

# Le projet ESCAPADE pour contribuer à une meilleure gestion de l'azote dans les territoires

Jean-Louis DROUET<sup>(1)</sup>, François LAURENT<sup>(2)</sup>, Patrick DURAND<sup>(3)</sup>, Gilles BILLEN<sup>(4)</sup>, Pierre CELLIER<sup>(1)</sup>, Olivier MAURY<sup>(1)</sup>, Stéphanie POTOK<sup>(5)</sup>, Philippe FAVERDIN<sup>(6)</sup>, Christophe FLECHARD<sup>(3)</sup>, Josette GARNIER<sup>(4)</sup>, Armelle GUY<sup>(7)</sup>, Catherine HÉNAULT<sup>(8)</sup>, Catherine MIGNOLET<sup>(9)</sup>, Hervé MONOD<sup>(10)</sup>, Anne PROBST<sup>(11)</sup>, Stéphane SORIN<sup>(12)</sup>, Gaëlle TALLEC<sup>(13)</sup>, Matthias BEEKMANN<sup>(14)</sup>, Eric CESCHIA<sup>(15)</sup>, Cécile LE GALL<sup>(16)</sup>, Thierry MOREL<sup>(17)</sup>, Gauthier QUESNEL<sup>(18)</sup>, Eric RAMAT<sup>(19)</sup>, Berndt ZELLER<sup>(20)</sup>

<sup>(1)</sup>INRA EGC Thiverval-Grignon, <sup>(2)</sup>ARVALIS-Institut du Végétal Boigneville, <sup>(3)</sup>INRA SAS Rennes, <sup>(4)</sup>CNRS SISYPHE Paris, <sup>(5)</sup>INRA-Transfert Paris, <sup>(6)</sup>INRA PEGASE Rennes, <sup>(7)</sup>TRISKALIA Landerneau, <sup>(8)</sup>INRA SOLS Orléans, <sup>(9)</sup>INRA ASTER Mirecourt, <sup>(10)</sup>INRA MIAJ Jouy-en-Josas, <sup>(11)</sup>CNRS ECOLAB Toulouse, <sup>(12)</sup>TERRENA Angers, <sup>(13)</sup>IRSTEA Antony, <sup>(14)</sup>CNRS LISA Créteil, <sup>(15)</sup>CESBIO Toulouse, <sup>(16)</sup>CETIOM Thiverval-Grignon, <sup>(17)</sup>CERFACS Toulouse, <sup>(18)</sup>INRA MIAT Toulouse, <sup>(19)</sup>LISIC Calais, <sup>(20)</sup>INRA BEF Nancy

## De nouveaux enjeux pour la fertilisation raisonnée et la gestion des territoires

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>1</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'N<sub>r</sub> en Europe en 2008 atteignait près de 34 millions de tonnes, dont près de 75% étaient destinés aux fertilisants.

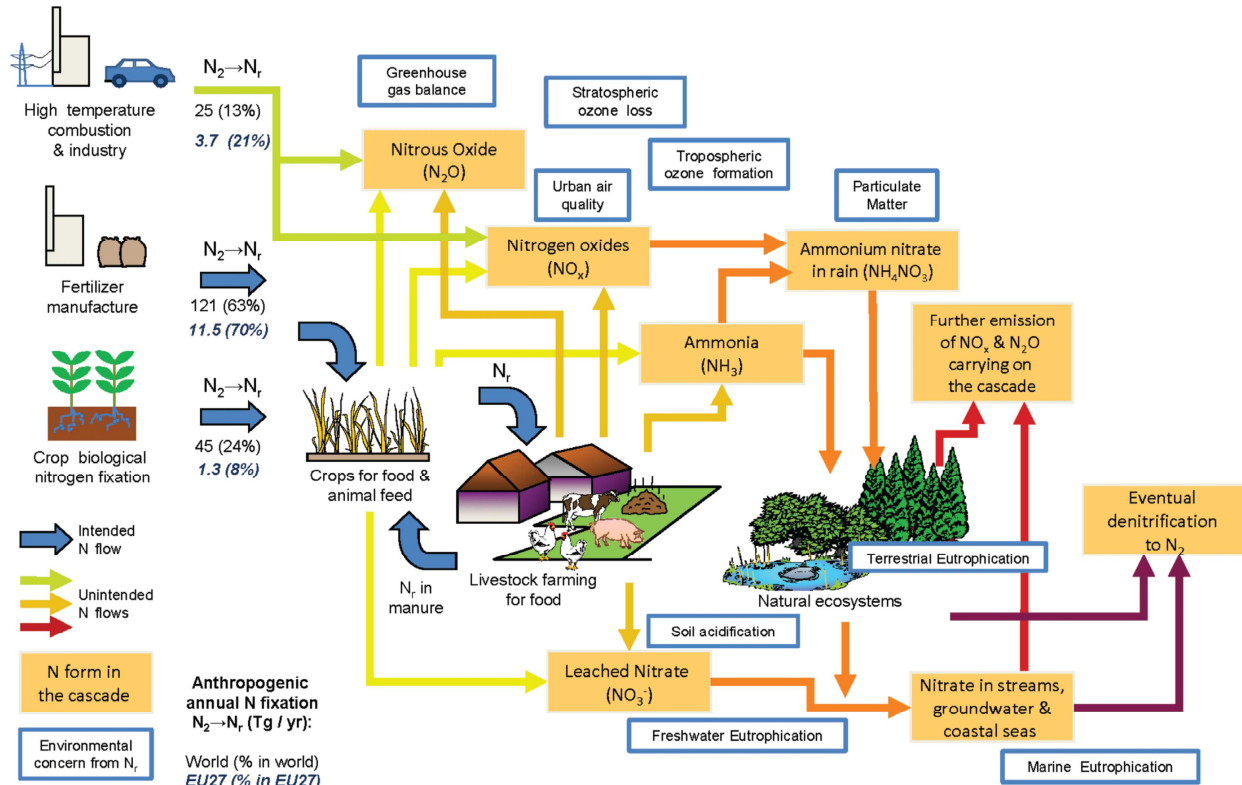
L'entrée de fortes quantités d'N<sub>r</sub> dans les agro-écosystèmes alimente une cascade<sup>2</sup> de processus générant des pertes d'N<sub>r</sub> vers l'environnement à chaque étape de la cascade (Galloway et al., 2003 ; Fig. 1). Les coûts globaux de ces pertes d'N<sub>r</sub> en Europe sont estimés 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

