d'élevage, suite à des transferts latéraux d'azote par voie atmosphérique ou hydrologique et dépôt d'azote (en particulier l'ammoniac par voie atmosphérique et le nitrate par voie hydrologique). Les émissions indirectes sont particulièrement remarquables pour les écosystèmes semi-naturels (forêts, prairies extensives, zones humides, aires de captage protégées) qui sont peu ou pas fertilisés directement. Elles se distinguent des émissions indirectes se produisant en amont des exploitations agricoles et qui sont liées à la production et aux transports des fertilisants.

d'azote. L'identification de leviers à des échelles supra-parcellaires implique notamment de mieux connaître les processus impliqués dans la cascade de l'azote, de quantifier les flux et les pertes d'azote dans l'environnement, en particulier les émissions indirectes résultant d'interactions spatiales complexes, puis d'évaluer des scénarios agro-environnementaux de gestion de l'azote dans les territoires. La finalité de ces recherches est de contribuer à la définition de stratégies d'atténuation des pertes d'azote et d'adaptation des systèmes de production à l'échelle des paysages et des territoires, complémentaires des approches classiques aux échelles de la parcelle, du bâtiment d'élevage, du troupeau ou de l'exploitation agricole.

#### **II.4.1.2 Nécessité d'approches plus intégrées pour estimer les pertes d'azote dans l'environnement**

Les estimations des flux, bilans et pertes d'azote à l'échelle d'un territoire de quelques km<sup>2</sup> ou d'un pays se sont initialement basées sur la notion de facteur d'émission (e.g. Mosier et al., 1998 ; EEA/EMEP Guidebook, 2009 ; Gac et al., 2007 et Peyraud et al., 2012 pour la France). Ces méthodes évaluent localement les émissions à l'échelle de la parcelle agricole (lieu d'apport des intrants azotés), ainsi qu'à celle du bâtiment d'élevage (aires de stabulation, aires de stockage des effluents). La seule source de variation des émissions est la quantité d'azote apportée aux cultures (sous forme d'engrais, de fumier, d'effluents) ou le nombre d'animaux ; les caractéristiques du milieu (sol, végétation, climat, mosaïque paysagère) sont peu ou pas prises en compte. L'intégration spatiale de ces émissions sur des zones de taille importante (région, pays, continent) est réalisée par simple agrégation des émissions des différentes unités de production (e.g. parcelles, bâtiments), sans prendre en compte la cohérence de la gestion de l'azote à l'échelle de l'exploitation ou du paysage, ni les interactions entre unités spatiales à l'origine des émissions indirectes d'azote qui peuvent représenter jusqu'à 40% des émissions totales dans le cas du N<sub>2</sub>O. Toutefois, ces estimations sont produites à partir des méthodes classiques d'inventaire qui, en faisant l'hypothèse d'une réponse moyenne à une application moyenne d'azote dans le paysage, peuvent générer des biais et des incertitudes fortes sur les flux et les pertes d'azote. Pour améliorer la fiabilité des estimations des émissions d'azote et mieux évaluer la pertinence de mesures agro-environnementales ou de modifications des systèmes de production, il est donc nécessaire de prendre en compte les interactions spatiales au sein et entre les grands compartiments des paysages (exploitations agricoles, agrosystèmes, écosystèmes semi-naturels, hydro-pédosphère, atmosphère). En particulier dans les systèmes de polyculture-élevage, les sources d'azote (e.g. champs cultivés, prairies temporaires, bâtiments d'élevage, aires de stockage des effluents) et les puits d'azote (e.g. forêts, prairies permanentes, zones humides) peuvent être spatialement très hétérogènes, en localisation, en intensité et en nature, à l'échelle de paysages de quelques km<sup>2</sup> seulement. Cette hétérogénéité peut induire, par le biais de divers processus, des transferts latéraux significatifs d'azote par voies naturelle (atmosphérique et hydrologique dépendant des conditions pédo-climatiques) et anthropique (gestion de l'azote par les agriculteurs intra- et inter-exploitations agricoles) entre les différents éléments du paysage (Cellier et al., 2011, [B1]) et ainsi induire des émissions indirectes non négligeables. Les échelles du paysage et de l'exploitation agricole ou d'un ensemble d'exploitations sont donc particulièrement pertinentes pour évaluer les flux, bilans et pertes d'azote, dont les émissions indirectes. La prise en compte explicite des interactions spatiales aux échelles supra-parcellaires permettra d'identifier de nouveaux leviers d'atténuation des pertes d'azote et d'adaptation des systèmes de production, complémentaires de ceux déjà mis en œuvre aux échelles de la parcelle (e.g. doses, dates et formes des apports azotés) et du bâtiment d'élevage (e.g. gestion des effluents). Ces leviers consisteront notamment à moduler les entrées d'azote dans les agro-écosystèmes (e.g. gestion des apports d'azote par les agriculteurs dans leurs exploitations, échanges de produits azotés entre exploitations, application des décisions de la Politique Agricole Commune), ainsi qu'à modifier les structures des mosaïques paysagères (e.g. application des directives environnementales, des choix politiques des collectivités territoriales) pour réduire les pertes d'azote dans l'environnement.

Compte tenu du grand nombre et de la complexité des processus et des interactions intervenant entre les différents éléments des paysages et des exploitations, les approches d'intégration et de modélisation sont incontournables, en complément des inventaires et des

expérimentations qui ne peuvent pas être exhaustifs en raison notamment de leurs coûts. De nombreux modèles ont été développés ces dernières années pour simuler les flux d'azote dans les territoires. Toutefois, tous les compartiments du territoire ne sont pas représentés au même niveau, ni de manière homogène, en termes de cohérence des processus et de résolutions spatiale et temporelle. Ceci résulte notamment des choix politiques qui ont été mis en œuvre de manière relativement disjointe, en distinguant les formes d'azote, les milieux et les compartiments (directives sur la qualité de l'air, le nitrate, les habitats, protocole de Göteborg...). Ces choix ont été fortement dépendants des contextes agro-environnementaux des pays dans lesquels ils ont été mis en œuvre. Par exemple, en France, la plupart des travaux se sont focalisés sur le compartiment hydrologique, en simulant les flux d'azote dans des bassins versants de petite taille (e.g. Beaujouan et al., 2001) ou à des échelles plus larges (e.g. Billen et Garnier, 2000), avec une finalité de réduction des pollutions par le nitrate. D'autres travaux de modélisation ont également tenté d'intégrer l'ensemble des compartiments du paysage, mais, de même, ils se sont focalisés sur un ou deux compartiments, les autres étant décrits de manière beaucoup moins détaillée. Par exemple, au Royaume-Uni, Dragosits et al. (2006) se sont orientés vers les transferts atmosphériques pour évaluer les émissions, transferts et dépôts d'ammoniac dans les territoires sur de courtes distances. Au Danemark qui se caractérise par de fortes densités d'élevage, Hutchings et al. (2004), par exemple, se sont focalisés sur les émissions et transferts d'origine anthropique dans les écosystèmes terrestres (bâtiments d'élevage, aires de stockage des effluents, cultures, prairies) pour évaluer les effets de la gestion de l'azote dans les exploitations sur la qualité de l'eau dans les zones de captage.

Jusqu'au milieu des années 2000, aucune étude n'avait donc permis de faire le lien entre ces modèles établis par compartiment et traitant de manière dissociée les voies de transferts correspondantes (atmosphérique, hydrologique, biophysique, anthropique), d'où la nécessité de développer des approches encore plus intégrées à l'échelle des paysages. Ce constat a été à l'origine d'une composante « paysage » dans le projet NITROEUROPE (FP6, 2006-2011) dont l'objectif général était de quantifier l'effet des composés azotés sur les bilans de GES depuis des échelles locales jusqu'à des échelles continentales. Cette composante « paysage » n'apparaissait pas dans les précédents projets européens (e.g. CARBOEUROPE, NOFRETETE, GREENGRASS) qui portaient essentiellement sur les composés carbonés pour lesquels l'étude des interactions spatiales entre éléments du paysage est peu justifiée en comparaison des composés azotés. Par ailleurs, l'échelle du paysage n'était pas abordée dans l'équipe Biosphère-Atmosphère dont les activités et les projets passés ou en cours concernaient d'une part des échelles locales allant jusqu'à la parcelle et d'autre part, des échelles régionales traitées soit par agrégation des approches parcellaires soit en collaboration avec des partenaires traitant des échelles régionales à continentales. Mon arrivée dans l'équipe Biosphère-Atmosphère a permis d'engager l'équipe dans cette thématique innovante et permettant de renforcer le positionnement de l'équipe et de l'INRA au niveau européen sur les problématiques agro-environnementales liées à l'azote.

#### **II.4.2 Objectifs, démarche, réseaux scientifiques et principaux résultats**

Dans ce contexte, les questions scientifiques sous-jacentes à mon activité de recherche sont i) la caractérisation des sources et des puits d'azote, ii) la quantification des flux, pertes et bilans d'azote dans l'environnement, iii) l'évaluation de la contribution relative des flux verticaux et latéraux d'azote en tenant compte des interactions spatiales entre les éléments du paysage, iv) l'évaluation des impacts environnementaux des facteurs naturels (climat, sol) et anthropiques (pratiques agricoles, ré-organisations du paysage) sur les flux, pertes et bilans d'azote. Une question scientifique particulièrement innovante consiste à mieux estimer les émissions indirectes d'azote à partir d'une description explicite du paysage, alors que les approches classiques utilisent des facteurs d'émissions établis empiriquement et comportent de fortes incertitudes. La finalité de mes recherches est de contribuer à la définition de stratégies d'atténuation des pertes d'azote et d'adaptation des systèmes de production aux échelles supra-parcellaires, complémentaires des approches classiques aux échelles de la parcelle ou de l'exploitation agricole.

Les échelles traitées ont été prioritairement celle du paysage, avec la prise en compte des transferts latéraux et des interactions spatiales entre les éléments du paysage (sources et puits d'azote), et aussi l'échelle de l'exploitation agricole, avec l'intégration des différentes composantes de l'exploitation (aires de stabulation, aires de stockage des effluents, cultures, prairies) pour simuler les bilans de GES d'exploitations de polyculture-élevage.

Mes recherches ont essentiellement mis en œuvre des approches de modélisation et j'ai aussi contribué à des expérimentations et à la collecte de données indispensables à l'évaluation des modèles, ainsi qu'à la construction et à l'évaluation de scénarios de gestion de l'azote dans les paysages et les territoires. Elles ont été principalement menées dans un premier temps dans le cadre de la composante « paysage » du projet NITROEUROPE (Fig. 18). Mes activités dans ce projet ont été diverses : i) implication dans la coordination des échanges entre partenaires nationaux et européens, ii) développement du modèle intégré NITROSCAPE intégrant les différentes voies de transferts et de transformations des composés azotés à l'échelle du paysage, iii) mise au point et conduite d'expérimentations au champ, iv) structuration et gestion de la base de données « paysage » du projet, v) définition et évaluation de scénarios relatifs aux pratiques agricoles et à la structure des mosaïques paysagères. Mes contributions principales ont porté sur le développement du modèle NITROSCAPE, avec le co-encadrement de la thèse de S. Duret, ainsi que sur la structuration et la gestion de la base de données « paysage » du projet, avec l'encadrement d'O. Maury (assistant-ingénieur recruté en 2007 dans l'équipe Biosphère-Atmosphère). Puis, dans un deuxième temps, j'ai poursuivi ces travaux dans le cadre des projets ECLAIRE (FP7, 2011-2015) et ANIMALCHANGE (FP7, 2011-2015), puis ESCAPADE (ANR, 2013-2017). J'ai aussi étendu mes recherches à l'évaluation des flux et pertes d'azote à l'échelle régionale en réalisant des emboîtements d'échelles depuis la parcelle jusqu'à la région en passant par les échelles de l'exploitation agricole et du paysage. Une question scientifique innovante consiste à rechercher des méthodes de changement d'échelle visant à utiliser les connaissances acquises à l'échelle du paysage pour des modélisations et quantifications des flux et pertes d'azote à l'échelle régionale. Depuis 2009, je me suis également impliqué davantage dans l'animation et les activités de l'équipe Biosphère-Atmosphère menées aux échelles supra-parcellaires (cf. § II.6.1).

#### **II.4.2.1 Mise en place d'un réseau de collaborations nationales et européennes**

Compte tenu du caractère innovant de la composante « paysage » du projet NITROEUROPE, avec la prise en compte explicite des interactions spatiales entre les sources et les puits d'azote, l'une des premières actions à partir de 2006 a consisté à développer et à coordonner avec P. Cellier un réseau de collaborations nationales et européennes (INRA SAS<sup>31</sup>, Rennes ; CEH, Edimbourg, Ecosse ; AU, Foulum, Danemark ; UPM, Madrid, Espagne ; ECN, Petten, Pays-Bas ; IMK-FZK, Garmisch-Partenkirchen, Allemagne ; RCAFÉ, Poznan, Pologne, CNR, Naples, Italie), en réunissant la diversité des compétences nécessaires à la réalisation du projet ([E8, E9, E12, E15, E17, F7]). Cette mise en commun des compétences portait sur i) les concepts relatifs aux processus et aux flux intégrés d'azote dans les paysages et issus de différentes disciplines, équipes, instituts et pays, ii) leur modélisation à partir de modèles développés avec leurs objectifs spécifiques, iii) la collecte des données que ce soit par des mesures des flux d'azote avec des méthodes et instrumentations spécifiques aux compartiments étudiés, des enquêtes sur les pratiques auprès des agriculteurs ou encore la collecte de données issues d'inventaires (e.g. cartes de sols, topographiques, images satellitaires). La collaboration avec plusieurs des partenaires décrits ci-dessus se poursuit dans le cadre du projet ECLAIRE.

---

<sup>31</sup> SAS : UMR Sols Agro hydrosystèmes Spatialisation ; CEH : Centre for Ecology and Hydrology ; AU : Aarhus University ; UPM : Université Polytechnique de Madrid ; ECN : Energy Research Centre of the Netherlands ; IMK-FZK : Institute of Meteorology and Climate Research - Atmospheric Environmental Research ; RCAFÉ : Research Centre of Agricultural and Forest Environment ; CNR : Centre National de la Recherche.

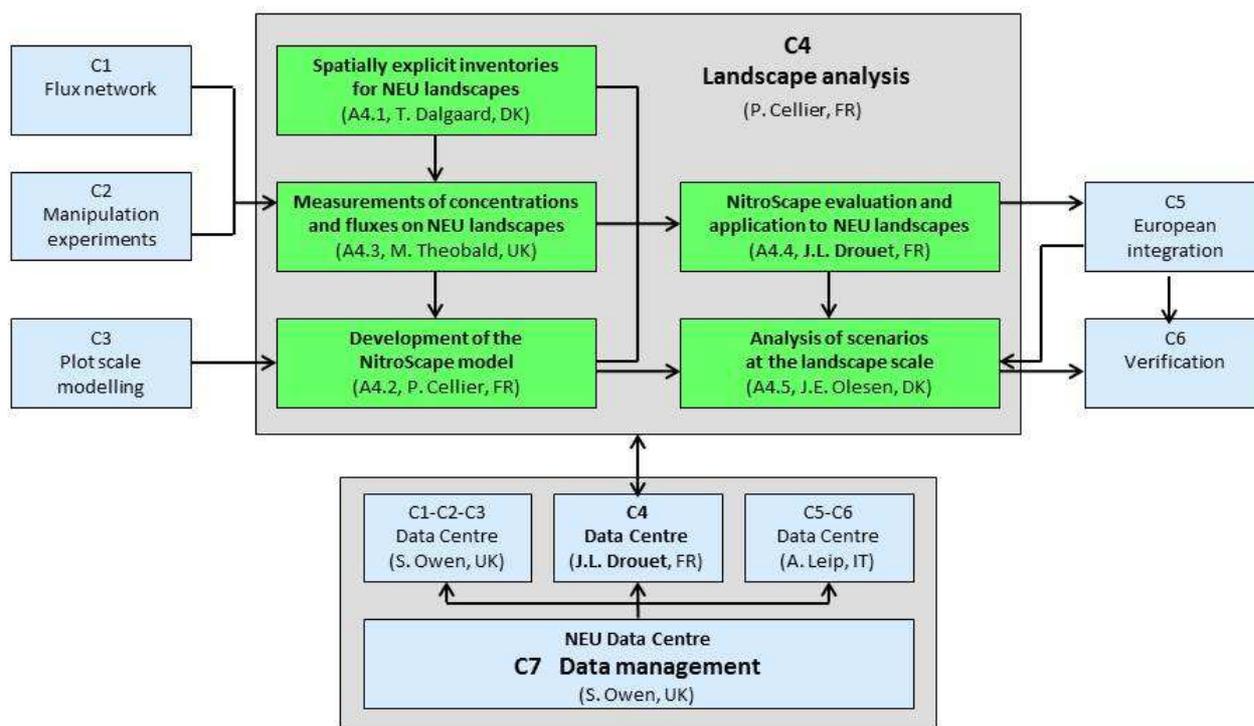


Fig. 18. Structure de la composante « paysage » (C4) du projet NITROEUROPE et liens avec les autres composantes du projet. Les activités auxquelles j'ai contribué sont indiquées en caractères gras.

Ces travaux m'ont conduit à m'impliquer en 2009 dans un groupe de réflexion du département Environnement et Agronomie de l'INRA sur l'opportunité de développer une plateforme de flux dans les paysages ([F6]). Ces activités se sont poursuivies de 2011 à 2013 par la participation à un groupe de travail inter-départements de l'INRA sur la mise en place d'une plateforme de modélisation des paysages ([F5]).

Au sein d'un paysage, l'exploitation agricole ou un ensemble d'exploitations, en interaction avec leur environnement biophysique, représente une échelle pertinente pour l'étude des processus azotés : c'est en effet à cette échelle qu'il est possible d'agir sur les émissions d'azote par la modulation des intrants azotés (répartition intra- et inter-parcelle des apports d'azote par l'agriculteur). Compte tenu de la pertinence de cette échelle et dans un même objectif de réduction des émissions d'azote liées aux activités agricoles, j'ai également mis en place en 2006 une collaboration avec des collègues de l'équipe Biosphère-Atmosphère et des partenaires nationaux (INRA UREP<sup>32</sup> et ENITA à Clermont-Ferrand, INRA ASTER à Mirecourt, INRA MIAJ à Jouy-en-Josas). Cette collaboration avait pour but d'évaluer l'intérêt de coupler le modèle d'exploitation agricole FARMSIM incluant le modèle de prairie PASIM, développés dans le cadre du projet européen GREENGRASS (2002-2004), avec le modèle de cultures CERES-EGC ([F8]). Elle se poursuit notamment dans le cadre du projet ANIMALCHANGE (FP7, 2011-2015).

<sup>32</sup> UREP : Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial ; ENITA : Ecole Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles ; ASTER : Agro-Systèmes Territoires Ressources ; MIAJ : Mathématiques et Informatique Appliquées de Jouy-en-Josas.