---

<sup>1</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>2</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'N<sub>r</sub> et une(des) sortie(s) d'N<sub>r</sub> 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'N<sub>r</sub> dans l'environnement.

d' $N_r$  sont nombreux : dégradation de la qualité de l'air, de l'eau et des sols, acidification des écosystèmes et impact sur la biodiversité suite aux dépôts d' $N_r$ , altération des sols et des bilans de  $CO_2$ , pollution nitrique des milieux aquatiques et des zones littorales entraînant l'eutrophisation des écosystèmes (exemple des algues vertes), émissions de gaz à effet de serre tels que le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ), émission d'oxydes d'azote précurseurs d'ozone, effets sanitaires (notamment sur la santé humaine)...



**Figure 1.** 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' $N_r$  dans l'environnement. Elles représentent 97% des émissions d'ammoniac avec une contribution très majoritaire de l'élevage (73% provenant des bâtiments et des zones de stockage et d'épandage des effluents), 10% des émissions d'oxydes d'azote, 89% des émissions de  $N_2O$  (Citepa, 2013) et plus de 60% des émissions de nitrate. Les émissions indirectes<sup>3</sup> de  $N_2O$  peuvent représenter jusqu'à 20% des émissions totales de  $N_2O$ . Les pertes d' $N_r$  dans l'environnement résultent d'interactions spatiales entre les éléments du paysage<sup>4</sup>, notamment des transferts par voie atmosphérique et dépôts d'ammoniac en aval des zones d'apport d'engrais et de volatilisation, et aussi des transferts par voie hydrologique et transformations d'azote nitrique en aval des zones d'apport suite à la

<sup>3</sup> Les **émissions indirectes** correspondent ici aux émissions d' $N_r$  au niveau de zones situées en aval de parcelles fertilisées ou de bâtiments d'élevage, suite à des transferts latéraux d' $N_r$  par voie atmosphérique ou hydrologique et dépôt d' $N_r$  (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.

<sup>4</sup> La **notion de paysage** peut revêtir un grand nombre de définitions selon les communautés et les disciplines. Il s'agit ici d'un espace de quelques  $km^2$  à quelques dizaines de  $km^2$ , 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.

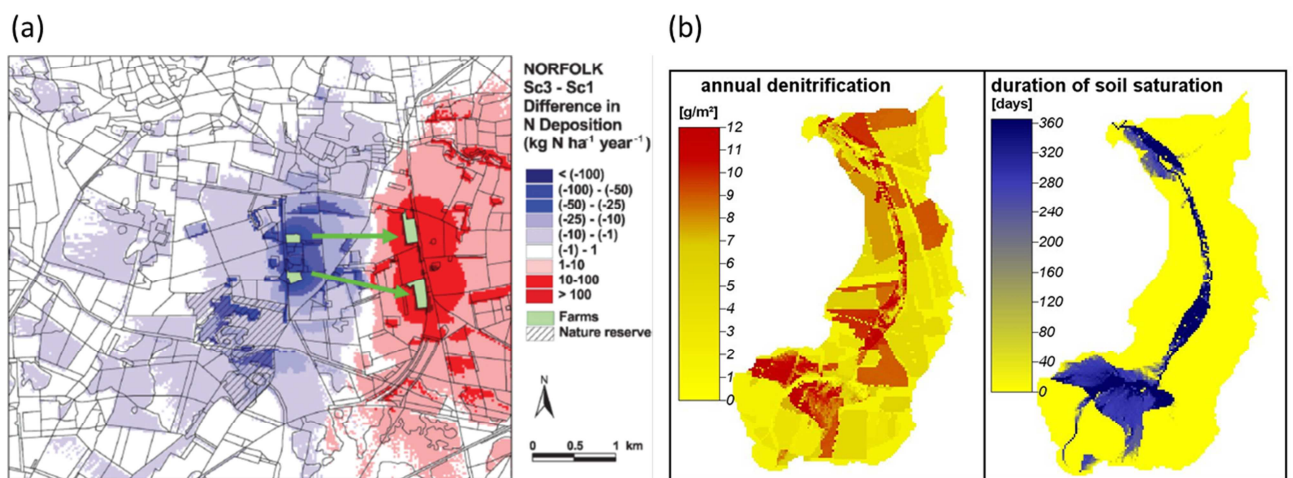
lixiviation. **Les actions locales, à l'échelle de la parcelle ou du bâtiment, ne permettront donc pas de maîtriser tous les impacts et des leviers doivent être désormais recherchés à des échelles plus larges.** Ceci nécessite d'intégrer les flux d' $N_r$  dans l'ensemble des compartiments des territoires (biosphère, atmosphère, pédosphère, hydrosphère, anthroposphère i.e. exploitations agricoles), de considérer l' $N_r$  sous toutes ses formes et d'avoir ainsi une vision globale des transferts et des transformations d' $N_r$ . L'identification de leviers à des échelles supra-parcellaires implique notamment de mieux connaître les processus impliqués dans la cascade de l' $N_r$ , de quantifier les flux et les pertes d' $N_r$  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' $N_r$  et/ou d'adaptation des systèmes de production à l'échelle des territoires, complémentaires des approches classiques aux échelles de la parcelle, du bâtiment, du troupeau ou de l'exploitation agricole.

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

Les estimations des flux, bilans et pertes d' $N_r$  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. EEA/EMEP Guidebook ; 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 (zone de stabulation, aire 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 et, par conséquent, 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. Il est cependant indispensable de prendre en compte ces interactions spatiales, tant pour la fiabilité des estimations que pour l'évaluation de la pertinence de mesures agro-environnementales ou de modifications des systèmes de cultures ou de production. En effet, dans le cas des systèmes de polyculture-élevage, les sources et puits d' $N_r$  peuvent être spatialement très hétérogènes, en intensité et en nature, à l'échelle de quelques km<sup>2</sup> seulement. Cette hétérogénéité peut induire, par le biais de divers processus, des transferts latéraux significatifs d' $N_r$  par voie atmosphérique ou hydrologique (Cellier et al., 2011). Ces transferts dépendent notamment des caractéristiques agro-pédo-climatiques des paysages et des modalités de gestion de l'azote par les agriculteurs. A cette échelle, les méthodes classiques d'inventaire des émissions, en faisant l'hypothèse d'une réponse moyenne à une application moyenne d'azote dans le territoire, peuvent générer des biais et des incertitudes fortes sur les flux et les pertes d' $N_r$ .

Compte tenu de la complexité des interactions entre ces différents processus, la modélisation est incontournable, 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' $N_r$  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' $N_r$ , 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' $N_r$  dans des bassins versants de petite taille (e.g. Beaujouan et al., 2002 ; Fig. 2a) ou à des échelles plus larges (e.g. Billen et Garnier, 2000), avec une finalité de réduction des pollutions par le

nitrate. Des études plus récentes ont cherché à évaluer l'effet des activités anthropiques sur les écosystèmes aquatiques et terrestres, en particulier sur les agro-écosystèmes cultivés, en couplant des modèles de fonctionnement des cultures avec des modèles hydrologiques (e.g. Ferrant et al., 2011). D'autres travaux de modélisation ont également tenté d'intégrer l'ensemble des compartiments d'un petit territoire, 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 (Fig. 2b). D'autres travaux dans les pays d'Europe du Nord ont porté sur les transferts de pollutions à grande distance et les impacts sur les écosystèmes semi-naturels (e.g. biodiversité ; Bobbink et al., 2010). 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, zones 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.