## II.4.2.2 Modélisation intégrée des transferts d'azote à différentes échelles supra-parcellaires

### A l'échelle de paysages ou petits territoires (de quelques km<sup>2</sup> à quelques dizaines de km<sup>2</sup>)

Dans le cadre du projet NITROEUROPE, je me suis également impliqué dans les choix de modélisation à effectuer pour développer le modèle NITROSCAPE de transferts et transformations d'azote à l'échelle du paysage agricole (Duret et al., 2008, [E13]). Avec les partenaires nationaux et européens, nous avons engagé une réflexion commune quant au choix des modèles de transfert par voie atmosphérique (développés à EGC, CEH et ECN), des modèles de transfert par voie hydrologique (développés à SAS et JLU, Giessen, Allemagne), des modèles d'agro-écosystèmes (développés à EGC (CERES-EGC) et IMK-FZK), des modèles d'exploitation agricole (développés à AU et UREP). Ces discussions ont abouti au choix d'un ou deux modèles pour chaque composante du modèle intégré NITROSCAPE (atmosphère, hydrosphère, agro-écosystème, exploitation agricole ; Fig. 19 ; Duret et al., 2011, [A11], publication jointe).

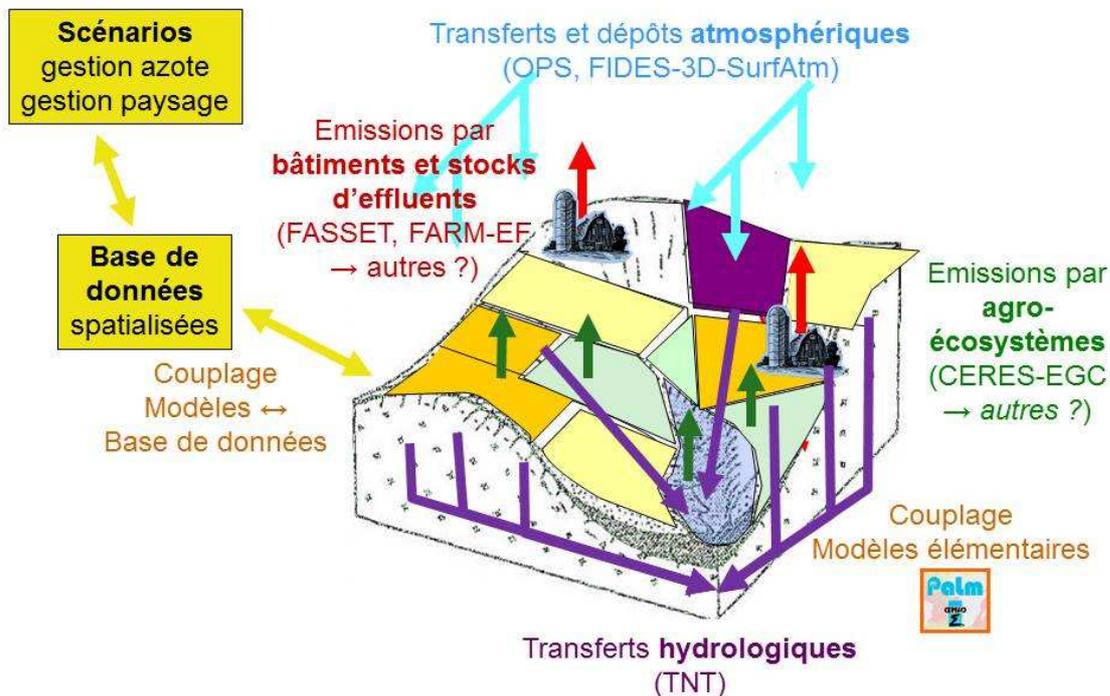


Fig. 19. Schéma conceptuel du modèle NITROSCAPE (d'après Duret et al., 2011, [A11]).

Les modalités de couplage entre les modèles, et aussi entre les modèles et les bases de données, ont été discutées avec le souci de la cohérence entre ces modèles en termes de concepts, d'échanges de variables d'entrées et de sorties entre modèles, d'échelles de temps et d'espace, de langages de programmation, d'interchangeabilité entre modèles composants ou modules, de possibilité de prise en compte de nouveaux processus et également en termes de convivialité pour les futurs utilisateurs.

Le développement du modèle NITROSCAPE a fait l'objet de la thèse de S. Duret (2007-2011, [G4]) dont j'étais l'encadrant principal, en collaboration avec P. Durand (SAS, Rennes) et P. Cellier (EGC, Grignon, directeur de thèse). Ce travail a permis d'aboutir à un modèle permettant de simuler et analyser les interactions spatiales et les flux et bilans d'azote dans les paysages (Duret et al., 2011, [A11], publication jointe). A partir du modèle NITROSCAPE, nous avons notamment montré et quantifié le rôle des transferts latéraux d'azote à courte distance par voies atmosphérique et hydrologique sur les flux et bilans d'azote dans un paysage théorique simplifié (Fig. 20 ; Drouet et al., 2012, [A9]). Ainsi, les simulations montrent que les émissions indirectes de N<sub>2</sub>O résultant des transferts latéraux représentent 21% des émissions totales de N<sub>2</sub>O à l'échelle de ce paysage théorique. Le modèle NITROSCAPE a été présenté comme « fait marquant » à l'INRA ([E2, E4, E5]).

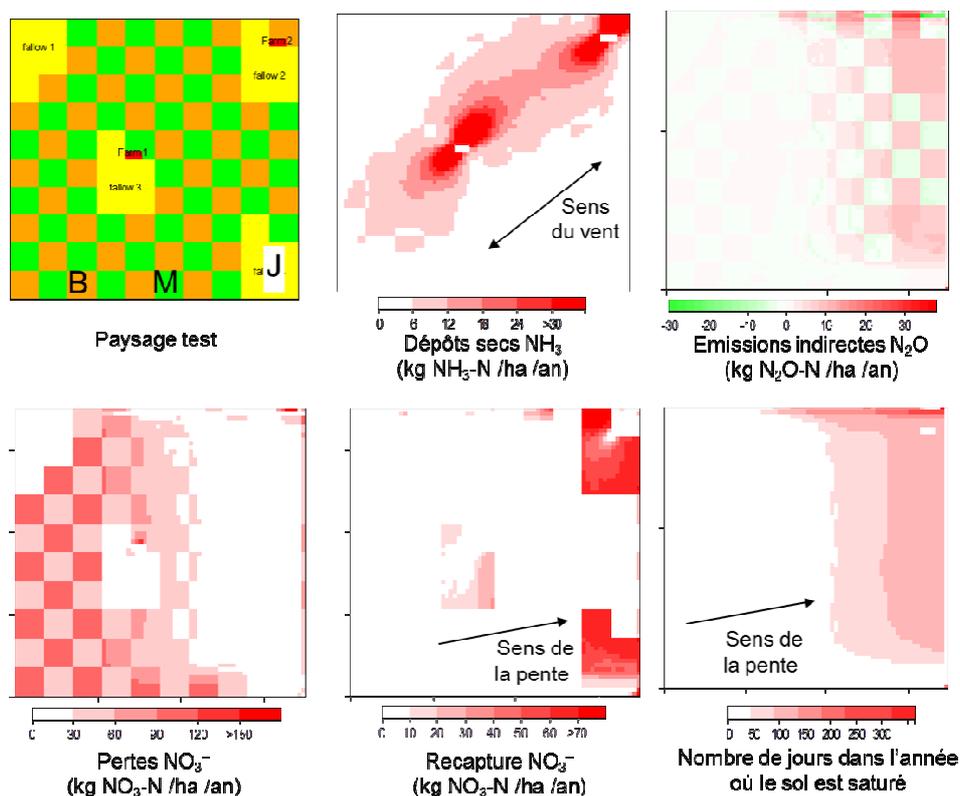
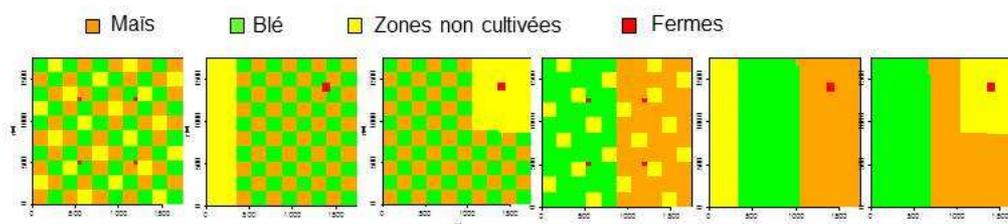


Fig. 20. Effet des transferts latéraux sur les flux et bilans d'azote dans un paysage agricole (d'après Duret et al., 2011, [A11] ; Drouet et al., 2012, [A9]) : Simulation des flux directs et indirects d'azote réactif ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) par le modèle NITROSCAPE dans un paysage test de 306 ha contenant des cultures de blé (B) et de maïs (M) fertilisées avec 240 kg N/ha, des zones non cultivées (J) et deux exploitations agricoles (chacune avec 200 truies et 4000 porcelets). Le paysage est représenté par un maillage régulier (70x70 mailles de 25 m de côté).

Nous avons également montré l'effet de la ré-organisation spatiale de la structure des paysages et de l'occupation des sols sur les flux et bilans d'azote pour le même paysage simplifié que précédemment (Fig. 21, Duret, 2011, [G4] ; Olesen et al., 2011, [C20] ; Drouet et al., 2014, [C5]).

a) Scénarios d'agencement des occupations du sol au sein d'un paysage agricole



b) Emissions de  $\text{N}_2\text{O}$  à l'échelle du paysage

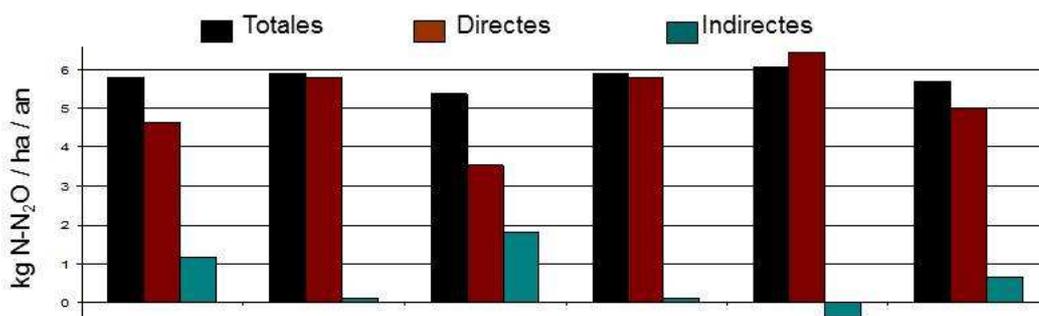


Fig. 21. Effet de la structure du paysage et de l'occupation des sols sur les flux et bilans d'azote (d'après Duret, 2011, [G4] ; Drouet et al., 2014, [C5]). Le paysage de référence est celui de la Fig. 20.

L'évaluation du modèle NITROSCAPE et son application aux paysages réels des projets NITROEUROPE et ESCAPADE sont en cours. Dans le cadre du projet NITROEUROPE, j'étais responsable (« Activity Leader ») d'une des cinq activités de la composante « paysage », celle traitant de l'application du modèle NITROSCAPE aux données des six sites européens (Fig. 18). Cette activité correspondait à la mise en commun des activités de modélisation et de traitement des données expérimentales et représentait donc une synthèse de l'ensemble des activités menées dans la composante « paysage » du projet. Avant d'envisager l'application de NITROSCAPE aux paysages réels, une longue phase de tests du modèle a été nécessaire afin de fiabiliser le code informatique et s'assurer de la cohérence du couplage et des résultats de simulation. Ces tests sont inhérents à toute démarche de modélisation, en particulier quand il s'agit de modèles couplés et intégrant de nombreux processus. Ils ont d'abord été menés sur le paysage test (Fig. 20), plus simple que les paysages réels. La première application de NITROSCAPE à des paysages réels a été menée sur le site français du projet NITROEUROPE i.e. le bassin versant de Kervidy-Naizin, situé en Bretagne et intégré à l'ORE AgrHys. Les premiers résultats montrent la capacité du modèle à simuler de manière réaliste et cohérente les flux d'azote dans les différents compartiments du paysage (Fig. 22). Dans le cadre du projet ESCAPADE, l'analyse et l'évaluation du modèle NITROSCAPE, ainsi que du modèle CASIMOD'N développé à l'UMR SAS à Rennes, seront menées par M. Lamboni ([G6], 2015), post-doctorant que je co-encadrerai avec P. Barbillon (AgroParisTech), H. Monod et M.L. Taupin (INRA MIAJ Jouy-en-Josas), et P. Durand. L'application de ces deux modèles aux sites expérimentaux du projet ESCAPADE est menée par C. Benhamou ([G7], 2014-2017), post-doctorant que je co-encadre avec P. Durand et les responsables des sites et qui utilisera les résultats de M. Lamboni.

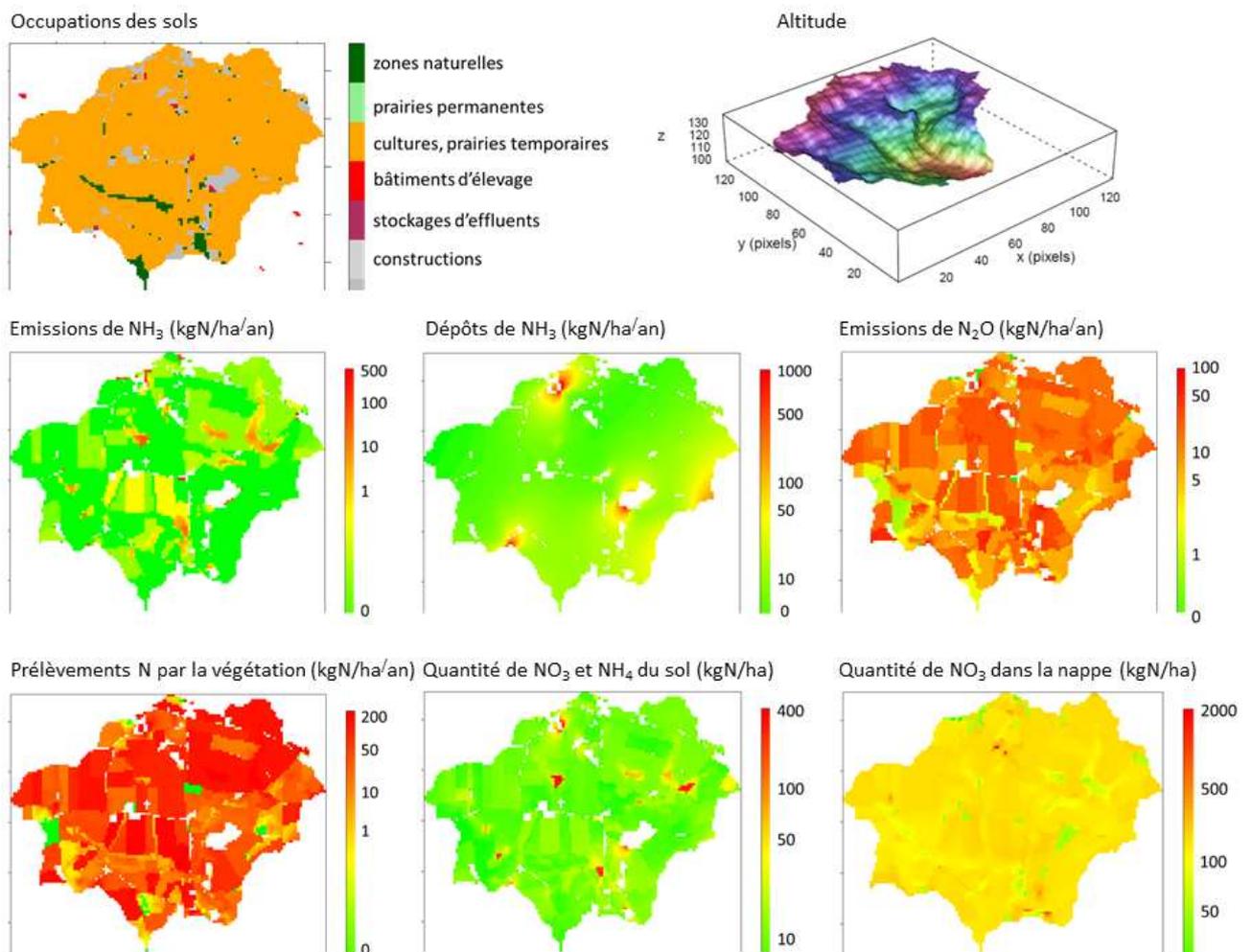


Fig. 22. Flux et quantités d'azote simulés à partir du modèle NITROSCAPE, cumulés annuellement dans le bassin de Kervidy-Naizin (ORE AgrHys, Bretagne).

Le modèle NITROSCAPE, et par conséquent ses modèles composants, doit pouvoir être utilisé dans d'autres cadres que celui du projet NITROEUROPE et doit donc être libre d'utilisation. Ceci n'est pas le cas du modèle de transfert atmosphérique OPS qui est un modèle propriétaire. Afin de pouvoir utiliser NITROSCAPE dans d'autres projets, nous cherchons à remplacer le modèle OPS par l'adaptation, la spatialisation et le couplage de deux modèles développés dans l'équipe Biosphère-Atmosphère : le modèle FIDES (Loubet et al., 2001) qui permet de simuler la dispersion et le transfert d'azote dans un plan vertical à l'échelle de quelques parcelles et le modèle SURFATM (Personne et al., 2009) qui simule les échanges d'azote entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Ces travaux ont fait l'objet des stages de masters de Y. De Cacqueray (2012, [G14]) puis de C. Blanchon (2013, [G13]) que j'ai co-encadrés avec B. Loubet. Ils ont abouti à une version opérationnelle d'un modèle couplé, spatialisé (3D) et optimisé en termes de temps de calcul permettant de simuler dans des temps raisonnables la dispersion, le transfert et le dépôt d'azote par voie atmosphérique dans des paysages de quelques dizaines de km<sup>2</sup> représentés par plusieurs milliers de mailles de quelques mètres de côté. Une phase d'évaluation de ce modèle est en cours sur des paysages théoriques simplifiés avant son évaluation sur des cas réels. Les premiers résultats montrent que le modèle couplé FIDES-3D-SURFATM permet de simuler correctement le profil de concentration en ammoniac en aval d'une source, ainsi que la dispersion spatiale de l'ammoniac (Fig. 23 ; Blanchon, 2013, [C3, G13]).