**Figure 2.** (a) Modélisation de la différence de dépôt d'ammoniac obtenue par le déplacement de deux bâtiments d'élevage de volailles depuis une zone proche d'une réserve naturelle (zone hachurée) vers une zone plus éloignée de 1,5 km environ vers l'est (d'après Dragosits et al., 2006). (b) Modélisation spatio-temporelle, à partir du modèle agro-hydrologique TNT2, de la dénitrification en fonction de la saturation en eau du sol due à la remontée de nappe dans un bassin versant breton (d'après Beaujouan et al., 2002 et Oehler et al., 2009).

Plus récemment, des travaux ont cherché à aller encore plus loin dans l'intégration des différentes formes d' $N_r$  et de l'ensemble des compartiments des paysages. D'une part, le modèle NitroScape, issu du projet NitroEurope (FP6, 2006-2011 ; Duret et al., 2011), met l'accent sur les couplages atmosphère-pédosphère-hydrophère-biosphère, tout en intégrant les pratiques des agriculteurs renseignées dans une base de données. D'autre part, le modèle Casimod'N, issu du projet ACASSYA (ANR Agrobiosphère, 2009-2012 ; Moreau et al., 2013) insiste sur la construction de scénarios cohérents de changement de système de production, afin notamment d'évaluer les flux d' $N_r$  liés aux systèmes d'élevage dans des paysages. Ce modèle associe les compartiments biosphère (bâtiments d'élevage, agro-écosystèmes) et pédosphère-hydrosphère, mais ne prend pas en compte le compartiment atmosphérique. Concernant le volet anthropique, des lacunes subsistent en ce qui concerne les déterminants des processus biophysiques et la gestion temporelle et spatiale des activités au sein de l'exploitation et dans le paysage (e.g. Mignolet et al., 2007). Il en résulte qu'aucun modèle n'intègre véritablement la gestion des exploitations en lien avec les caractéristiques des territoires. Il n'est donc pas encore possible de simuler ni de prédire des évolutions des stratégies de gestion des activités agricoles et des territoires. On peut toutefois citer une première tentative effectuée en ce sens dans le cadre du projet ACASSYA.

Compte tenu de la complexité des processus d'interaction, la modélisation de la cascade de l' $N_r$  à l'échelle territoriale nécessite le couplage de plusieurs modèles intégrant souvent un grand nombre de processus, eux-mêmes nécessitant une multitude de paramètres et de variables d'entrée. Cependant, l'évaluation d'un grand nombre de scénarios à partir de ces modèles nécessite que ceux-ci fonctionnent dans des temps de simulation raisonnables et en renseignant un nombre relativement peu élevé de paramètres, tout en conservant de bonnes capacités prédictives. En ce sens, des travaux ont été menés pour analyser la sensibilité des modèles aux facteurs naturels et anthropiques ou encore pour évaluer les incertitudes des estimations produites par ces modèles (e.g. revue de Monod et al., 2006). Ces travaux ont surtout porté sur des modèles fonctionnant à l'échelle de la parcelle. Toutefois, les méthodes utilisées sont suffisamment génériques pour pouvoir être appliquées à des modèles intégrés simulant les flux et pertes d' $N_r$  à l'échelle de paysages et de territoires plus vastes.

### Objectifs et démarche du projet ESCAPADE

L'objectif général du projet interdisciplinaire ESCAPADE (ANR Agrobiosphère, 2013-2017) est d'analyser l'effet des activités agricoles et de la mosaïque paysagère sur la cascade de l' $N_r$  dans les territoires, avec une approche associant la production de scénarios, d'outils de modélisation et d'observations des flux des différentes formes d' $N_r$  ( $NO_3^-$ ,  $NH_3$ ,  $NO_x$ ,  $N_2O$ ...). Le projet se focalise surtout sur des paysages tels qu'ils ont été définis plus haut (espaces de quelques  $km^2$  à quelques dizaines de  $km^2$ ) et aussi sur des territoires plus vastes (espaces de quelques centaines à milliers de  $km^2$ ).