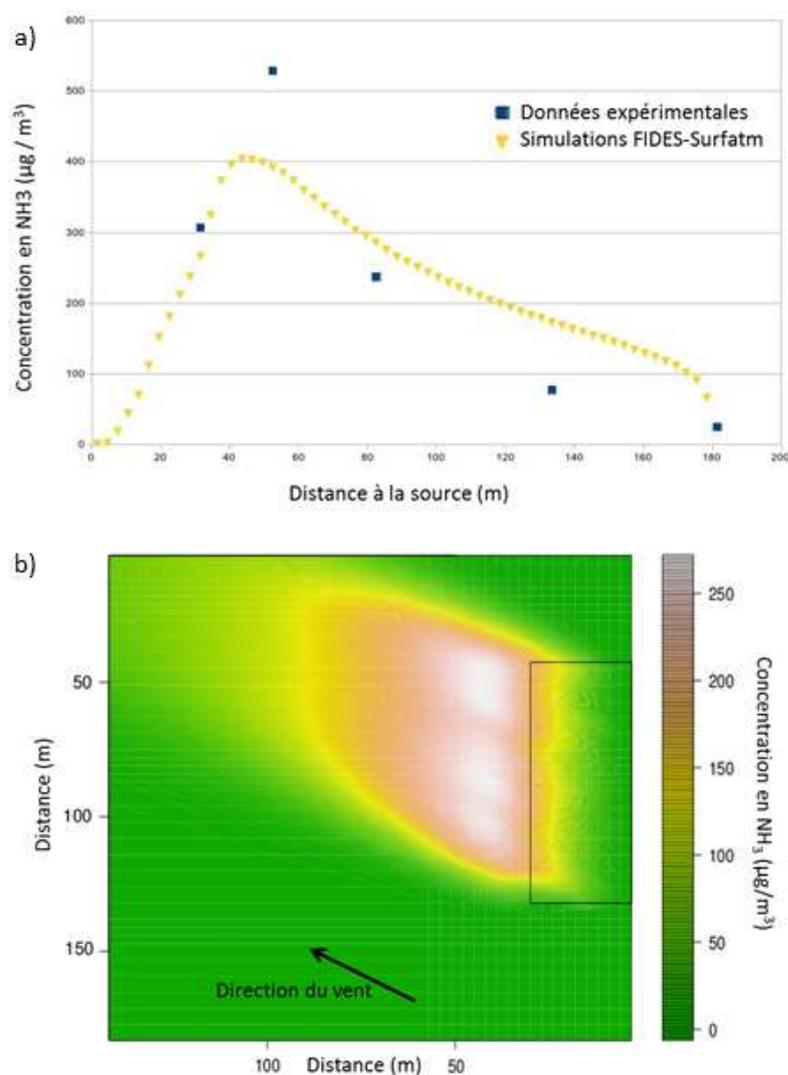


Fig. 23. Simulation de la concentration en ammoniac dans l'air (à une hauteur de 1,60 m au-dessus de la surface du sol) avec le modèle FIDES-3D-SURFATM a) en fonction de la distance à une source ponctuelle et b) spatialement résultant des processus d'émission depuis une source surfacique (épandage de lisier représenté par le rectangle noir), de dispersion, de transfert et de dépôt d'ammoniac (d'après Blanchon, 2013, [C3]).

## A l'échelle de l'exploitation agricole

Les travaux que j'ai menés à l'échelle de l'exploitation agricole ont fait l'objet de plusieurs stages de masters que j'ai directement encadrés en collaboration avec les unités UREP, ASTER, MIAJ et l'ENITA. Le stage de S. Duret (2007) a abouti à une première version d'un modèle couplant les modèles FARMSIM (Salet et al., 2004), PASIM (Riedo et al., 1998) et CERES-EGC (Gabrielle et al., 2006). Ce modèle permet de simuler les flux de carbone et d'azote et l'effet de diverses modalités de gestion des exploitations agricoles (gestion de l'azote, des pâturages, des troupeaux) ou de changements climatiques sur les bilans de GES ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) et le stockage de carbone dans des exploitations de polyculture-élevage (Fig. 24).

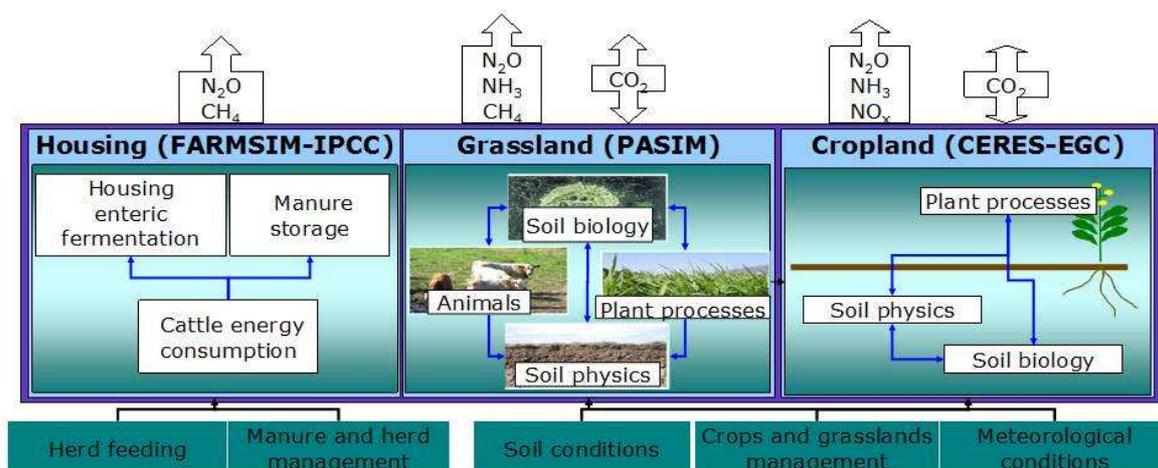


Fig. 24. Schéma conceptuel du modèle couplé FARMSIM / PASIM / CERES-EGC.

Des simulations ont été réalisées en particulier avec les données de l'exploitation agricole de Mirecourt, située en Lorraine (réseau européen du projet GREENGRASS). Ce modèle permet aussi de simuler l'effet de mesures d'atténuation sur les bilans de GES, par exemple, dans le cas de l'exploitation de Mirecourt, l'effet de mesures d'extensification de l'élevage associant une réduction du chargement animal, un changement du système de cultures avec une augmentation de la part des aliments produits sur l'exploitation et une réduction drastique de 50% de la fertilisation azotée des cultures (Fig. 25 ; Fiorelli et al., 2014, [A5]).

Ce modèle couplé nécessite un grand nombre de paramètres qu'il est nécessaire de hiérarchiser afin d'identifier les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible et de limiter ainsi la quantité de données expérimentales à collecter. L'analyse de sensibilité du modèle couplé a été menée lors des stages de N. Capien (2008, [G17]) et de C. Fusis (2010, [G16]) en utilisant des méthodes robustes classiquement utilisées en mathématiques appliquées (e.g. méthodes de Morris, Cotter, méthodes du rang, méthodes FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test), Sobol) mais jusque-là encore peu utilisées en agro-environnement. En prenant l'exemple du modèle CERES-EGC appliqué à l'exploitation de Mirecourt, cette analyse a montré, en utilisant dans un premier temps la méthode qualitative de Morris, puis la méthode quantitative FAST, que les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  à l'échelle de l'exploitation étaient particulièrement sensibles, parmi les 44 facteurs étudiés, à la fraction de  $\text{N}_2\text{O}$  émise pendant la dénitrification, la vitesse maximale de nitrification, la densité du sol et la surface des cultures (Fig. 26 ; Drouet et al., 2011, [A10], publication jointe). Si ces travaux ont permis de retrouver des résultats établis antérieurement, ils utilisent des méthodes tenant compte des interactions entre les facteurs alors que les méthodes classiques sont mono-factorielles. Ils permettent de pondérer l'effet des différents facteurs et ainsi de les hiérarchiser, et aussi d'identifier les liens entre les facteurs et de regrouper ceux qui sont redondants.

Ce travail de modélisation des émissions de GES par les cultures, les prairies, les animaux en bâtiments, ainsi que l'évaluation de ces modèles se poursuit par le co-encadrement de M. Carozzi (post-doctorant sur les projets AEGES et ANIMALCHANGE, 2013-2015, [C4, G8]), avec R. Martin (UREP Clermont-Ferrand) et R. Massad (UMR EGC).

a) Sans mesures d'atténuation

b) Avec mesures d'atténuation

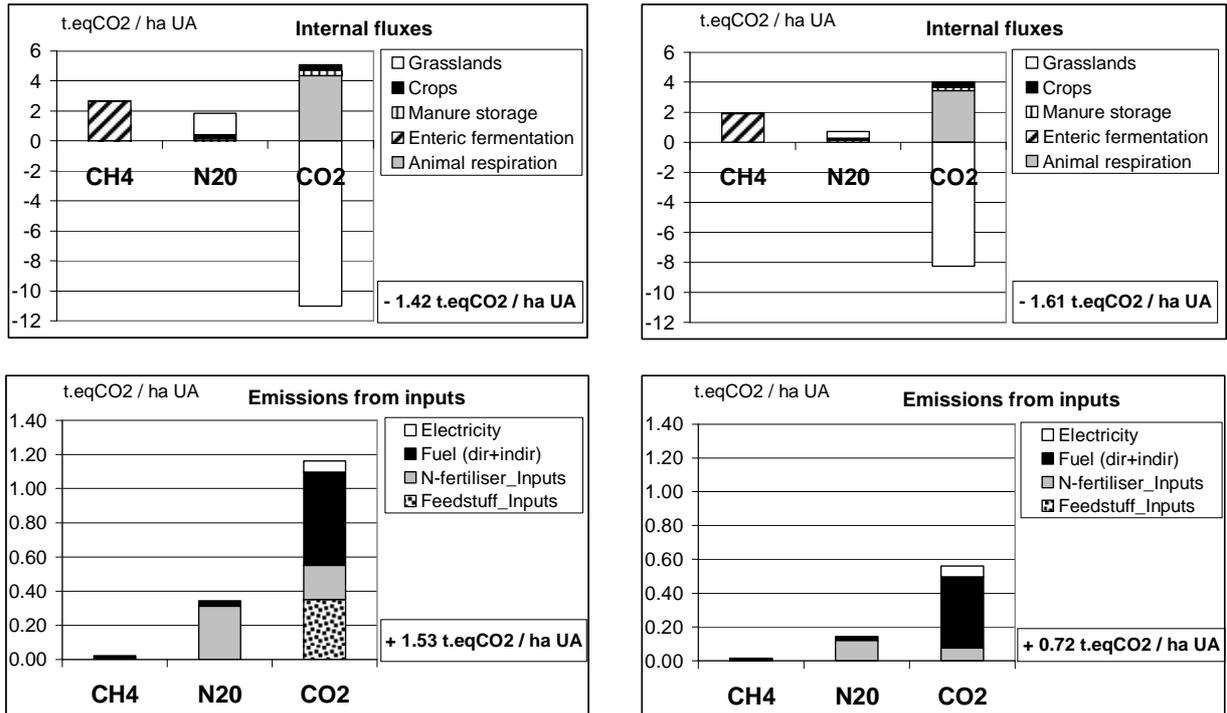


Fig. 25. Bilans de GES simulés à l'aide du modèle couplé FARMSIM / PASIM / CERES-EGC avant (a) ou après (b) l'application de mesures d'atténuation des émissions de GES dans le cas de l'exploitation agricole de Mirecourt (d'après Fiorelli et al., 2014, [A5]).

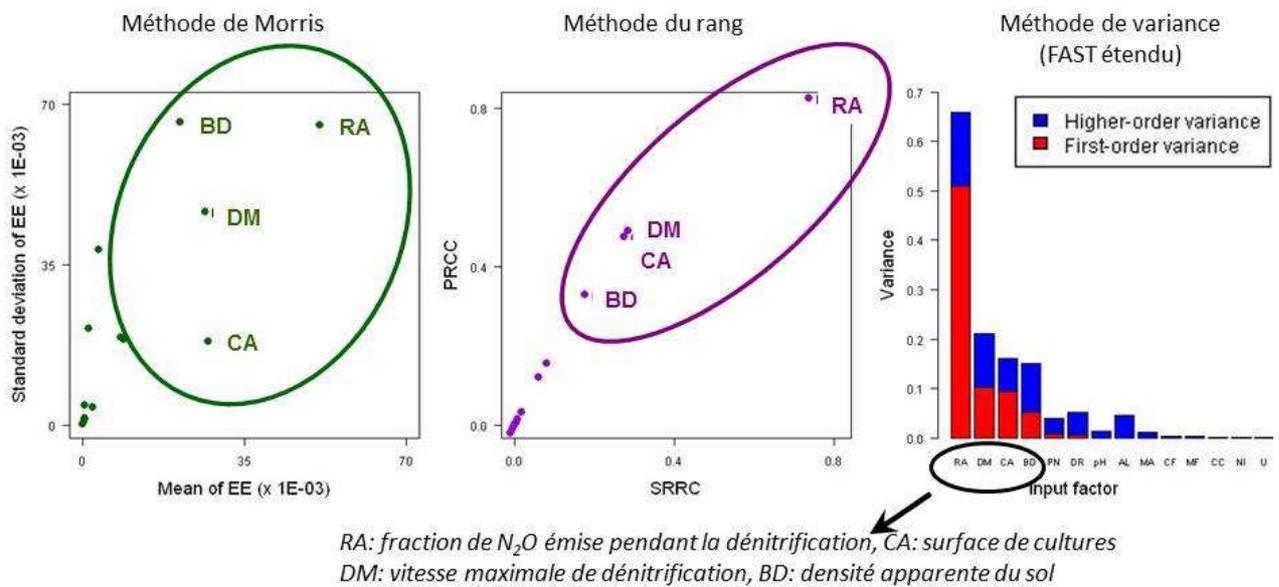


Fig. 26. Analyse de sensibilité du modèle CERES-EGC (d'après Drouet et al., 2011, [A10]).

### A l'échelle de grands territoires sans prise en compte des interactions spatiales

Mes travaux dans ce domaine ont été menés à travers le co-encadrement de la thèse de K. Dufossé (2010-2013, [G3]) avec B. Gabrielle (EGC). En relation avec les travaux décrits précédemment, un des objectifs initiaux était notamment d'évaluer comment la prise en compte des interactions spatiales dans les flux d'azote simulés à partir du modèle NITROSCAPE peuvent permettre d'améliorer les estimations des bilans de GES obtenus par simple agrégation à l'échelle territoriale des flux simulés à l'échelle parcellaire par le modèle CERES-EGC. Toutefois, le travail de thèse, déjà conséquent, n'a pas permis d'aller jusqu'à la prise en compte des interactions spatiales. Par ces travaux, j'ai élargi mon domaine de recherche à l'échelle de territoires plus vastes que les paysages, dans le contexte de l'évaluation environnementale et de l'analyse du cycle de vie (ACV) des biocarburants. Ils visent à contribuer aux recherches menées dans le cadre de la directive européenne sur les énergies renouvelables (Renewable Energy Directive, RED, European Commission, 2009) stipulant qu'à l'horizon 2020, 10% des carburants consommés dans l'Union Européenne devront être d'origine renouvelable et permettre une réduction de 60% des émissions de GES en comparaison avec les carburants fossiles.

Les résultats d'ACV obtenus pour la première génération de biocarburants ont mis en évidence certaines limites liées à la phase de production de la biomasse (variabilité des rendements, émissions de N<sub>2</sub>O ou effets du changement d'affectation des sols), engendrant des incertitudes importantes (e.g. Edwards et al., 2011). Les objectifs du travail de thèse étaient donc d'améliorer la fiabilité des ACV des biocarburants de deuxième génération à l'échelle du bassin d'approvisionnement, en utilisant un modèle de simulation des cultures énergétiques pour rendre compte des facteurs de variabilité au sein du bassin d'approvisionnement.

Une première étape du travail a consisté à définir un cadre conceptuel pour la méthodologie d'ACV envisagée dans la thèse (Fig. 27 ; Dufossé et al., 2013, [A6], publication jointe). Ce cadre a été appliqué à la région Picardie, dans une étude de cas comparant les bioéthanol de première et deuxième générations, fabriqués à partir de betterave sucrière et de Miscanthus, respectivement. La méthode repose sur une simulation spatialement explicite des rendements et des émissions des cultures dans la région d'étude, à partir du modèle CERES-EGC, et sur des hypothèses simples d'implantation ou de localisation de ces cultures.

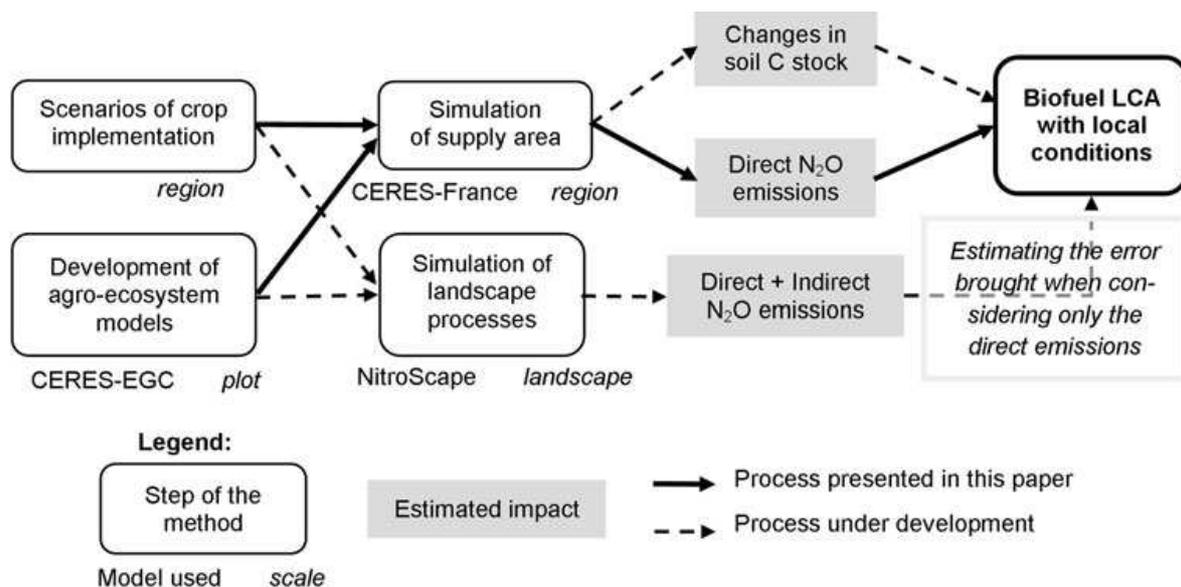


Fig. 27. Méthodologie développée pour préciser les résultats des analyses de cycle de vie (ACV) par des estimations des émissions de N<sub>2</sub>O et des stocks de carbone du sol à l'échelle parcellaire et leur association à des simulations à des échelles supra-parcellaires (d'après Dufossé et al., 2013, [A6]).

Dans une deuxième étape, le modèle d'agro-écosystème CERES-EGC a été adapté aux cultures pérennes, notamment le Miscanthus (Picoche et al., soumis, [A1]) qui est une espèce modèle pour le module « Ressources » du projet FUTUROL (2010-2018). Le modèle a été testé sur les rendements et les émissions de N<sub>2</sub>O à partir de jeux de données acquis à Grignon et dans la région Centre (Fig. 28 ; Dufossé et al., soumis, [A2]). Différentes sources de biomasse candidates ont été simulées avec CERES-EGC sur deux régions (Picardie et Bourgogne), en lien avec le module « Intégration » du projet FUTUROL : les résidus agricoles (pailles de céréales), deux cultures annuelles (sorgho et triticales), et une culture pérenne (Miscanthus). Les performances environnementales de ces biomasses ont été comparées et ont permis d'identifier des scénarios d'implantation et d'association optimales pour satisfaire la directive RED.

Enfin, la dernière étape du travail a porté sur l'analyse de cycle de vie complète des différents scénarios d'approvisionnement décrits ci-dessus. Cette analyse inclut l'ensemble des catégories d'impacts classiquement évalués en ACV (émissions de GES, eutrophisation des écosystèmes, acidification de l'atmosphère, pollution de l'air...), ainsi que les étapes logistiques de transport de la biomasse jusqu'à l'usine (Fig. 29 ; Dufossé et al., sous presse, [A3]). Le travail de thèse inclut également un volet important sur l'analyse de la fin de vie du Miscanthus, par le biais d'une étude expérimentale sur une parcelle âgée d'une vingtaine d'années, et d'un bilan des impacts du retournement de cette culture sur les émissions de GES du Miscanthus et l'implantation de la culture suivante (Dufossé et al., sous presse, [A4]).