Compte tenu de ces objectifs, le projet ESCAPADE est structuré en quatre tâches scientifiques principales (Fig. 3) :

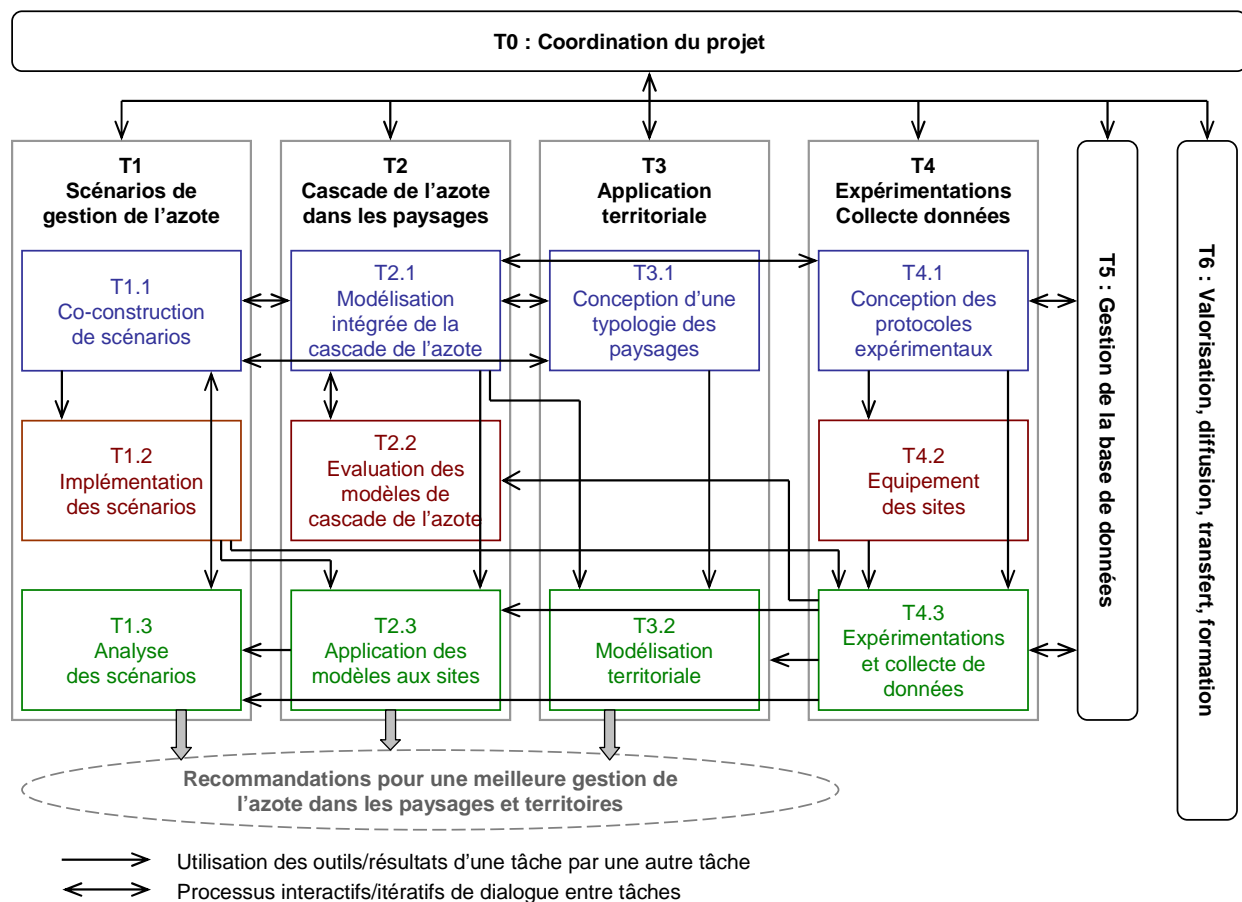


Figure 3. Structure du projet ESCAPADE.

- 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 4 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.

Le projet ESCAPADE associe des acteurs de la recherche (fondamentale et appliquée) et des acteurs du développement agricole (instituts techniques, coopératives, acteurs locaux). Les partenaires sont des biophysiciens-biogéochimistes (hydrologues, physiciens de l'environnement, de l'atmosphère, des eaux, des sols), des agronomes travaillant sur les agro-écosystèmes (polycultures et/ou systèmes d'élevage), des socio-économistes, des mathématiciens/physiciens et des informaticiens.