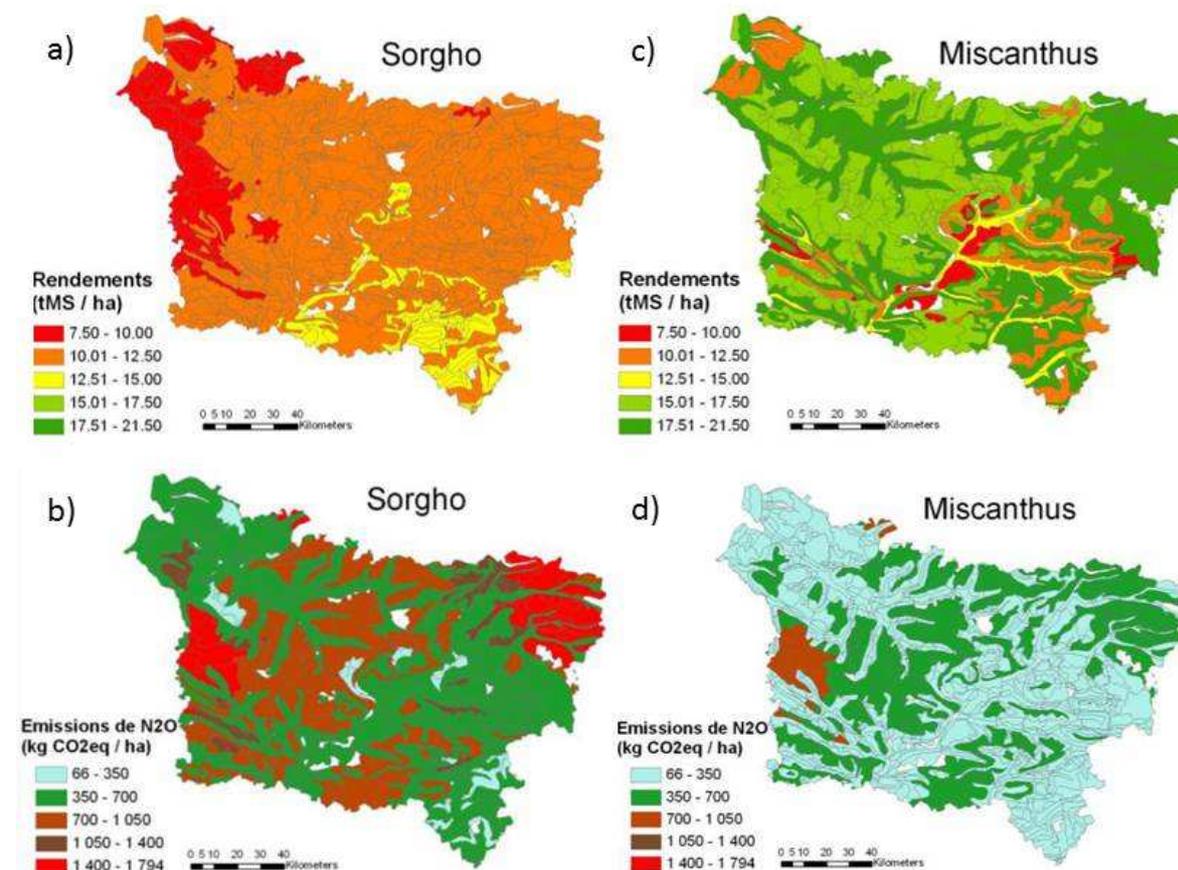


Fig. 28. Rendements en sorgho (a) et Miscanthus (c) et émissions de N<sub>2</sub>O du sorgho (b) et du Miscanthus (d) dans la région Picardie estimés à partir du modèle CERES-EGC (d'après Dufossé et al., soumis, [A2]).

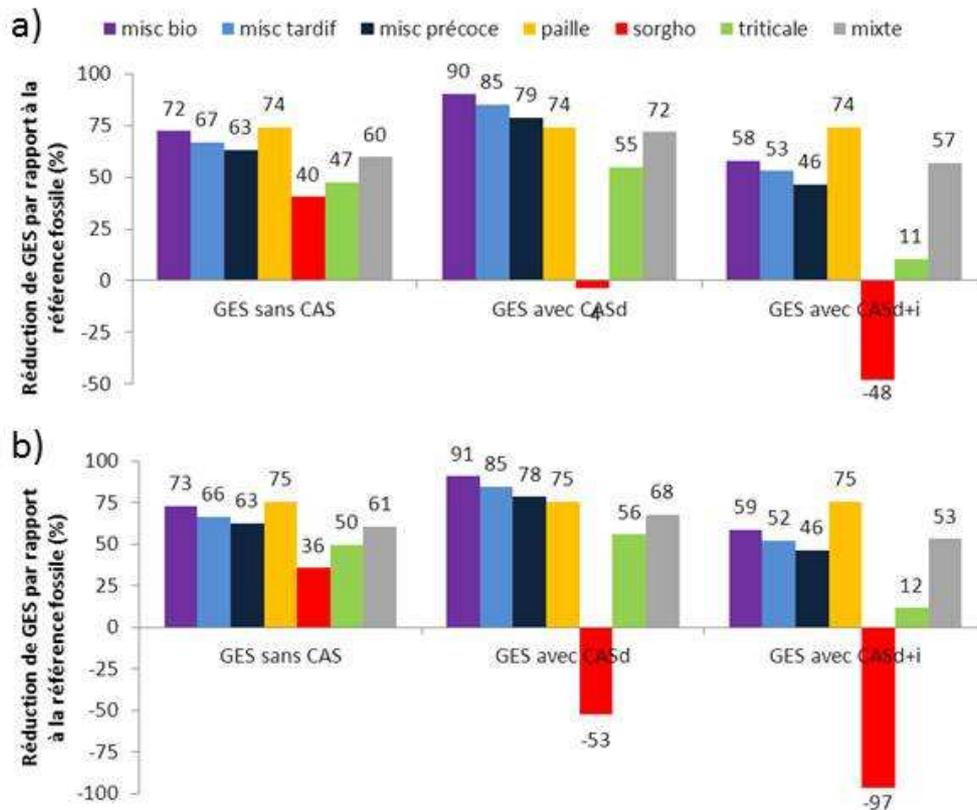


Fig. 29. Emissions de GES des biocarburants issus de différentes sources de biomasse selon la prise en compte des changements d'affectations des sols (CAS) directs seulement ou des CAS directs et indirects pour les régions Bourgogne (a) et Picardie (b) (d'après Dufossé et al., sous presse, [A3]).

Ces travaux ont abouti au montage d'un projet de thèse ([G1]), visant notamment à prendre en compte les interactions spatiales liées aux flux azotés et carbonés dans les territoires par l'utilisation du modèle NITROSCAPE, en y ajoutant un volet économique. Sous réserve de l'obtention du financement, le travail de thèse fera l'objet d'un co-encadrement avec B. Gabrielle (directeur de thèse) et P.A. Jayet (UMR Economie Publique, Grignon). Il aura trois objectifs : i) mieux estimer les performances environnementales de filières à base de biocarburants par la prise en compte des contextes locaux de production de biomasse, à partir d'une approche de modélisation biophysique et micro-économique, ii) modéliser les impacts du développement des cultures lignocellulosiques au niveau du paysage à partir de la modélisation des dynamiques de l'eau et de l'azote à cette échelle (en particulier les transferts latéraux, modèle NITROSCAPE), ainsi que la prise en compte de mesures permettant d'optimiser ces impacts (e.g. choix d'espèces, modifications des conduites de cultures et position dans le paysage), iii) intégrer les indicateurs d'impact issus de l'ACV et de la modélisation biophysique pour réaliser une analyse coûts-bénéfices d'un projet d'approvisionnement d'une usine en biocarburants de deuxième génération dans un territoire donné.

### **A l'échelle de grands territoires avec prise en compte des interactions spatiales**

Les recherches menées dans la composante du projet ECLAIRE dans laquelle s'insère le modèle NITROSCAPE visent à améliorer les prédictions des modèles de transfert d'azote et de qualité de l'air fonctionnant à des échelles régionales (EMEP, Berge et Jakobsen, 1998 ; Simpson et al., 2006 ; CHIMERE, Bessagnet et al., 2004) à partir des connaissances acquises sur les flux d'azote aux échelles plus locales du paysage. En effet, les modèles régionaux utilisent des résolutions allant de l'ordre de 1x1 km<sup>2</sup> ou 5x5 km<sup>2</sup> jusqu'à 50x50 km<sup>2</sup>. Les simulations des concentrations ou des dépôts d'azote réactif, en particulier les dépôts secs d'ammoniac, à partir de ces modèles à faible résolution, peuvent aboutir à des sous-estimations ou des sur-estimations des concentrations et des flux d'azote. Les dépôts d'azote réactif atmosphérique peuvent présenter une forte variabilité locale à l'intérieur des mailles utilisées dans les modèles régionaux (Dragosits et al., 2002 ; Loubet et al.,

2009). Cette variabilité est principalement due au caractère ponctuel des sources fortement émettrices d'ammoniac (bâtiments d'élevage, aires de stockage des effluents, épandage d'effluents d'élevage) et à la vitesse élevée du dépôt sec d'ammoniac sur les agro-écosystèmes, notamment les écosystèmes semi-naturels (forêts, prairies permanentes, zones humides). Ceux-ci sont particulièrement sensibles aux dépôts d'ammoniac, avec des effets antagonistes : d'une part un impact positif (e.g. croissance, production de biomasse) en raison de ces apports d'azote par voie atmosphérique et d'autre part un impact négatif (e.g. acidification et eutrophisation des milieux, perte de biodiversité) dus aux dépôts de ce polluant. Etant donné que les écosystèmes ne répondent pas de manière linéaire aux doses d'ammoniac reçues mais par paliers entre des seuils critiques de dépôt, il est nécessaire de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des sources et des puits d'azote au sein des paysages, en particulier dans les régions de polyculture-élevage, pour améliorer les prédictions de la qualité de l'air et des impacts des dépôts d'azote sur les écosystèmes.

La prise en compte des interactions spatiales dans les modèles régionaux de transfert d'azote et de qualité de l'air fait l'objet de la thèse de N. Azouz (2013-2016, [C2, G3]) dont je suis l'encadrant principal, en collaboration avec M. Beekmann (UMR LISA, Créteil) et P. Cellier (directeur de thèse). Les objectifs sont de i) évaluer les biais et incertitudes générés par les simulations des modèles de transferts atmosphériques régionaux à partir de la prise en compte des interactions spatiales intervenant sur les flux d'azote dans les paysages et ii) proposer des méthodes permettant de prendre en compte l'hétérogénéité des paysages dans les modèles atmosphériques régionaux. Outre les modèles décrits ci-dessus, le travail de thèse s'appuiera sur les méthodes et analyses déjà mises en oeuvre sur les modèles utilisés (e.g. Lamboni et al., 2007 ; Lehuger et al., 2009 ; Beekmann et Vautard, 2010 ; Boynard et al., 2011 ; Drouet et al., 2011, [A10], publication jointe). Il vise à proposer *in fine* des outils ou des préconisations (e.g. modèle de paysage simplifié, initialisation de modèles régionaux, détermination de seuils ou de formalismes pour le maillage des modèles régionaux, quantification des incertitudes) pour l'amélioration et l'utilisation des modèles régionaux à des fins prédictives de la qualité de l'air, des dépôts d'azote réactif ou encore de la pollution azotée de zones sensibles. Il contribuera aussi à l'analyse de l'impact des activités agricoles, des changements d'occupation des sols dans un paysage et des changements climatiques sur les transferts de polluants azotés et sur la qualité de l'air.

Outre le projet ECLAIRE, ce travail s'inscrit également dans les priorités du Département Environnement et Agronomie de l'INRA (notamment l'Enjeu Structurant sur les cycles biogéochimiques) et dans le projet ESCAPADE (2013-2017).

#### **II.4.2.3 Expérimentations, données spatialisées et base de données « paysage »**

Une autre activité de la composante « paysage » du projet NITROEUROPE a concerné l'acquisition de données pour la paramétrisation et l'évaluation du modèle intégré NITROSCAPE et de ses modèles composants. Ces données étaient issues : i) de mesures expérimentales des concentrations et flux de composés azotés ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_3^-$ , teneur en azote des plantes) dans l'air, les plantes, le sol et le réseau hydrologique, ii) d'enquêtes sur la conduite des exploitations auprès des agriculteurs ou d'organismes délivrant des statistiques agricoles et iii) de données cartographiques (topographie, occupation des sols...). Les données ont été acquises sur un réseau de six sites européens, représentatifs de la variabilité des conditions pédo-climatiques et des pratiques culturales et d'élevage en Europe. Les sites se situent en France (bassin versant de Kervidy-Naizin, situé en Bretagne et intégré à l'ORE AgrHys), en Ecosse, au Danemark, aux Pays-Bas, en Pologne et en Italie.

En étant membre du comité de gestion des données du projet NITROEUROPE, j'ai coordonné l'acquisition des données sur ce réseau de six sites et j'étais responsable de la gestion de la base de données dédiée à la composante « paysage » du projet. Je me suis impliqué dans la co-construction de cette base de données spatialisée (Fig. 30), la centralisation, la mise en forme et la diffusion de ces données, en collaboration avec O. Maury (Maury et Drouet, 2008, [E14] ; Drouet et al., 2011, [C17]).

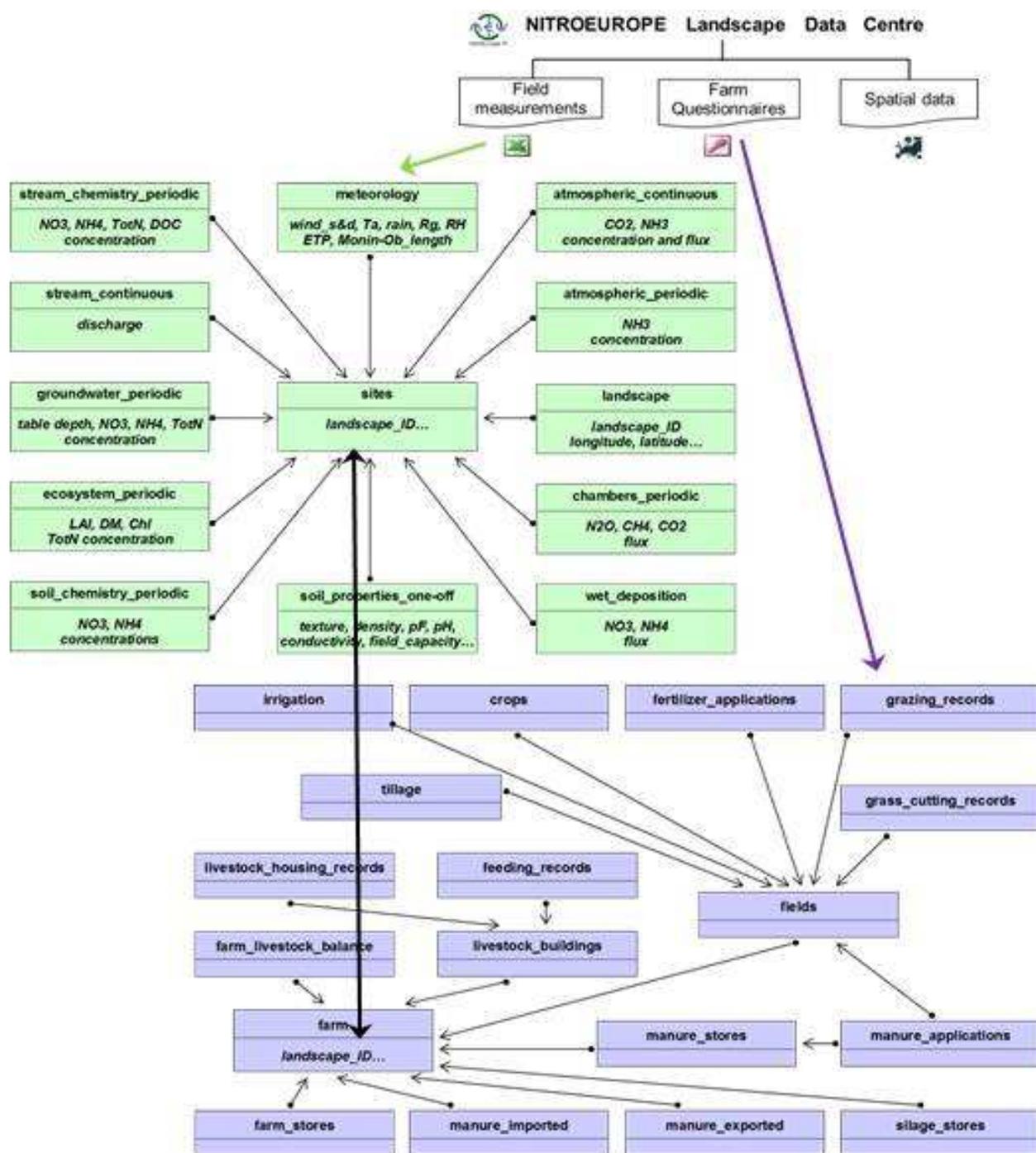


Fig. 30. Structure du centre de données et de la base de données «paysage» du projet NITROEUROPE (d'après Drouet et al., 2011, [C17]).

Concernant le site français de Kervidy-Naizin, j'ai participé à la mise au point de systèmes de mesures dits simplifiés, car ils devaient permettre de suivre les concentrations et flux de  $\text{NH}_3$  et  $\text{N}_2\text{O}$  à l'échelle du bassin versant entier tout en ayant des coûts en temps et en matériel raisonnables compte tenu du budget du projet (Fig. 31). Ce travail a été réalisé en collaboration avec les collègues de l'UMR SAS à Rennes qui sont aussi intervenus dans l'acquisition des données du sol et du réseau hydrologique ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) et des données relatives aux pratiques agricoles au sein des exploitations.

Une réflexion a été menée sur la stratégie à mettre en œuvre pour calibrer et évaluer le modèle complexe, intégré et spatialisé NITROSCAPE. Il s'agissait de trouver un compromis entre d'une part la quantité de données à acquérir pour calibrer le plus précisément possible les modèles composants et le modèle intégré et pour évaluer le modèle intégré dans sa globalité ou chacun des modèles composants et d'autre part, la disponibilité en ressources humaines et matérielles. Dans ce contexte,

un protocole d'enquêtes auprès des agriculteurs a été élaboré et mis en œuvre afin de renseigner le modèle intégré dont plus particulièrement le modèle d'exploitation agricole. Une stratégie d'échantillonnage spatio-temporel des flux et concentrations de composés azotés dans les différents compartiments biophysiques du paysage (hydro-pédosphère, atmosphère, agro-écosystèmes) a aussi été élaborée et mise en œuvre de manière à disposer de points de comparaison des résultats du modèle intégré et des modèles composants aux mesures effectuées pendant deux années. Il s'agit d'une première évaluation du modèle intégré et de ses modèles composants à l'échelle du paysage. Les modalités d'évaluation d'un modèle complexe, intégré et spatialisé constituent une question méthodologique qu'il est nécessaire de traiter afin d'améliorer la fiabilité de tels modèles, notamment pour la prédiction des flux spatialisés et des pertes d'azote et aussi pour l'évaluation de scénarios de gestion de l'azote et des paysages. Ces modalités d'évaluation sont encore à préciser, en envisageant probablement plusieurs types d'évaluations, par exemple à partir de mesures des concentrations et des flux locaux (Fig. 32 ; Durand et al., 2011, [C29]) ou encore sur quelques critères intégrés tels que des bilans à l'échelle du paysage ou en sortie de bassin versant (Fig. 33 ; Dalgaard et al., 2012, [A7]).



Fig. 31. Echantillon du dispositif expérimental mis en place sur le site de Kervidy-Naizin : piézomètres pour suivre les hauteurs d'eau et les concentrations en  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  dans le réseau hydrologique et selon plusieurs transects, mats avec un triplet de badges Alpha pour suivre les concentrations en  $\text{NH}_3$  (30 mats répartis sur l'ensemble du site et positionnés en fonction des sources et des puits d'azote et de la direction des vents dominants, cf. Fig. 32), chambres manuelles pour mesurer les concentrations et flux de  $\text{N}_2\text{O}$  (et aussi  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ) au-dessus du sol (5 chambres positionnées sur 4 types de couverts végétaux : cultures de printemps, cultures d'hiver, prairie, zone humide sur l'image de gauche).

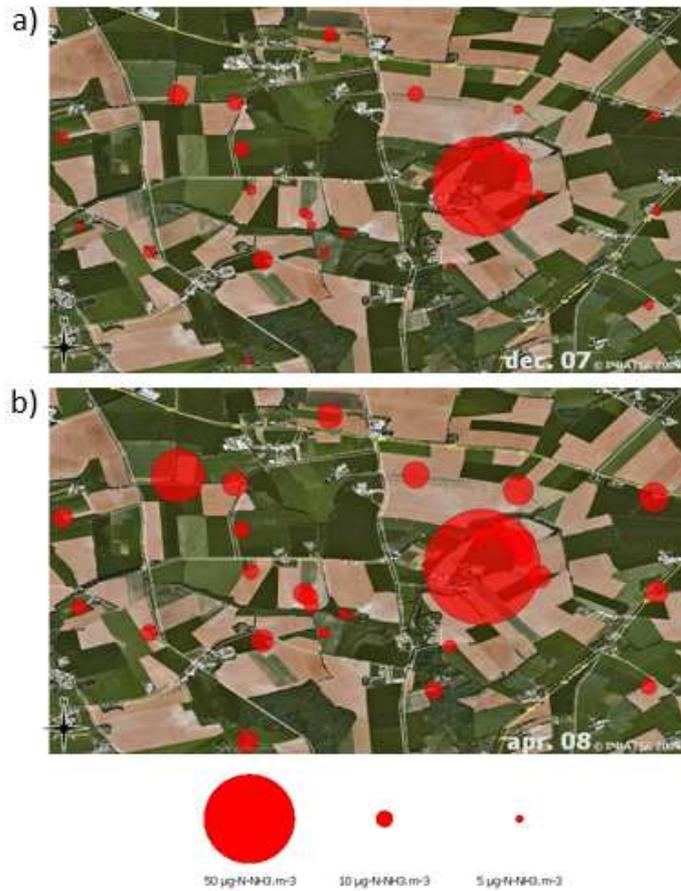


Fig. 32. Concentrations en  $\text{NH}_3$  mesurées à partir de badges Alpha positionnés à deux mètres au-dessus de la surface du sol et spatialement répartis sur le site de Kervidy-Naizin, à deux dates : a) en décembre 2007 et b) en avril 2008 au moment des apports de fertilisants minéraux. La valeur de concentration en  $\text{NH}_3$  la plus élevée correspond à un triplet de badges situé à proximité immédiate d'un bâtiment d'élevage.

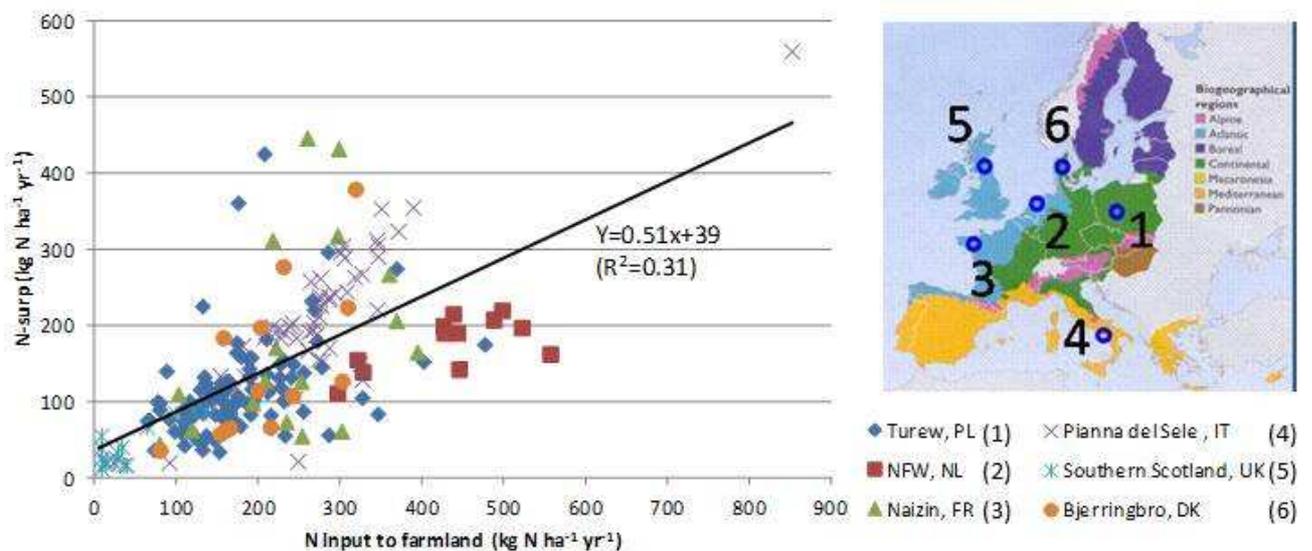


Fig. 33. Relation entre le surplus d'azote à l'échelle de l'exploitation agricole et les entrées d'azote dans l'exploitation, calculées comme étant la somme des fertilisants minéraux, des engrais organiques, de la fixation d'azote et du dépôt d'azote atmosphérique. Les résultats sont présentés pour les six sites du projet NITROEUROPE (à gauche) situés dans diverses régions biogéographiques d'Europe (à droite) (d'après Dalgaard et al., 2012, [A7]).



## II.5 Perspectives sur la cascade de l'azote aux échelles supra-parcellaires

L'objectif général de mon projet de recherche est d'analyser l'effet des activités agricoles et de la mosaïque paysagère sur la cascade de l'azote dans les territoires, avec une approche associant la production de scénarios, des outils de modélisation et d'observations des flux des différentes formes d'azote ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ...). En termes d'échelle spatiale, mon projet se focalise surtout sur des paysages ou petits territoires (de quelques  $\text{km}^2$  à quelques dizaines de  $\text{km}^2$ ) et porte aussi sur des territoires plus vastes (de quelques centaines à quelques milliers de  $\text{km}^2$ ). Il vise *in fine* à produire des résultats et des outils pour mieux maîtriser les flux et pertes d'azote dans les territoires, afin de contribuer à définir des solutions innovantes d'atténuation des pertes d'azote dans l'environnement et d'adaptation des systèmes de production aux changements globaux, et ainsi à définir des agro-écosystèmes innovants et performants à la fois en termes économique et environnemental. A court terme, ces recherches vont être principalement menées dans le cadre du projet ESCAPADE que je coordonne (« Evaluation de Scénarios sur la Cascade de l'Azote dans les Paysages Agricoles et moDELisation territoriale », 2013-2017, ANR Agrobiosphère, [F2]).

Le projet ESCAPADE s'inscrit dans la dynamique des projets européens développés depuis le milieu des années 2000 (dont les projets NITROEUROPE, ECLAIRE et ANIMALCHANGE auxquels je participe), ainsi que des réseaux internationaux mis en place dans le même temps et visant à mieux comprendre et maîtriser les flux d'azote à différentes échelles (e.g. ENA<sup>33</sup>, NinE, TFRN, COST729, INI, Reactive Nitrogen in the United States).

Il s'insère aussi dans les objectifs, priorités et activités de diverses structures académiques nationales, notamment le département Environnement et Agronomie de l'INRA<sup>34</sup> (enjeux structurants 4, 3 et 2 ; champs thématiques 4, 1 et 3 ; méta-programme EcoServ ; participation au projet de plateforme de modélisation des paysages), ou régionales en Ile-de-France (Labex BASC<sup>35</sup> avec ma participation aux projets phare 1 et 5 ; Fédération de Recherche FIRE<sup>36</sup> avec ma participation au comité scientifique ; pilier « Agriculture » du programme Piren-Seine, Drouet et al., 2009, [E11]). Il se positionne aussi dans les préoccupations plus appliquées des acteurs du développement, par exemple des acteurs du GIS GC-HP2E<sup>37</sup> (plus particulièrement le groupe « Cascade de l'azote ») qui a contribué au montage du projet ESCAPADE et dont certains membres participent au projet (e.g. Drouet, 2009, [E10] ; Drouet et al., 2014, [E1]). J'ai aussi participé à l'UMT GES-N2O<sup>38</sup> sur le volet traitant des émissions indirectes de  $\text{N}_2\text{O}$  dans les territoires et aux activités du RMT<sup>39</sup> Fertilisation et Environnement (e.g. Drouet, 2012, [E3]).

---

<sup>33</sup> ENA : European Nitrogen Assessment ; NinE : Nitrogen in Europe ; TFRN : Task Force on Reactive Nitrogen ; COST729 : Assessing and Managing nitrogen fluxes in the atmosphere-biosphere system in Europe ; INI : International Nitrogen Initiative.

<sup>34</sup> Enjeux structurants (EnjS) et champs thématiques (CT) du département Environnement et Agronomie de l'INRA : EnjS4 « Bouclage des cycles de l'azote et du phosphore et stockage du carbone » ; EnjS3 « Gestion, protection et restauration des milieux » ; EnjS2 « Intensification écologique » ; CT4 « Physique et écologie des paysages » ; CT1 « Agronomie systémique et ingénierie agro-écologique » ; CT3 « Biochimie, physique et écologie des sols ».

<sup>35</sup> Labex BASC : Laboratoire d'Excellence Biodiversité, Agro-écosystèmes, Société, Climat ; Projet phare 1 « Utilisation des connaissances sur les interactions biosphère-atmosphère pour les scénarios d'aménagement du territoire ; Projet phare 5 « Intégration de modèles et modélisation multi-échelles dans les systèmes socio-économiques : des concepts à des outils de couplage évolutifs ».

<sup>36</sup> FIRE : Fédération Ile de France de Recherche sur l'Environnement.

<sup>37</sup> GIS GC-HP2E : Groupement d'intérêt Scientifique Grandes Cultures à Hautes Performances Economiques et Environnementales.

<sup>38</sup> UMT GES-N2O : Unité Mixte Technologique « Connaissance et GESTion des émissions de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) par les cultures.

<sup>39</sup> RMT : Réseau Mixte Technologique.

Pour répondre aux objectifs du projet ESCAPADE, celui-ci est structuré en quatre tâches scientifiques principales (Fig. 34) :

- T1 : construction, implémentation et analyse de scénarios de gestion de l'azote dans les paysages et des territoires plus vastes,
- T2 : acquisition de connaissances, modélisation de la cascade de l'azote dans les paysages,
- T3 : utilisation des connaissances acquises sur la cascade de l'azote dans les paysages pour la modélisation et la gestion de l'azote à l'échelle de territoires plus vastes,
- T4 : acquisition de données pour la calibration, l'évaluation et l'application des modèles développés aux sites expérimentaux du projet.

Ces quatre tâches principales comportent elles-mêmes deux ou trois tâches :

- les tâches Tx.1 correspondent à la conception / construction / définition des outils (scénarios, typologies, modèles, protocoles expérimentaux) à mettre en œuvre,
- les tâches Tx.2 sont les tâches de mise en œuvre / test / évaluation des outils développés dans les tâches Tx.1,
- les tâches Tx.3 correspondent à l'application aux sites du projet des outils développés en Tx.1 et testés en Tx.2 ainsi qu'à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus.

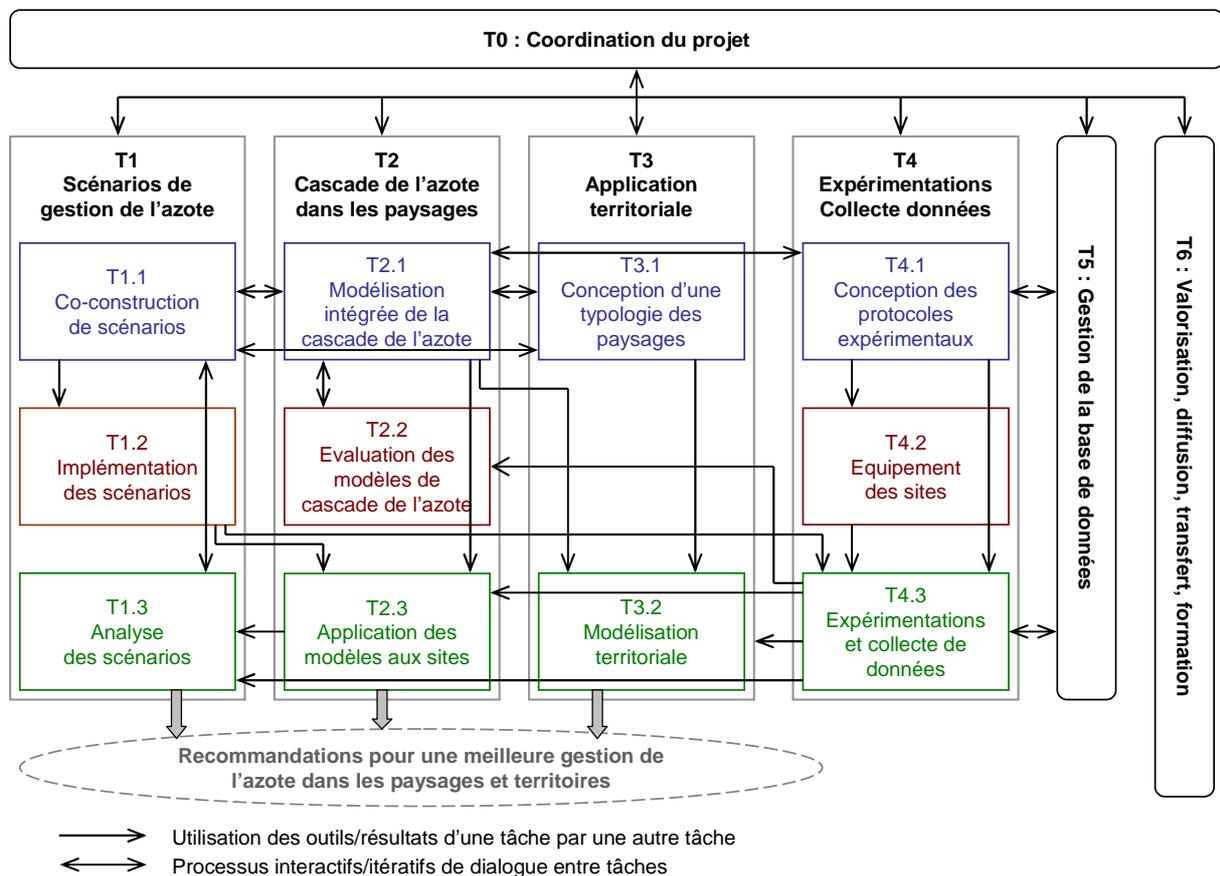


Fig. 34. Structure du projet ESCAPADE [F2].

Outre la coordination du projet, mes activités de recherche dans le projet s'inscriront principalement dans la tâche 2 avec la poursuite du développement et de l'application du modèle NITROSCAPE et l'encadrement de trois post-doctorants (M. Lamboni [G6], C. Benhamou [G7] et C. Blanchon [G9]). Elles s'inscriront aussi dans la tâche 3 avec la problématique du changement d'échelle entre les modèles NITROSCAPE et CHIMERE et l'encadrement de la thèse de N. Azouz [G2], la tâche 4 avec l'adaptation et la mise en place des protocoles issus du projet NITROEUROPE, la tâche 5 avec la ré-utilisation et l'adaptation de la base de données « paysage » du projet NITROEUROPE, et la tâche 1 avec la reprise et le développement, dans un contexte scientifique et partenarial plus large, des scénarios développés dans le projet NITROEUROPE. En effet, le projet ESCAPADE associe



(instituts techniques). Ce partenariat varié et complémentaire permettra d'élaborer des scénarios prenant en compte l'expertise et les logiques des acteurs locaux, les réglementations générales (e.g. PAC, directives sur la qualité de l'air, des sols, les charges critiques en azote des eaux, directive habitats) ou encore les changements globaux (e.g. scénarios climatiques du GIEC<sup>40</sup>).

## II.5.2 Modélisation de la cascade de l'azote et quantification des pertes d'azote dans les paysages ou petits territoires

Etant donné que le projet vise à produire des résultats utilisables par les partenaires du développement, il est nécessaire d'améliorer les connaissances sur les processus de la cascade de l'azote et de développer des outils de modélisation fiables. Ces derniers permettront d'une part, de quantifier les différentes étapes de la cascade de l'azote, les flux et les pertes d'azote dans les différents compartiments (terrestre, atmosphérique, aquatique) du paysage et d'autre part, d'évaluer les scénarios de gestion de l'azote dans les territoires. Cette approche de modélisation intégrée et interdisciplinaire est un des aspects novateurs du projet, en associant plusieurs composantes du territoire jamais encore réellement couplées simultanément : physique des transferts (par voies atmosphérique et hydrologique), agro-écologique (allocation des terres, aménagement du paysage), biogéochimique et anthropique (pratiques agricoles et gestion des exploitations). Elle permettra d'établir des synergies et un partage de concepts entre des disciplines jusqu'à présent relativement disjointes car s'intéressant à différentes formes d'azote ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , DON,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), à différents processus dans les divers compartiments de l'environnement (transferts atmosphériques, hydrologiques, biogéochimiques dans les sols et les plantes, anthropiques...) ou encore à des enjeux environnementaux différents (effet de serre, eutrophisation, acidification, biodiversité, pollution photo-oxydante). Ces travaux sont développés dans la tâche 2 du projet et s'appuient principalement sur les deux modèles de cascade de l'azote dans les paysages NITROSCAPE (Duret et al., 2011 ; [A11]) et CASIMOD'N (Moreau et al., 2013). Des recherches seront également menées pour améliorer la modélisation de processus spécifiques (e.g. dénitrification et émissions de  $\text{N}_2\text{O}$ , transferts d'azote organique dissous et de  $\text{NH}_4$ , émissions ammoniacales par les animaux et les effluents d'élevage, dépôts atmosphériques) et intégrer d'autres modèles (e.g. prairies, forêts, zones humides) permettant de simuler les flux d'azote dans l'ensemble des compartiments des paysages.

Pour calibrer ces modèles et évaluer leur capacité à simuler les processus de la cascade de l'azote et les pertes d'azote dans l'environnement, le projet utilisera les données de trois sites (Auradé, Gers ; Orgeval, Seine-et-Marne ; Kervidy-Naizin/ORE AGRHYS, Morbihan) pour l'application des modèles, ainsi qu'un site (OS<sup>2</sup>, Eure-et-Loir) plus spécifiquement dédié à la quantification des émissions indirectes de  $\text{N}_2\text{O}$ . Ces sites se caractérisent *a priori* par une large gamme et variabilité de flux d'azote en raison de différences de i) localisations et intensités des sources (zones de cultures vs. zones d'élevage), ii) systèmes de cultures (incluant la nature des cultures, leur succession et les itinéraires techniques), iii) climat (Bretagne, Bassin parisien, Sud-Ouest), iv) topographie, sols et drainage et v) présence plus ou moins marquée de zones semi-naturelles ou forêts. Tous ces sites présentent un fonctionnement hydrologique superficiel favorisant les interactions spatiales à l'échelle du paysage. Les trois sites d'application sont labellisés SOERE<sup>41</sup>, ce qui permet déjà de disposer d'une grande quantité d'informations pour calibrer les modèles et en évaluer les sorties intermédiaires par compartiments ou par formes d'azote, ou encore les sorties intégrées (e.g. bilans d'azote) à l'échelle du site. Les données disponibles sur ces sites seront complétées par des mesures des flux et concentrations d'azote dans les différents compartiments, ainsi que par la collecte de données d'inventaires ou relatives aux pratiques auprès des agriculteurs, des coopératives, des instituts techniques et des acteurs locaux. La définition des protocoles de mesures et d'échantillonnage spatio-temporel, ainsi que la collecte des données d'inventaires font l'objet de la tâche 4. La base de données développée dans la tâche 5 permettra leur organisation, maintenance et archivage.