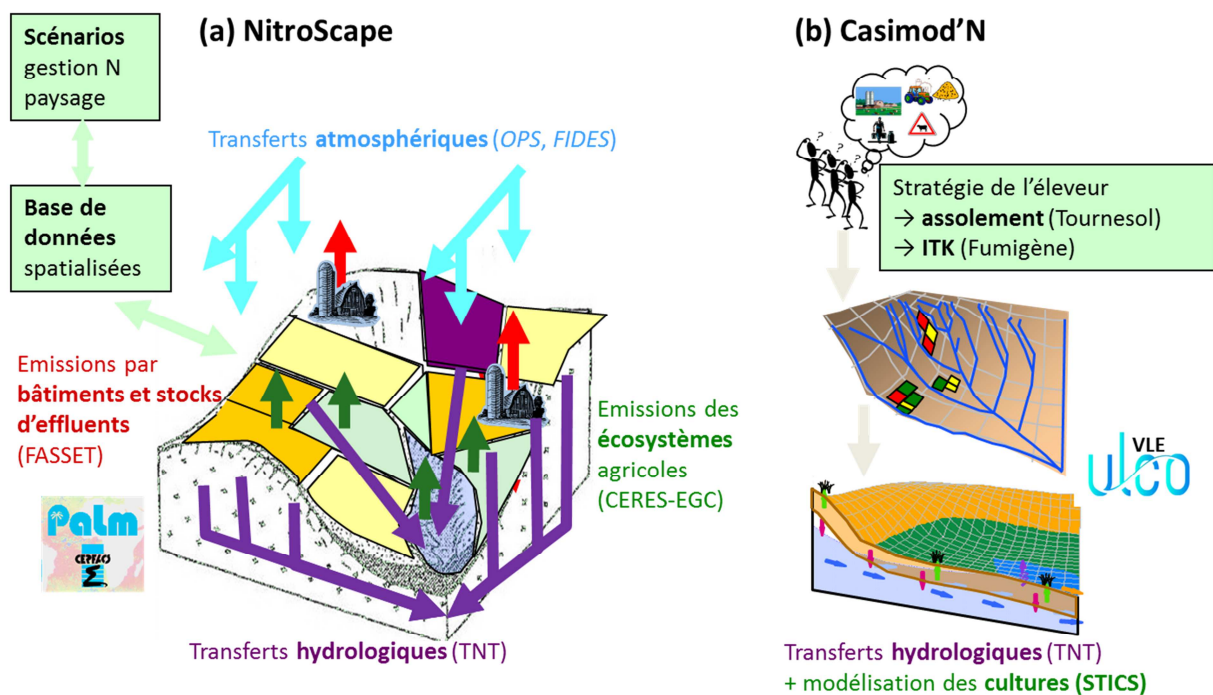
### ***Scénarios de gestion de l'azote dans les territoires***

Le projet vise d'abord dans la tâche 1 à co-construire puis à évaluer des scénarios agro-environnementaux à différentes échelles du territoire. Ces scénarios consistent à modifier (i) les pratiques agricoles à l'échelle locale (gestion par l'agriculteur de l'azote apporté aux parcelles cultivées et de l'alimentation des animaux), (ii) les modalités de gestion de l'azote au sein des exploitations agricoles (successions culturales, gestion des troupeaux et des effluents) et (iii) les structures des mosaïques paysagères (agencement des parcelles, allocation des terres, mise en place de haies et de fossés). L'échelle du paysage est particulièrement novatrice dans les travaux visant à mieux maîtriser les flux d' $N_r$  dans les territoires. L'accent sera donc surtout mis sur ce troisième type de scénarios en recherchant et en évaluant des leviers complémentaires des actions déjà menées aux échelles de la parcelle, du troupeau et de l'exploitation (e.g. fertilisation raisonnée). L'analyse de scénarios s'effectuera dans le cadre d'un partenariat entre des acteurs de la recherche fondamentale et appliquée, des acteurs locaux (coopératives, chambres d'agriculture, agriculteurs) et des acteurs du développement agricole (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, politiques 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, scénarios globaux du GIEC).

### ***Modélisation de la cascade de l'azote et quantification des pertes d'azote dans les « petits » territoires ou paysages***

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' $N_r$  et de développer des outils de modélisation fiables. Ces derniers permettront d'une part, de quantifier les différentes étapes de la cascade de l' $N_r$ , les flux et les pertes d' $N_r$  dans les différents compartiments (terrestre, atmosphérique, aquatique) de ces petits territoires 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 communautés jusqu'à présent relativement disjointes car s'intéressant à différentes formes d' $N_r$  ( $NO_3$ ,  $NH_4$ , DON,  $NH_3$ ,  $NO_x$ ,  $N_2O$ ), 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' $N_r$  dans les paysages NitroScape (Fig. 4a) et Casimod'N (Fig. 4b). Des recherches seront également menées pour améliorer la modélisation de processus spécifiques (e.g. dénitrification et émission de  $N_2O$ , transfert de DON et de  $NH_4$ , émissions ammoniacales par les animaux et les effluents d'élevage, dépôt atmosphérique) et intégrer d'autres modèles (e.g. prairies, forêts, zones humides) permettant de simuler les flux d' $N_r$  dans l'ensemble des compartiments des paysages.



**Figure 4.** Schémas conceptuels des modèles (a) NitroScape (d'après Duret et al., 2011) et (b) Casimod'N (d'après Moreau et al., 2013).