<sup>40</sup> Groupe d'Experts intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

<sup>41</sup> SOERE : Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement.

### **II.5.3 Modélisation de la cascade de l'azote et quantification des flux et pertes d'azote dans des territoires plus vastes**

L'enjeu de la tâche 3 est de changer d'échelle, et donc d'outils, dans la description du paysage et la prise en compte de son effet sur les transferts d'azote par voies atmosphérique et hydrologique. Il est en effet illusoire, lorsqu'on travaille à l'échelle de territoires de plusieurs centaines, voire milliers de km<sup>2</sup>, de vouloir décrire le paysage de manière exhaustive comme un ensemble d'éléments dont chacun joue un rôle fonctionnel bien identifié et localisé. Il s'agit donc d'abord de définir des motifs caractéristiques de l'agencement de ces éléments dont la répétition et l'assemblage permettent de représenter le paysage type d'un territoire. Cette description synthétique du paysage sera alors incorporée dans les modèles existants à l'échelle de territoires plus vastes pour simuler les transferts d'azote dans les compartiments hydrologique (e.g. Billen et Garnier, 2000 ; Ferrant et al., 2011) et atmosphérique (e.g. Hamaoui-Laguel et al., 2013 ; thèse en cours de N. Azouz, [G2]). Un enjeu de la tâche 3 consiste aussi à définir la manière d'intégrer les connaissances acquises dans la tâche 2, notamment celles concernant l'effet des pratiques agricoles et des structures paysagères sur les pertes d'azote, pour produire des outils et des bases scientifiques au raisonnement de la gestion de l'azote dans les territoires plus vastes.



## II.6 Contribution à l'animation de l'équipe Biosphère-Atmosphère et de l'UMR EGC

### II.6.1 Animation de l'axe scientifique « Intégration des flux de polluants et de gaz à effet de serre aux échelles supra-parcellaires » dans l'équipe Biosphère-Atmosphère

Lorsque j'ai intégré l'équipe Biosphère-Atmosphère en 2005, de nombreux travaux y étaient déjà menés depuis plus d'une dizaine d'années sur la problématique « azote ». Coordinés par P. Cellier, ils portaient, d'une part sur l'acquisition de connaissances sur chacun des processus liés aux émissions, transferts et dépôts de composés azotés gazeux dans la basse atmosphère et, d'autre part, sur l'acquisition de compétences en métrologie et en modélisation. Les approches se situaient aux échelles locale (mesures et modélisations des flux de NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>), parcellaire (modèles biophysiques de culture de type CERES ou STICS intégrés dans des modèles de bilans environnementaux) et régionale (liens avec des équipes, e.g. de l'IPSL, INERIS<sup>42</sup>, LISA, développant des modèles méso-échelle et de circulation générale).

La mise en commun de ces travaux a fait ressortir un fort besoin d'intégration des connaissances à une échelle située entre les échelles parcellaire et régionale. Mon arrivée dans l'équipe Biosphère-Atmosphère a permis d'aborder une nouvelle échelle d'étude des transferts d'azote dans l'équipe, l'échelle du paysage agricole, avec la prise en compte explicite de ses hétérogénéités spatiales. Cette échelle permettait ainsi d'aborder sous un nouvel angle la complexité des transferts d'azote verticaux (interactions sol-plante-atmosphère) et horizontaux par voies atmosphérique et hydrologique (échanges entre parcelles et exploitations voisines, transferts de pollution entre agro-écosystèmes). Elle est essentielle pour mieux comprendre la cascade de l'azote et quantifier les flux et pertes d'azote dans l'environnement (cf. § II.4.1). Suite à l'évaluation collective de l'UMR EGC en 2008, l'équipe Biosphère-Atmosphère a été structurée en deux axes (Fig. 36) : l'axe « Processus aux échelles infra-parcellaires » correspondant aux recherches historiques de l'équipe et le nouvel axe « Intégration aux échelles supra-parcellaires » dont je suis animateur ([F4]).

En termes d'objectifs, les recherches de l'équipe aux échelles supra-parcellaires s'inscrivent dans le même contexte que celui décrit dans la section II.4 sur la cascade de l'azote dans les territoires. Elles visent à contribuer aux recherches sur les impacts des activités agricoles sur l'environnement et les changements globaux, et réciproquement. Les changements globaux incluent l'évolution des facteurs d'origine naturelle (climat, conditions de sol) et anthropique liée au contexte socio-économique, aux réglementations générales (e.g. politique des prix, directives environnementales, aménagement des territoires) ainsi qu'aux choix techniques des agriculteurs (e.g. apports d'intrants azotés et phytosanitaires, changements d'allocation des terres). Les recherches de l'équipe contribueront *in fine* à évaluer les impacts de ces changements sur la production des agro-écosystèmes (rendement en biomasse) et la qualité des milieux (qualité de l'air et bilans de GES principalement pour ce qui concerne l'équipe, mais aussi qualité des sols et des eaux traités en collaboration).

Dans ce contexte, les questions de recherche de l'équipe aux échelles supra-parcellaires consistent à :

- caractériser les sources et les puits et quantifier les flux abiotiques (polluants, GES) et biotiques (maladies, pollens) dans des territoires allant de la parcelle au pays ; améliorer les estimations de ces flux et bilans et réduire les incertitudes ;
- évaluer la contribution relative des flux verticaux et latéraux, en tenant compte des interactions spatiales entre sources et puits, sur les flux abiotiques et biotiques dans les agro-écosystèmes ;
- évaluer les impacts environnementaux des facteurs naturels (climat, sol) et anthropiques (pratiques agricoles, changements d'affectation des terres, ré-organisation des paysages...)

---

<sup>42</sup> IPSL : Institut Pierre-Simon Laplace ; INERIS : Institut National de l'Environnement industriel et des RISques.

sur les flux et bilans ;

- contribuer à la mise en œuvre de stratégies d'atténuation des émissions de polluants et de GES dans l'environnement et d'adaptation des systèmes de production, et à préciser les échelles pertinentes de leur mise en œuvre.

Pour répondre à ces questions, trois grandes approches d'intégration aux échelles supra-parcellaires sont développées et mises en œuvre dans l'équipe (Fig. 36). Si chacune de ces approches permet de répondre à des objectifs et applications spécifiques, elles n'en demeurent pas moins complémentaires :

- la première approche développée depuis plus d'une dizaine d'années consiste à spatialiser les outils développés à l'échelle parcellaire (e.g. modèles VOLT'AIR, Génormont et al., 1997 ; CERES-EGC, Gabrielle et al., 2006) pour prédire la production de biomasse et de composés carbonés et azotés (e.g. rendements, émissions de NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, bilans de GES) et réaliser des cadastres d'émissions à des échelles régionales à nationales (e.g. Gabrielle et al., 2012). Cette approche a aussi abouti à l'évaluation environnementale (bilans de GES) des pratiques agricoles et de filières de production en mettant en œuvre des analyses du cycle de vie des composés carbonés et azotés (e.g. Dufossé et al., 2014, sous presse, [A3]). Je contribue aux travaux de l'équipe utilisant cette approche par le co-encadrement de la thèse de K. Dufossé ([G3]) et celui d'une thèse en projet ([G1]) ;
- la deuxième approche d'intégration prend en compte les hétérogénéités spatiales au sein de petits territoires ou paysages. Elle a été possible et développée avec mon arrivée dans l'équipe. Elle a été largement décrite dans la section II.4 et j'y contribue donc directement, entre autres par le co-encadrement de la thèse de S. Duret ([G4]), la coordination et mon implication dans les diverses tâches du projet ESCAPADE (cf. § II.4.3), avec des activités d'encadrement ([G1], [G2], [G6], [G7], [G9]). Si cette approche permet de traiter les interactions spatiales à courte distance, il n'est pas envisageable, compte tenu du nombre de données nécessaires et des temps de simulation, de l'appliquer pour traiter les transferts de polluants à longue distance ;
- la troisième approche consiste donc à coupler les outils développés dans l'équipe avec des modèles simulant les flux, en particulier atmosphériques, à des échelles régionales à continentales. Ces recherches permettent ainsi d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur la qualité de l'air à ces échelles et d'explicitier les échanges de surface dans les modèles de chimie atmosphérique (e.g. Rolland et al., 2010 ; Hamaoui-Laguel et al., 2013). Je contribue aux travaux de l'équipe utilisant cette approche en co-encadrant la thèse de N. Azouz ([G2]) et en participant au projet ADEME sur les cadastres d'émissions d'ammoniac.

En termes d'outils développés ou mobilisés, les recherches de l'équipe s'appuient sur trois types d'outils dont certains que j'ai directement développés et/ou mobilisés dans mes recherches (cf. § II.4) :

- des dispositifs expérimentaux spatialisés et/ou à long terme (ORE ACBB, PRO, AgrHys, Orgeval, Auradé, OS<sup>2</sup>), des réseaux de mesures (réseau NH<sub>3</sub>, qualité de l'air) et des bases de données spatialisées (issues d'enquêtes et d'inventaires) ;
- des modèles intégrés mobilisant ces données et qui sont développés et/ou utilisés, soit à l'échelle de la parcelle avec leur spatialisation agrégative aux échelles supra-parcellaires, soit à l'échelle de paysages en prenant en compte les interactions spatiales entre éléments paysagers (CERES-EGC, NITROSCAPE, modèle BioAtm en construction à partir des modèles développés dans l'équipe aux échelles infra-parcellaires) ;
- des scénarios permettant de tester, à partir des modèles, l'effet des décisions techniques des agriculteurs, des directives environnementales, des politiques économiques, des changements climatiques sur la production et le bilan environnemental des agro-écosystèmes.

Mes recherches actuelles et perspectives mobilisent les questions, approches et outils mis en œuvre dans l'équipe Biosphère-Atmosphère. Elles s'insèrent donc directement dans les recherches et perspectives de l'équipe. Parmi celles-ci, outre la poursuite du développement et de l'utilisation des

modèles CERES-EGC d'une part et NITROSCAPE d'autre part, des travaux en cours visent à intégrer plusieurs modèles de l'équipe simulant les flux de polluants (azotés et pesticides) dans les compartiments biophysique et atmosphérique (CERES-EGC, VOLT'AIR, SURFATM, FIDES) dans un modèle d'équipe pour l'instant appelé « modèle BioAtm ». Ce modèle couplé pourrait remplacer à terme le modèle CERES-EGC déjà intégré dans NITROSCAPE, ainsi que les modèles SURFATM et FIDES en cours d'intégration dans NITROSCAPE, et aussi le modèle VOLT'AIR. L'un des intérêts du modèle BioAtm est qu'il permettrait de simuler de manière encore plus cohérente les flux de polluants dans les agro-écosystèmes en couplant plus intimement la production de biomasse, les échanges sol-végétation-atmosphère, les transferts de polluants par voie atmosphérique et les pertes environnementales d'azote et de pesticides. Je contribue au développement de ce modèle par diverses discussions au sein de l'équipe, l'encadrement de C. Blanchon sur la spatialisation de FIDES-3D-SURFATM en collaboration avec B. Loubet, E. Personne et O. Maury ([G9]), l'adaptation de CERES-EGC dans NITROSCAPE en collaboration avec O. Maury et B. Gabrielle, ou encore l'encadrement de M. Carozzi en collaboration avec R. Massad ([G8]). Le couplage de ces modèles avec VOLT'AIR est aussi prévu dans une phase ultérieure, en collaboration avec S. Générmont et C. Bedos. Ces travaux de modélisation et de couplage sont fortement fédérateurs des activités de l'équipe, les modèles étant de bons supports de discussion, notamment entre les deux axes thématiques de l'équipe (Fig. 36).

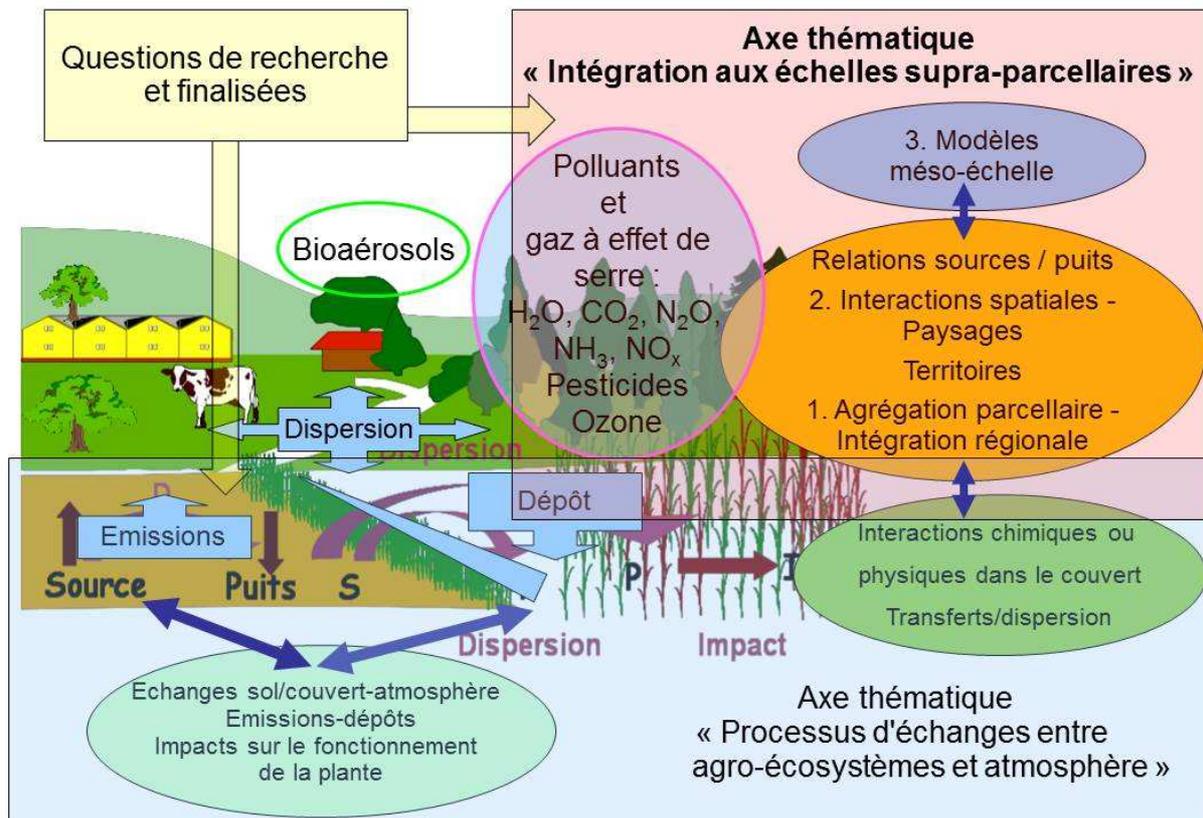


Fig. 36. Structuration de l'équipe Biosphère-Atmosphère en deux axes thématiques. Les numéros 1, 2 et 3 correspondent aux trois approches décrites dans le texte.

## II.6.2 Contribution aux recherches intégrées de l'UMR ECOSYS

Mes recherches et perspectives s'insèrent également dans le projet de l'UMR ECOSYS (« Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agro-écosystèmes ») qui résulte au 1<sup>er</sup> janvier 2015 de la fusion des UMR EGC et PESSAC<sup>43</sup> et de l'équipe « Matières Organiques des Sols » de l'UMR BIOEMCO (devenue IEES Paris). Le cadre conceptuel de l'UMR ECOSYS (Fig. 37) est l'évaluation des impacts des pratiques agricoles et leur gestion intégrée à l'échelle des territoires, ainsi que l'amélioration des services écosystémiques<sup>44</sup> rendus par l'agriculture à la société (production de biomasse, protection des milieux naturels, maintien de la biodiversité...).

Dans ce cadre, les recherches consisteront par exemple à évaluer l'effet de différentes stratégies de lutte contre les maladies fongiques sur les risques de pertes de rendement, l'effet de stratégies de maintien de la biodiversité, les effets croisés des changements climatiques et des stress liés à l'ozone atmosphérique sur la photosynthèse et le rendement des cultures. D'autres exemples, concernant plus particulièrement mes recherches, porteront sur l'évaluation de stratégies d'atténuation des émissions de polluants et de GES et d'adaptation des agro-écosystèmes aux changements globaux, tout en cherchant à maintenir les capacités de production des agro-écosystèmes. Les changements globaux à prendre en compte (Fig. 37) incluent d'une part les forçages historiquement étudiés par les unités constitutives de l'UMR, qu'ils soient de nature environnementale (e.g. conditions pédo-climatiques actuelles, changements climatiques) ou agronomique (actions techniques menées par l'agriculteur e.g. changements des pratiques culturales tels que les apports d'intrants azotés, de pesticides, de produits résiduels organiques, le travail du sol, les choix variétaux, les changements des usages et des occupations des sols). Ils incluent également des forçages sociétaux moins directement pris en compte dans les recherches des unités de l'UMR ECOSYS. Ces forçages sont de nature politique (e.g. Politique Agricole Commune, politiques d'aménagement du territoire, ré-organisation des paysages), réglementaire (e.g. directives relatives à la qualité de l'air, des eaux, des sols, à la biodiversité) ou encore économique (e.g. prix des produits agricoles et des intrants, demande en biomasse alimentaire ou non-alimentaire, structure des filières agricoles au sein des territoires).

D'une manière générale, les recherches historiques des trois UMR constitutives de l'UMR ECOSYS portent sur les relations entre la structure et le fonctionnement des objets constitutifs des agro-écosystèmes, par l'étude des processus élémentaires et leur intégration à différentes échelles spatiales, de la parcelle à la région, et temporelles, du cycle cultural à des échelles pluri-annuelles. Ces recherches sont essentielles afin d'apporter un éclairage scientifique aux questions relatives à la gestion intégrée des territoires et à l'évaluation des services écosystémiques. La notion de service écosystémique fait appel aux concepts de l'écologie fonctionnelle et de l'agroécologie<sup>45</sup> qui seront à mobiliser dans les réflexions et la mise en œuvre de l'UMR ECOSYS.

---

<sup>43</sup> PESSAC : Physicochimie et Ecotoxicologie des Sols d'Agrosystèmes Contaminés ; BIOEMCO : BIOgéo chimie et Ecologie des Milieux Continentaux ; IEES Paris : Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris.

<sup>44</sup> La notion de **service écosystémique** apparaît pour la première fois dans la littérature scientifique anglo-saxonne à la fin des années 1970 (« ecosystem services »). Plus tard, Costanza et al. (1997) proposent une évaluation monétaire des services écosystémiques et du capital naturel à l'échelle mondiale. Dans l'Evaluation des écosystèmes pour le millénaire (MEA, 2005), les services écosystémiques sont définis comme étant les bénéfices que les êtres humains tirent des écosystèmes. Ces services sont classés en quatre catégories : les services d'approvisionnement, les services de régulation, les services culturels et les services de support.

<sup>45</sup> L'**agroécologie** peut globalement être définie comme un ensemble cohérent permettant de concevoir des systèmes de production agricole qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes, de réduire les pressions sur l'environnement et de préserver les ressources naturelles. En termes scientifiques, l'agroécologie peut s'entendre comme une discipline au carrefour de l'agronomie, de l'écologie et des sciences sociales, et privilégiant les approches systémiques. Enfin, lorsqu'ils sont présents, les mouvements agroécologiques se construisent plutôt en marge d'un courant dominant de modernisation de l'agriculture, et ils promeuvent le développement rural, la souveraineté alimentaire et une agriculture respectueuse de l'environnement (Schaller, 2013).

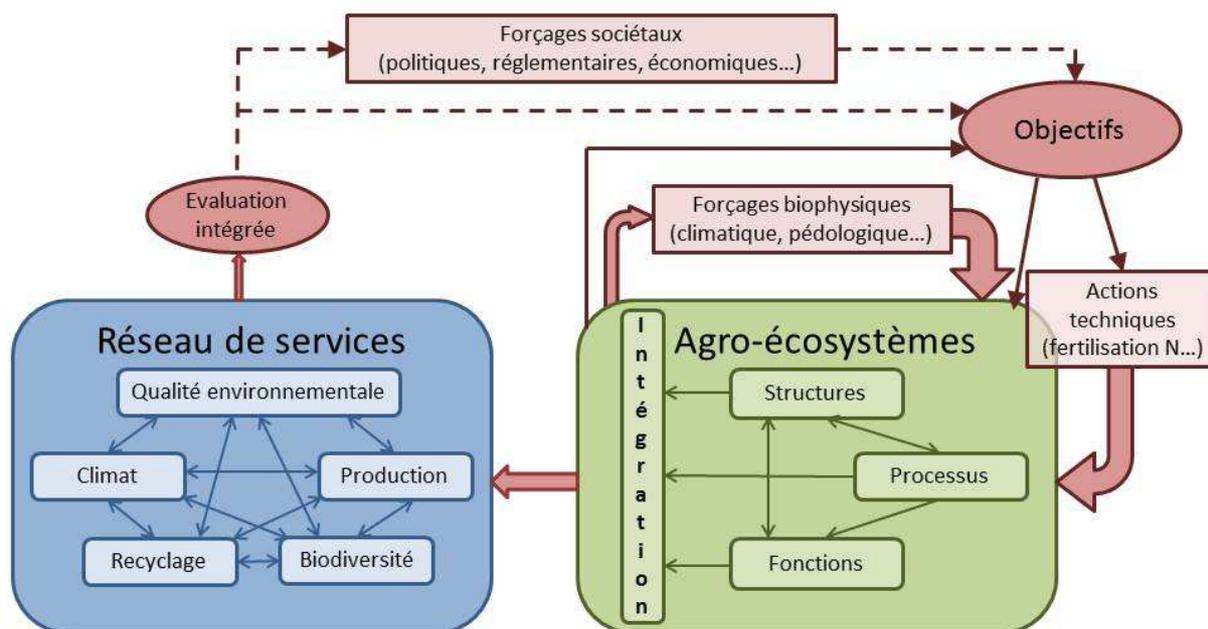


Fig. 37. Schéma conceptuel du projet de l'UMR ECOSYS (en discussion dans l'UMR).

Dans ce contexte, je contribue depuis 2013 à l'animation d'un groupe de réflexion transversal portant sur les démarches d'intégration des processus, structures et fonctions des agro-écosystèmes à mener dans l'UMR ([F3]). Je participe également au groupe de réflexion portant sur la protection et l'amélioration de la qualité de l'environnement (air, eaux, sols). Ces réflexions ont été synthétisées dans le projet de l'UMR ECOSYS présenté dans le rapport d'évaluation collective auquel j'ai contribué en 2013.

Différents projets fédérateurs de l'UMR ECOSYS sont en réflexion, notamment autour du climat, des maladies, de la gestion territoriale des intrants, de l'évaluation intégrée. Compte tenu de mes expériences passées et de mes activités actuelles, j'ai pour projet de contribuer à cette phase de structuration de l'UMR, principalement autour de la gestion territoriale des intrants (flux d'azote, de pesticides, recyclage des produits résiduels organiques, stockage de carbone). Une activité d'animation interne à l'UMR ECOSYS sera à mener entre les personnes des différentes équipes impliquées sur ce thème. Elles pourront se nourrir des réflexions et travaux sur la gestion territoriale des ressources, menés dans d'autres UMR du département Environnement et Agronomie (e.g. SAS à Rennes, ISPA<sup>46</sup> à Bordeaux, AGIR à Toulouse) ou encore des équipes du Labex BASC ou de la Fédération de Recherche FIRE.

<sup>46</sup> ISPA : Interaction Sol Plante Atmosphère ; AGIR : AGrosystèmes et développement territorial.



## II.7 Conclusions et perspectives générales

Etant d'origine agricole, j'ai cotoyé de près durant mes premières années les problématiques agricoles et environnementales des années 1970-80 et la profonde évolution de l'agriculture et de sa place dans la société. Dans les années 1970, l'agriculture était encore dans la dynamique productive de l'après-guerre visant à assurer l'autosuffisance alimentaire du pays, sans réellement se préoccuper de ses impacts environnementaux. Dans les années 1980-90, malgré la prise de conscience des impacts négatifs de l'activité agricole et la mise en place de politiques agricoles (Mesures Agri-Environnementales de la Politique Agricole Commune, MAE-PAC) et d'action publique (Contrats Territoriaux d'Exploitation, CTE), la qualité de l'environnement a continué de se dégrader : pollution des milieux (eaux, sols, air) et des ressources, réchauffement climatique, perte de biodiversité, simplification des paysages en lien avec la concentration et la spécialisation des exploitations agricoles. Afin de rester proche des questions du monde agricole et traitant des interactions entre agriculture et environnement, ainsi que de la gestion des territoires et des ressources, j'ai entrepris au début des années 1990 des études d'agronomie sans toutefois imaginer que je me destinerais à la recherche. Je me suis spécialisé dans des disciplines orientées vers l'environnement et utilisant des approches biophysiques. Mes premières expériences à l'INRA de Bordeaux puis en Afrique sahélienne m'ont fait découvrir comment la recherche pouvait contribuer à une meilleure gestion des ressources (sylviculture, agriculture, agro-pastoralisme...) à des échelles régionales, en utilisant diverses méthodes de représentation et d'analyse de ces territoires. Elles m'ont préparé aux recherches que j'ai développées par la suite et tout particulièrement ma thématique actuelle et mes perspectives. Celles-ci s'inscrivent dans les nouveaux enjeux de l'agriculture, notamment avec la prise de conscience depuis les années 2000 (e.g. programme Millenium Ecosystem Assessment, MEA) du caractère multifonctionnel de l'activité agricole et de ses impacts positifs sur les écosystèmes et les populations (e.g. services d'approvisionnement, de régulation, culturels, durabilité des écosystèmes, entretien des paysages, maintien de l'activité en milieu rural).

Mes activités de recherche ont débuté dans le contexte des années 1990 d'une agriculture productive et respectueuse de l'environnement par une meilleure gestion des intrants et des ressources naturelles. Dans une première phase (1994-2007), mes recherches en écophysologie végétale ont notamment permis d'aboutir à la production d'un modèle intégré couplant les structures (structures 3D de plantes en peuplements) et les fonctions (processus d'acquisition et de répartition de l'azote et du carbone dans ces structures 3D) à des échelles infra-parcellaires, allant de l'organe au peuplement végétal. En 2004, j'ai souhaité évoluer vers des problématiques s'insérant plus directement dans les nouveaux enjeux agro-environnementaux visant à atténuer les pertes d'azote dans l'environnement et adapter les systèmes de production actuels. Un des défis était de trouver des leviers de gestion de l'azote et des agro-écosystèmes à des échelles supra-parcellaires, tout en tenant compte des processus aux échelles infra-parcellaires. La recherche de tels leviers nécessite de développer des approches intégrant diverses disciplines, différentes échelles spatio-temporelles et plusieurs niveaux d'organisation. J'ai donc mené dans une deuxième phase (depuis 2005) des recherches contribuant à la problématique de la gestion de l'azote à des échelles plus larges que précédemment, principalement celle du paysage agricole, notamment en développant des travaux de modélisation des flux et pertes d'azote à ces échelles. Ces recherches étaient innovantes, non seulement pour moi avec de nouveaux questionnements et concepts, mais aussi pour les équipes scientifiques nationale et européenne. Mes travaux antérieurs sur le fonctionnement des plantes m'ont ainsi préparé, par l'acquisition de compétences en recherche agro-environnementale, à la prise en charge de cette nouvelle thématique. Celle-ci présente des aspects similaires à la précédente (e.g. démarche intégratrice et multi-disciplinaire, objet d'étude « azote » en lien avec le carbone, modélisation en association avec l'expérimentation, construction et évaluation de scénarios) et aussi des différences (e.g. questions de recherche, réseaux scientifiques, échelles d'étude). Je me suis en particulier fortement impliqué, que ce soit en tant que participant ou en coordinateur, au sein de réseaux et projets nationaux et européens, dans le développement d'un

modèle intégré couplant les structures (structures des exploitations et des mosaïques paysagères) et les fonctions (flux d'azote dans les exploitations et les mosaïques paysagères) à des échelles supra-parcellaires. Dans les deux phases de mes recherches, la modélisation a été incontournable pour tester des hypothèses, comprendre et quantifier les systèmes complexes que sont les plantes, les peuplements, les paysages, les territoires plus vastes et plus généralement les agro-écosystèmes. La modélisation est complémentaire de la collecte de données issues d'expérimentations, d'enquêtes, d'inventaires ou de dires d'experts, activités indispensables dans lesquelles je me suis aussi impliqué. A partir d'une approche basée sur la construction de scénarios, la démarche a consisté ou consiste ensuite à utiliser ces modèles pour évaluer l'effet de, et les interactions entre, la gestion des structures sur leurs fonctions et finalement sur les pertes d'azote d'origine agricole et les bilans de gaz à effet de serre dans les agro-écosystèmes.

Mes origines, ma formation initiale, mon évolution en terme de thématique scientifique et mes travaux dans des disciplines variées (agronomie, écophysologie, bioclimatologie, sciences du sol, physique des transferts, télédétection, spatialisation, modélisation mathématique, statistiques) et à différentes échelles (depuis l'échelle élémentaire de l'organe ou de l'agrégat de sol jusqu'à l'échelle régionale, en passant par les échelles du peuplement végétal, de la parcelle, de l'exploitation agricole, du paysage et du territoire plus vaste) m'ont ainsi permis d'acquérir une vision globale des problématiques et recherches sur les transferts d'azote et sa gestion dans les agro-écosystèmes, d'appréhender les structures, les fonctions et leurs interactions dans les agro-écosystèmes, ainsi que les problématiques de changement d'échelle sous différents points de vue (Fig. 1). Je suis ainsi capable d'effectuer des allers et retours en croisant, en fonction des objectifs et des hypothèses, les différentes disciplines impliquées et les différents niveaux d'échelles, et en raisonnant sur le triptyque modèles intégrés / données spatialisées / scénarios agro-environnementaux. L'ensemble de mes activités m'a permis d'acquérir une démarche scientifique intégratrice, modélisatrice, expérimentale, interdisciplinaire et multi-partenariale dont j'ai fait bénéficier l'équipe Biosphère-Atmosphère notamment. Cette démarche holistique est essentielle pour aborder les questions de recherche liées aux nouveaux enjeux de l'agroécologie et des services écosystémiques rendus par l'agriculture.

Dans la continuité de mes travaux actuels, mes perspectives contribueront aux recherches visant à comprendre et à évaluer les impacts environnementaux des activités agricoles. L'hypothèse générale de mes perspectives est que l'atténuation des pertes environnementales et la durabilité de l'agriculture et des territoires (économique, environnementale, sociale et sociétale) nécessite de repenser l'organisation des territoires en adaptant les structures des agro-écosystèmes aux changements globaux et aux relations actuelles entre agriculture et environnement. Mon projet de recherche à court terme consiste à poursuivre l'évaluation des impacts des activités agricoles et des aménagements paysagers sur la cascade de l'azote dans les territoires. Ces recherches visent à produire des outils et des références (modèles intégrés, bases de données sur les flux d'azote, scénarios agro-environnementaux) pour tester, de manière quantitative (i.e. à partir d'approches mécanistes, basées sur les processus, et intégrées), différentes évolutions des agro-écosystèmes (cf. perspectives présentées dans la section II.5). Ces modèles seront des outils pour identifier des leviers supra-parcellaires de gestion de l'azote et proposer des pistes et des recommandations pour atténuer les pertes environnementales d'azote et adapter les systèmes de production et l'organisation des territoires aux changements globaux. Ils pourront aussi devenir à terme des outils opérationnels de raisonnement de la gestion de l'azote et de l'espace dans les agro-écosystèmes.

En coordonnant le montage puis le déroulement du projet ESCAPADE, j'en ai fait le support contractuel de mon projet de recherche en y intégrant les différentes composantes de mes activités. Le projet ESCAPADE est un projet d'ampleur par le nombre de partenaires impliqués (19) et l'aide allouée par l'ANR (1057 k€). Après ma forte ré-orientation thématique en 2005, il est le résultat et la reconnaissance de quelques années d'un ensemble cohérent d'activités de recherche et d'animation autour de la modélisation des flux et des pertes d'azote aux échelles supra-parcellaires (paysages principalement, mais aussi exploitations agricoles et territoires plus vastes). Ces activités mobilisent les compétences que j'ai acquises dans les précédents projets (dont plusieurs européens), que ce soit

sur l'animation de projets multi-partenaires, les démarches intégratrices nécessaires pour répondre aux objectifs du projet, la modélisation de la cascade de l'azote, la collecte de données de terrain issues d'expérimentations, d'enquêtes ou d'inventaires pour la calibration et l'évaluation des modèles, la construction et l'évaluation de scénarios agro-environnementaux. Le projet ESCAPADE prend aussi une dimension plus large que celles que j'ai traitées jusqu'à présent, que ce soit en termes d'objectifs, d'échelles, de partenaires mobilisés ou encore d'applications et transferts possibles des résultats et outils de mes recherches : transfert vers les instituts techniques et les acteurs locaux, contribution à des modules de formation, par exemple pour l'Université Virtuelle en Agro-Ecologie à laquelle une contribution est prévue dans les dernières années du projet ESCAPADE. Par ailleurs, j'ai montré mon implication dans d'autres projets et structures INRA (équipe BioAtm, UMR EGC, département EA), régionales, nationales et européennes, correspondant à des collectifs de recherche et à des partenariats avec le développement agricole. Mes activités sont ainsi bien structurées pour les quatre prochaines années, elles constitueront aussi le socle pour développer de nouvelles recherches dans les années suivantes.

Compte tenu de l'indissociabilité des cycles des éléments majeurs (azote, phosphore, carbone), il serait souhaitable à moyen terme d'intégrer l'ensemble de ces cycles, en couplant les travaux sur l'azote avec ceux, similaires en termes de processus et d'échelles, menés sur le phosphore, notamment dans l'UMR ISPA à Bordeaux. Il pourrait aussi être envisageable à moyen terme de confronter les approches sur les transferts biophysiques de l'azote dans les territoires décrites dans ce mémoire avec d'autres points de vue développés dans les équipes constitutives de l'UMR ECOSYS. La confrontation des points de vue pourrait porter sur les objets d'étude (pesticides, produits résiduels organiques, en lien avec les flux de carbone i.e. stockage, remobilisation, émissions), les concepts utilisés dans plusieurs disciplines de l'UMR ECOSYS (bioclimatologie, physique des transferts, sciences du sol, écophysiologie, écologie, agroécologie, écotoxicologie) ou encore les échelles spatiales (organe ou agrégat de sol, plante, peuplement, parcelle agricole, paysage, territoire). Des réflexions ont été engagées dans l'équipe Biosphère-Atmosphère et plus largement dans les équipes de l'UMR ECOSYS. J'ai contribué à ces réflexions en tant qu'animateur de l'axe « Intégration des flux de polluants et de gaz à effet de serre aux échelles supra-parcellaires » de l'équipe Biosphère-Atmosphère et en participant ou animant des groupes de réflexion en vue de la constitution de l'UMR ECOSYS. Ces travaux seraient aussi à confronter à d'autres points de vue développés à l'INRA et plus particulièrement dans le département Environnement et Agronomie (e.g. en termes de modélisation avec les travaux menés autour des plateformes OpenFLUID et RECORD). Par exemple, des réflexions sont déjà engagées sur la modélisation intégrée du devenir des pesticides dans les paysages avec notamment l'UMR LISAH<sup>47</sup> (Montpellier) dans le cadre d'un projet inter-unités du département EA. Elles permettront aussi de confronter les approches de modélisation développées dans NITROSCAPE et OpenFLUID sur deux types d'intrants (azote et pesticides).

Pour aller plus loin dans ces réflexions, j'envisage de continuer à m'impliquer dans ces activités d'animation dans l'équipe Biosphère-Atmosphère et dans l'UMR ECOSYS sur la gestion territoriale des intrants (azote, pesticides, produits résiduels organiques) à partir d'approches intégrées, notamment la modélisation intégrée et l'analyse de cycle de vie. De même que dans mes propres recherches, l'objectif sera de fournir des outils et des références permettant de mieux maîtriser la gestion des intrants et ainsi de réduire les pertes environnementales et préserver ou restaurer la qualité des milieux (air, eaux, sols). Ces réflexions et travaux s'insèrent plus largement dans des dispositifs régionaux auxquels je participe (e.g. Labex BASC ; FIRE), nationaux (Méta Programme EcoServ du département Environnement et Agronomie ; chantier agroécologie de l'INRA ; projet ESCAPADE qui regroupe des disciplines variées et divers partenaires de la recherche, du développement et des acteurs locaux ; RMT Fertilisation et Environnement dont un nouvel axe concerne la maîtrise des cycles biogéochimiques à différentes échelles et niveaux d'organisation) ou encore européens (projets ECLAIRE et ANIMALCHANGE en cours et suites éventuelles). Dans la continuité de mon implication dans l'UMT GES-N<sub>2</sub>O sur les émissions indirectes de N<sub>2</sub>O dans les territoires, j'interviendrai dans l'animation du projet d'UMT ALTER'N, déposé en 2014 pour quatre

---

<sup>47</sup> LISAH : Laboratoire d'Etude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème.

ans, s'il est retenu. Ce projet vise à fournir des références et des outils pour connaître et mieux gérer les sources d'azote alternatives à l'azote minéral (azote symbiotique et produits résiduaux organiques) pour des systèmes de grandes cultures productifs et à faibles pertes azotées.