Pour calibrer ces modèles et évaluer leur capacité à simuler les processus de la cascade de l' $N_r$  et les pertes d' $N_r$  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 ( $OS^2$ , Eure-et-Loir) plus spécifiquement dédié à la quantification des émissions indirectes de  $N_2O$ . Ces sites se caractérisent *a priori* par une large gamme et variabilité de flux d' $N_r$  en raison de différences de (i) localisation 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 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>5</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' $N_r$ , ou encore les sorties intégrées (e.g. bilans d' $N_r$ ) à l'échelle du site. Les données disponibles sur ces sites seront complétées par des mesures

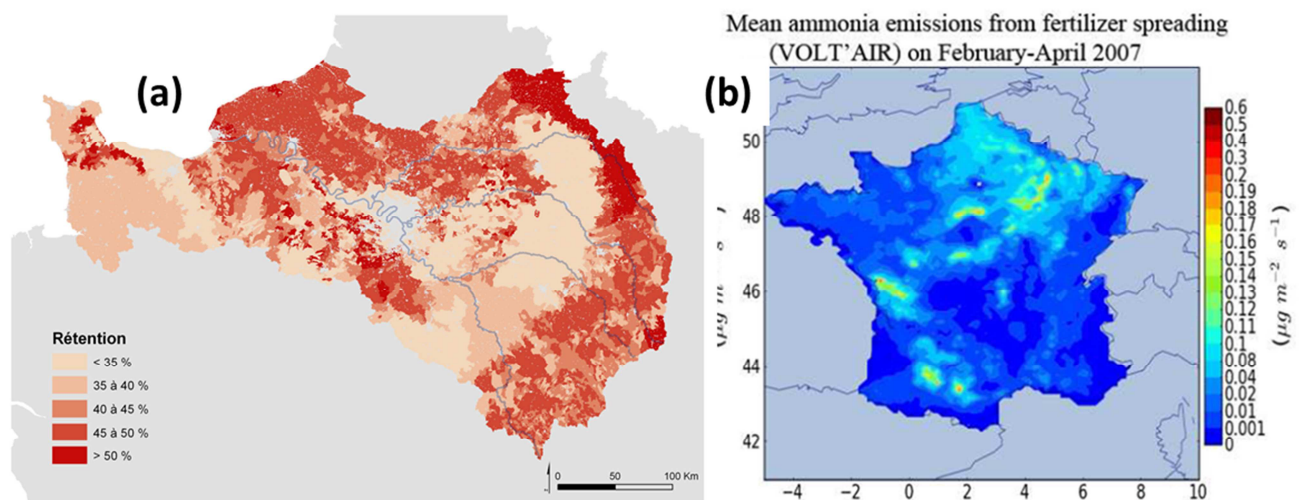
<sup>5</sup> SOERE : Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement

des flux et concentrations d' $N_r$  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.

Une réflexion méthodologique portera sur les modalités de couplage entre modèles, afin de simuler dans des temps raisonnables les flux et pertes d' $N_r$  dans les paysages, d'évaluer de manière plus robuste les capacités prédictives des modèles développés et de les appliquer à une plus large gamme de situations. Les finalités de ces travaux méthodologiques sont d'une part de quantifier et réduire les biais et incertitudes sur les flux et pertes d' $N_r$  dans l'environnement à l'échelle de territoires de tailles variables, et ainsi à évaluer la portabilité à l'échelle régionale des résultats produits à l'échelle de paysages. D'autre part, il s'agit de transférer vers les acteurs du développement les résultats de la recherche et/ou des outils « simplifiés » de quantification des pertes d' $N_r$  dans l'environnement.

### *Modélisation de la cascade de l'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  $km^2$ , 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, Fig. 5a ; Ferrant et al., 2011) et atmosphérique (e.g. Hamaoui-Laguel et al., 2012, Fig. 5b). 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' $N_r$ , pour produire des outils et des bases scientifiques au raisonnement de la gestion de l'azote dans les territoires.



**Figure 5.** (a) Modélisation de la rétention riparienne en fonction d'une typologie géo-morphogénétique des paysages et du drainage agricole, obtenue en appliquant au bassin de la Seine le modèle Seneque (d'après Billen et Garnier, 2000). (b) Modélisation de la volatilisation d'ammoniac liée à la fertilisation minérale obtenue en couplant le modèle de processus Volt'Air au modèle de transfert atmosphérique régional Chimere (d'après Hamaoui-Laguel et al., 2012).