Au cours des différentes phases de mes activités (Fig. 1), j'ai toujours été intéressé pour aller vers de nouveaux fronts de recherche en mobilisant de nouveaux concepts : apport de la télédétection pour la gestion des ressources sylvicoles et agricoles, apport de l'approche structure-fonction pour la modélisation architecturale des plantes et des peuplements en lien avec leur environnement, apport du concept de cascade de l'azote dans les paysages pour analyser les interactions spatiales intervenant dans les processus et les flux d'azote dans les paysages et mieux évaluer les émissions indirectes d'azote estimées jusqu'à présent de manière empirique. Ces recherches se sont traduites par mon implication dans l'animation et à la coordination de projets novateurs, dont dernièrement les projets NITROEUROPE et ESCAPADE. Ces recherches ont notamment abouti à 27 publications (dont 13 en premier auteur) dans des revues à comité de lecture et à 87 communications dans des conférences nationales et internationales. Elles ont donné lieu à l'encadrement de stagiaires de master (dont 6 sur la dernière thématique), de doctorants, de post-doctorants et d'ingénieurs. Parmi les trois doctorants encadrés sur ma dernière thématique, l'un est en deuxième année de thèse et les deux autres ont soutenu leur thèse et ont trouvé un emploi d'ingénieur dans une société de services en ingénierie informatique pour l'une et de maître de conférences à l'AgroParisTech pour l'autre. Les thèmes abordés, les démarches scientifiques mises en œuvre, les résultats et publications produits avec les doctorants que j'ai encadrés, puis les emplois qu'ils ont trouvés dans un domaine correspondant à leurs aspirations montrent l'intérêt que je porte au suivi des doctorants et à leur insertion professionnelle après la thèse. Afin d'améliorer la formation des doctorants et leur accompagnement dans des trajectoires professionnalisantes, j'ai suivi en 2014 une formation encadrants-doctorants d'une semaine organisée par l'INRA. J'ai également participé à quelques réunions organisées par l'Ecole Doctorale. Enfin, la production d'outils et de références sur la gestion territoriale des intrants à partir d'approches intégrées et interdisciplinaires est en plein essor et ouvre donc des perspectives de recherche qui devraient fournir de la matière à d'autres projets de thèse.

Dans ce mémoire, j'ai souvent utilisé le « je » pour présenter mes contributions effectives à des programmes de recherche plus larges. Au cours de mes différentes expériences très enrichissantes, j'ai eu la chance de pouvoir travailler avec des personnes de cultures et d'horizons divers, que ce soit dans différentes équipes ou en partenariat inter-disciplinaire et inter-institutionnel. La présentation de mes travaux et réflexions dans ce mémoire n'aurait pu être possible sans l'apport de toutes ces personnes que je remercie vivement. Mes recherches à venir continueront d'être menées en équipe(s) et en partenariat inter-disciplinaire et inter-institutionnel à partir du réseau déjà constitué.

## Références citées

- Anten NPR, Schieving F, Werger MJA, 1995. Patterns of light and nitrogen distribution in relation to whole canopy carbon gain in C-3 and C-4 mono- and dicotyledonous species. *Oecologia*, 101, 504-513.
- Beaujouan V, Durand P, Ruiz L, 2001. Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecological Modelling*, 137, 93-105.
- Beekmann M, Vautard R, 2010. A modelling study of photochemical regimes over Europe: robustness and variability, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 10067-10084.
- Berge E, Jakobsen HA, 1998. A regional scale multi-layer model for the calculation of long-term transport and deposition of air pollution in Europe. *Tellus B*, 50, 205-223.
- Bessagnet B, Hodzic A, Vautard R, Beekmann M, Cheinet S, Honoré C, Lioussé C, Rouil L, 2004. Aerosol modelling with CHIMERE - preliminary evaluation at the continental scale. *Atmospheric Environment*, 38, 2803-2817.
- Billen G, Garnier J, 2000. Nitrogen transfers through the Seine drainage network: a budget based on the application of the 'Riverstrahler' model. *Hydrobiologia*, 410, 139-150.
- Bonhomme R, Chartier P, Varlet-Grancher C, 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. II. Eclaircissement d'un plan horizontal au-dessus et aux différents niveaux de la culture. *Annales Agronomiques*, 22, 383-396.
- Bonhomme R, Varlet-Grancher C, 1978. Estimation of the gramineous crop geometry by plant profiles including leaf width variations. *Photosynthetica*, 12, 193-196.
- Bonhomme R, Ruget F, Derieux M, Vincourt P, 1982. Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents géotypes de maïs. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 294 Série III, pp. 393-398.
- Box GEP, Draper NR, 1987. *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. Wiley, p. 424.
- Boynard A, Beekmann M, Foret G, Ung A, Szopa S, Schmechtig C, Coman A, 2011. An ensemble assessment of regional ozone model uncertainty with an explicit error representation. *Atmospheric Environment*, 45, 784-793.
- Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy MH, Ruget F, Nicoullaud B, Gate P, Devienne-Barret F, Antonioletti R, Durr C, Richard G, Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plénet D, Cellier P, Machet JM, Meynard JM, Delécolle R, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- Brouwer R, 1962. Distribution of dry matter in the plant. *Netherlands Journal of Agricultural Sciences*, 10, 361-376.
- Cadet DL, Guillot B, 1991. EPSAT. Estimation des précipitations par satellite. ORSTOM, 63 pages.
- Chartier P, 1966. Etude du microclimat lumineux dans la végétation. *Annales Agronomiques*, 17, 571-602.
- Chelle M, Andrieu B, 1998. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies. *Ecological Modelling*, 111, 75-91.
- CITEPA, 2013. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Format SECTEN, 332 pages.
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, van den Belt M, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.
- de Wit CT, 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Rept 663*, Center for Agric. Publ. and Doc., Wageningen, 57 pages.

- Dragosits U, Theobald MR, Place CJ, Lord E, Webb J, Hill J, ApSimon HM, Sutton MA, 2002. Ammonia emission, deposition and impact assessment at the field scale: a case study of sub-grid spatial variability. *Environmental Pollution*, 117, 147-158.
- Dragosits U, Theobald MR, Place CJ, ApSimon HM, Sutton MA, 2006. The potential for spatial planning at the landscape level to mitigate the effects of atmospheric ammonia deposition. *Environmental Science and Policy*, 9, 626-638.
- Duncan WG, 1971. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. *Crop Science*, 11, 482-485.
- Edwards R, Larivé JF, Beziat JC, 2011. Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-To-Wheels Report, 545.
- EEA/EMEP Guidebook, 2009. EMEP/EEA Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Technical report No 9/2009.
- European Commission, 2009. Directive 2009/28/EC of the European parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Official Journal of the European Union, 5 June 2009.
- Evans JR, 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia*, 78, 9-19.
- Ferrant S, Oelher F, Durand P, Ruiz L, Salmon-Monviola J, Justes E, Dugast P, Probst A, Probst JL, Sanchez-Perez JM, 2011. Understanding nitrogen transfer dynamics in a small agricultural catchment: Comparison of a distributed (TNT2) and a semi distributed (SWAT) modeling approaches. *Journal of Hydrology*, 406, 1-15.
- Field C, Mooney HA, 1986. The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants. In: Givnish TJ (ed.), *On the Economy of Plant Form and Function*, Cambridge University Press, pp. 25-55.
- Flitcroft ID, Milford JR, Dugdale G, 1989. Relation point to average rainfall in semi arid West Africa and the implications for rainfall estimates derived from satellite data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45, 1557-1572.
- Fournier C, Andrieu B, 1998. A 3D architectural and process-based model of maize development. *Annals of Botany*, 81, 233-250.
- Gabrielle B, Laville P, Hénault C, Nicoullaud B, Germon JC, 2006. Simulation of nitrous oxide emissions from wheat-cropped soils using CERES. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74, 133-146.
- Gabrielle B, Boukari E, Bousquet P, Gagnaire N, Goglio P, Gossel A, Lehuger S, Lopez M, Massad R, Nicoullaud B, Pison I, Prieur V, Python Y, Schmidt M, Schulz M, Thompson R, 2012. Improved Assessment of the Greenhouse gas balance of bioNErgy pathways (IMAGINE). "Projet IMAGINE – synthèse sur le travail des deux années", UMR INRA AgroParisTech EGC Grignon.
- Gac A, Béline F, Bioteau T, Maguet K, 2007. A French inventory of gaseous emissions (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>) from livestock manure management using a mass-flow approach. *Livestock Science*, 113, 252-260.
- Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, Seitzinger SP, Howarth RW, Cowling EB, Cosby BJ, 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53, 341-356.
- Génermont S, Cellier P, 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88, 145-167.
- Girardin P, Tollenaar M, 1992. Leaf azimuth in maize: origin and effects on canopy patterns. *European Journal of Agronomy*, 1, 227-233.
- Godin C, Guédon Y, Costes E, Caraglio Y, 1997. Measuring and analysing plants with the AMAPmod software. In: Michalewicz MT (ed.), *Plants to ecosystems - Advances in Computational Life Sciences*, CSIRO, Australie, pp. 53-84.
- Goel NS, 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4, 1-212.
- Hamaoui-Laguel L, Meleux F, Beekmann M, Bessagnet B, Génermont S, Cellier P, Létinois L, 2013. Improving ammonia emissions in air quality modelling for France. *Atmospheric Environment*, sous presse.

- Hirose T, Werger MJA, 1987. Nitrogen use efficiency in instantaneous and daily photosynthesis of leaves in the canopy of a *Solidago altissima* stand. *Physiologia Plantarum*, 70, 215-222.
- Hirose T, Werger MJA, Pons TL, van Rheenen JWA, 1988. Canopy structure and leaf nitrogen distribution in a stand of *Lysimachia vulgaris* L. as influenced by stand density. *Oecologia*, 77, 145-150.
- Hutchings NJ, Dalgaard T, Rasmussen BM, Hansen JF, Dahl M, Jørgensen L F, Ernstsén V, von Platen-Hallermund F, Pedersen SS, 2004. Watershed nitrogen modelling. In: Hatch DJ, Chadwick DR, Jarvis SC, Roker JA (eds.), *Controlling Nitrogen Flows and Losses*, Wageningen Academic Publishers, ISBN 90-7699-984-34, pp. 47-53.
- Johnson IR, Thornley JHM, 1984. A model of instantaneous and daily canopy photosynthesis. *Journal of Theoretical Biology*, 107, 531-545.
- Jones CA, Kiniry JR, 1986. *CERES-Maize*, a simulation model of maize growth and development. College Station, A&M University Press, USA, 194 pages.
- Lacointe A, 2000. Carbon allocation among tree organs: a review of basic processes and representation in functional-structural tree models. *Annals of Forest Sciences*, 57, 521-533.
- Lamboni M, Makowski D, Lehuger S, Gabrielle B, Monod H, 2009. Multivariate global sensitivity analysis for dynamic crop models. *Field Crops Research*, 113, 312-320.
- Ledent JF, Henkart T, Jacobs B, 1990. Phénologie du maïs, visualisation de la croissance et du développement. *Revue Agriculture*, 43, 391-408.
- Legay JM, 1973. La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale. *Informatique et Biosphère*, 1, 5-73.
- Legay JM, 1997. *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*, collection Sciences en questions, Inra Editions.
- Lehuger S, Gabrielle B, van Oijen M, Makowski D, Germon JC, Morvan T, Hénault C, 2009. Bayesian calibration of the nitrous oxide emission module of an agro-ecosystem model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 133, 208-222.
- Lemaire G, Millard P, 1999. An ecophysiological approach to modelling resource fluxes in competing plants. *Journal of Experimental Botany*, 330, 15-28.
- Lemaire G, Onillon B, Gosse G, Chartier M, Allirand JM, 1991. Nitrogen distribution within a lucerne canopy during regrowth: relation with light distribution. *Annals of Botany*, 68, 483-488.
- Le Roux X, Walcroft AS, Daudet FA, Sinoquet H, Chaves MM, Rodrigues A, Osorio L. 2001. Photosynthetic light acclimation in peach leaves: importance of changes in mass:area ratio, nitrogen concentration, and leaf nitrogen partitioning. *Tree Physiology*, 21, 377-386.
- Loubet B, Asman WA, Theobald MR, Hertel O, Tang SY, Daemmgen U, Cellier P, Sutton MA, 2009. Ammonia deposition near hot spots: processes, models and monitoring methods. In: Sutton MA, Reis S, Baker M (eds.), *Atmospheric ammonia: detecting emission changes and environmental impacts*, pp. 205-267.
- Loubet B, Générmont S, Ferrara R, Bedos C, Decuq C, Personne E, Fanucci O, Durand B, Rana G, Cellier P, 2010. An inverse model to estimate ammonia emissions from fields. *European Journal of Soil Science*, 61, 793-805.
- MEA, Millenium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Wellbeing: Current State and Trends*, tome 1. Island Press, Washington DC.
- Meir P, Kruijt B, Broadmeadow M, Barbosa E, Kull O, Carswell F, Nobre A, Jarvis PG. 2002. Acclimation of photosynthetic capacity to irradiance in tree canopies in relation to leaf nitrogen concentration and leaf mass per unit area. *Plant, Cell and Environment*, 25, 343-357.
- Mollier A, 1999. Croissance racinaire du maïs (*Zea mays* L.) sous déficience en phosphore. Etude expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat, Université Paris XI, Centre d'Orsay, 194 pages.

- Monod H, Naud C, Makowski D, 2006. Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. In: Wallach D, Makowski D, Jones JW (eds.), *Working with Dynamic Crop Models*. Elsevier, Amsterdam, pp. 55-99.
- Monsi M, Saeki T, 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 14, 22-52.
- Monteith JL, 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 37, 707-712.
- Moreau P, Ruiz L, Vertès F, Baratte C, Delaby L, Faverdin P, Gascuel-Oudou C, Piquemal B, Ramat R, Salmon-Monviola J, Durand P, 2013. CASIMOD'N: An agro-hydrological distributed model of catchment-scale nitrogen dynamics integrating farming system decisions. *Agricultural Systems*, 118, 41-51.
- Mosier A, Kroeze C, Nevison C, Oenema O, Seitzinger S, van Cleemput O, 1998. Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 225-248.
- Muchow RC, Sinclair TR, Bennett JM, 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agronomy Journal*, 82, 338-343.
- Muller PA, 1997. *Modélisation objet avec UML*. Eyrolles (ed.), 421 pages.
- Myneni RB, Asrar G, Kanemasu ET, Lawlor DJ, Impens I, 1986. Canopy architecture irradiance distribution on leaf surfaces and consequent photosynthetic efficiencies in heterogenous plant canopies. I. Theoretical considerations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 37, 189-204.
- Myneni RB, Ross J, Asrar G, 1989. A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45, 1-153.
- Natr L, 1975. Influence of mineral nutrition on photosynthesis and the use of assimilates. In: Cooper JP (ed.), *Photosynthesis and Productivity in Different Environments*, Cambridge University Press, pp. 537-555.
- Pachepsky LB, Haskett JD, Acock B, 1996. An adequate model of photosynthesis. I. Parametrization, validation and comparison of models. *Agricultural Systems*, 50, 209-225.
- Pavé A, 1994. *Modélisation en biologie et en écologie*. Aleas Editions.
- Penning de Vries FWT, 1975. The cost of maintenance processes in plant cells. *Annals of Botany*, 39, 77-92.
- Personne E, Loubet B, Herrmann B, Mattsson M, Scjoerring JK, Nemitz E, Sutton MA, Cellier P, 2009. SURFATM-NH3: a model combining the surface energy balance and bi-directional exchanges of ammonia applied at the field scale. *Biogeosciences*, 6, 1371-1388.
- Peyraud JL, Cellier P, Donnars C, Réchauchère O (eds.), 2012. *Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Synthèse du rapport d'Expertise scientifique collective*, INRA, 68 pages.
- Polhemus, 1993. *3SPACE FASTRAK User's Manual, Revision F*. Polhemus, Colchester, Vt., USA.
- Prusinkiewicz P, Lindenmayer A, 1990. *The Algorithmic Beauty of Plants*, New York, Springer Verlag.
- Rabinovitch EI, 1951. *Photosynthesis and related processes*, vol. 2 (1). Interscience, New York, pp. 829-1191.
- Riedo M, Grub A, Rosset M, Fuhrer J, 1998. A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling*, 105, 141-183.
- Rolland MN, Gabrielle B, Laville P, Cellier P, Beekmann M, Gilliot JM, Michelin J, Hadjar D, Curci G, 2010. High-resolution inventory of NO emissions from agricultural soils over the Ile-de-France region. *Environmental Pollution*, 158, 711-722.
- Ross J, 1981. *The radiation regime and architecture of plants stands*. Dr W Junk Publishers, The Hague, 391 pages.
- Salètes S, Fiorelli JL, Vuichard N, Cmabou J, Olesen JE, Hacala S, Sutton MA, Fuhrer J, Soussana, JF, 2004. Greenhouse gas balance of cattle breeding farms and assesment of mitigation options.

- Proceedings of the International Conference "Greenhouse gas emissions from agriculture. Mitigations options and strategies", Leipzig, 10-12/02/2004, pp. 203-208.
- Schaller N., 2013. L'agroécologie: des définitions variées, des principes communs. Centre d'Etudes et de Prospective, Analyse, 59, 1-4.
- Simpson D, Butterbach-Bahl K, Fagerli H, Kesik M, Skiba U, Tang S, 2006. Deposition and emissions of reactive nitrogen over European forests: A modelling study. *Atmospheric Environment*, 40, 5712-5726.
- Sinclair TR, de Wit CT, 1976. Analysis of the carbon and nitrogen limitations to soybean yield. *Agronomy Journal*, 68, 319-324.
- Sinoquet H, Bonhomme R, 1992. Modeling radiative transfer in mixed and row intercropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 62, 219-240.
- Sinoquet H, Rivet P, 1997. Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device. *Trees*, 11, 265-270.
- Sutton MA, Howard C, Erisman JW, Billen G, Bleeker A, Grennfelt P, van Grinsven H, Grizzetti B, 2011. *The European Nitrogen Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, 612 pages.
- Tabourel-Tayot F, Gastal F, 1998. MecaNiCAL, a supply-demand model of carbon and nitrogen partitioning applied to defoliated grass. 1. Model description and analysis. *European Journal of Agronomy*, 9, 223-241.
- Thaler P, Pagès L, 1998. Modelling the influence of assimilate availability on root growth. *Plant and Soil*, 201, 307-320.
- Watson DJ, 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variations in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11, 41-76.



## Sélection de 5 publications

- Drouet J.-L.**, Bonhomme R., 1999. Do variations in local leaf irradiance explain changes to leaf nitrogen within row maize canopies? *Annals of Botany*, 84, 61-69. [A22].
- Drouet J.-L.**, Pagès L., 2007. GRAAL-CN: a model of GRowth, Architecture and ALlocation for Carbon and Nitrogen dynamics within whole plants formalised at the organ level. *Ecological Modelling*, 206, 231-249. [A14].
- Duret S., **Drouet J.-L.**, Durand P., Hutchings N.J., Theobald M.R., Salmon-Monviola J., Dragosits U., Maury O., Sutton M.A., Cellier P., 2011. NitroScape: a model to integrate nitrogen transfers and transformations in rural landscapes. *Environmental Pollution*, 159, 3162-3170. [A11].
- Drouet J.-L.**, Capian N., Fiorelli J.-L., Blanfort V., Capitaine M., Duret S., Gabrielle B., Martin R., Lardy R., Cellier P., Soussana J.-F., 2011. Sensitivity analysis for models of greenhouse gas emissions at farm level. Case study of N<sub>2</sub>O emissions simulated by the CERES-EGC model. *Environmental Pollution*, 159, 3156-3161. [A10].
- Dufossé K., Gabrielle B., **Drouet J.-L.**, Bessou C., 2013. Using agroecosystem modelling to improve the estimates of N<sub>2</sub>O emissions in the life-cycle assessment of biofuels. *Waste and Biomass Valorization*, 4, 593-606. [A6].