## Conclusions

Le concept de la cascade de l'azote fait appel à une vision dynamique et spatialisée de l'azote dans les différents compartiments des territoires. Ceux-ci sont considérés comme des systèmes ouverts dans lesquels les flux d'origine anthropique nécessaires à la production agricole (e.g. apports d'engrais, d'effluents d'élevage) sont associés à des pertes d'azote qui ont de multiples impacts sur l'environnement. La fertilisation et les apports d'effluents étaient jusqu'à présent raisonnés essentiellement à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation en utilisant le concept de cycle, bouclé, de l'azote. Ils doivent désormais être appréhendés aussi à l'échelle territoriale, notamment pour réduire les effets indirects de la fertilisation sur des zones sensibles (aires de captage, zones riveraines, réservoirs de biodiversité, cours d'eau...) situées en aval des zones d'apports et contaminées après des transferts latéraux sur de plus ou moins grandes distances. Outre les projets nationaux et européens développés depuis le milieu des années 2000, plusieurs réseaux internationaux ont été mis en place dans le même temps pour tenter de mieux comprendre et maîtriser les flux d'azote à différentes échelles (e.g. 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 ; Reactive Nitrogen in the United States). La communauté internationale ainsi structurée s'accorde pour dire que le défi des prochaines années est de maintenir la production de biomasse tout en diminuant les pertes d'azote vers l'environnement, en particulier vers les écosystèmes semi-naturels. Le projet ESCAPADE s'inscrit dans cette dynamique. Il regroupe au niveau national des partenaires de la recherche, du développement agricole et des acteurs locaux ayant acquis une expertise dans ce domaine. Il vise à produire des résultats et des outils pour mieux maîtriser les flux d'azote dans les territoires, afin de contribuer à définir des agro-écosystèmes innovants et performants à la fois en termes économique et environnemental.

Le projet ESCAPADE (2013-2017, <http://www.n-escapade.fr/>) est financé par l'ANR Agrobiosphère (édition 2012, contrat n° ANR-12-AGRO-0003). Il est soutenu par le GIS GC-HP2E (Grandes Cultures - Hautes Performances Economiques et Environnementales) et labellisé par le pôle de compétitivité VEGEPOLYS.

## Références

- Beaujouan V., Durand P., Ruiz L., Aurousseau P., Cotteret G., 2002. A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology-denitrification relationship. *Hydrological Processes*, 16: 493-507.
- 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.
- Bobbink R., Hicks K., Galloway J.N., Spranger T., Alkemade R., Ashmore M., Bustamante M., Cinderby S., Davidson E., Dentener F., Emmett B., Erisman J.W., Fenn M., Gilliam F., Nordin A., Pardo L., De Vries W., 2010. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications* 20: 30-59.
- 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.E., Mérot P., Theobald M.R., Viaud V., de Vries W., Sutton M.A., 2011. Nitrogen flows and fate in rural landscapes. In: Sutton M.A., Howard C., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B. (eds), *The European Nitrogen Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, Chapter 11, 229-248.
- Citepa, 2013. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Format SECTEN, 332 pages.

- Dragosits U., Theobald M.R., Place C.J., ApSimon H.M., Sutton M.A., 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.
- 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.
- Ferrant S., Oehler F., Durand P., Ruiz L., Salmon-Monviola J., Justes E., Dugast P., Probst A., Probst J.-L., Sanchez-Perez J.-M., 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.
- 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* 112: 252-260.
- Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J., 2003. The nitrogen cascade. *BioScience*, 53: 341-356, 2003.
- Hamaoui-Laguel L., Meleux F., Beekmann M., Bessagnet B., Létinois L., Générmont S., Cellier P., 2013. Nitrous oxide emissions in air quality modelling for France. *Atmospheric Environment*, in press. Published online <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.atmosenv.2012.08.002>.
- Hutchings N.J., Dalgaard T., Rasmussen B.M., Hansen J.F., Dahl M., Jørgensen L.F., Ernsten V., von Platen-Hallermund F., Pedersen S.S., 2004. Watershed nitrogen modelling. In Hatch D.J., Chadwick D.R., Jarvis S.C., Roker, J.A. (eds), *Controlling Nitrogen Flows and Losses*, Wageningen Academic Publishers, ISBN 90-7699-984-34, p. 47-53.
- Mignolet C., Schott C., Benoît M., 2007. Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Science of the Total Environment* 375: 13-32.
- Monod H., Naud C., Makowski D., 2006. Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. In: Wallach D., Makowski D., Jones J.W. (eds.), *Working with Dynamic Crop Models*. Elsevier, Amsterdam, p. 55-99.
- Moreau P., Ruiz L., Vertès F., Baratte C., Delaby L., Faverdin P., Gascuel-Oudou C., Piquemal B., Ramat E., Salmon-Monviola J., Durand P., 2013. Casimod’N: An agro-hydrological distributed model of catchment-scale nitrogen dynamics integrating farming systems decisions. *Agricultural Systems* 118: 41-51.
- Peyraud J.-L., 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.
- Sutton M.A., Howard C., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B., 2011. *The European Nitrogen Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge.