

# PROJET ESCAPADE

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

2013-2017, ANR Programme Agrobiosphère  
(ANR-12-AGRO-0003)

Séminaire de clôture  
23 juin 2017, Paris





## Sommaire

**Programme du séminaire de clôture**

**Résumés des présentations orales**

**Présentations orales**

**Liste des partenaires et des sous-contractants du projet**

**Liste des participants au séminaire**



## Programme du séminaire de clôture du projet ESCAPADE

23 juin 2017, Paris 7<sup>ème</sup>, Espace Grenelle, 84 rue de Grenelle



### **9h30-10h00 : Accueil**

#### **10h00-10h40 : Introduction : objectifs et concepts du projet et du séminaire – les scénarios en fil conducteur**

(Jean-Louis Drouet et François Laurent – 15+15 mn présentations + 10 mn questions)

Concepts du projet : rappel de l'historique du projet, des objectifs initiaux, de l'approche générale du projet

Concept du séminaire : fil conducteur et déroulé de la journée

Concepts généraux de construction des scénarios d'atténuation des pertes d'azote et d'adaptation des systèmes de production dans les sites et les territoires. Quels leviers a priori ?

#### **10h40-11h30 : Modélisation de la cascade de l'azote dans les sites et les territoires du projet**

(Patrick Durand et Antsiva Ramarson – 20+20 mn présentations + 10 mn questions)

Philosophie générale de la modélisation aux deux échelles du projet : sites et territoires

Objectifs généraux des modèles, approche générale, processus intégrés, échelles de temps et d'espace

### **11h30-11h45 : Pause café**

#### **11h45-12h35 : Données collectées pour la modélisation des scénarios dans les sites et les territoires**

(15+5+20 mn présentations + 10 mn questions)

- Philosophie générale d'acquisition des données sur les structures paysagères et les flux et concentration d'azote ? (Pierre Cellier) – Focus sur les enquêtes de fermes (Catherine Pasquier)
- Focus sur les flux d'azote ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ) mesurés sur un site : exemple de l'Orgeval (Josette Garnier)

### **12h35-14h00 : Buffet**

#### **14h00-15h50 : Evaluation des scénarios par la modélisation dans les sites et les territoires**

**et la confrontation aux données** (50+30+20 mn présentations + 10 mn questions)

Description des modèles et exemples d'applications sur quelques sites et territoires

Quels leviers d'atténuation et adaptation a posteriori ?

- Sites : modélisation intégrée à partir des données de fermes et des scénarios (cascade de l'azote, pertes d'azote, émissions indirectes et analyses de sensibilité)  
(Cyril Benhamou et Laurène Casal – 20+20 mn présentation + 10 mn questions)  
Exemples sur des sites aux pratiques contrastées : Naizin (élevage) / OS2 (polycultures),  
et aux climats contrastés : Naizin (nord océanique) / Auradé (sud sec)
- Sites et territoires : production de typologies paysagères pour la modélisation territoriale des scénarios :
  - exemple du territoire breton du Blavet englobant le site de Naizin (Françoise Vertès – 20 mn présentation)
  - modélisation atmosphérique des dépôts d'azote aux deux échelles (Niramson Azouz – 10 mn présentation)
- Territoires : focus sur la modélisation des flux hydriques à partir des typologies et des scénarios et comparaison entre territoires (Grand Morin, Save, Haut-Loir, Blavet) (Gilles Billen – 20 mn présentation)

Questions : 10 mn

#### **15h50-16h35 : Discussion générale (45 mn)**

#### **16h35-16h45 : Conclusion et clôture du séminaire**



## Objectifs et concepts du projet ESCAPADE et du séminaire de clôture

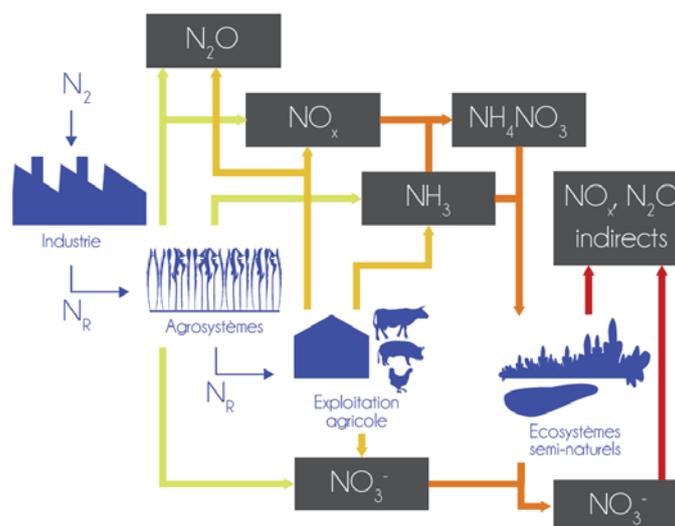
J.-L. Drouet et tous les partenaires

Le modèle de production agricole subit actuellement un changement majeur visant à réduire les intrants azotés tout en cherchant à maintenir la productivité des agroécosystèmes. Cette évolution ne se fera pas sans innovations techniques et organisationnelles originales, en actionnant des leviers prenant en compte l'hétérogénéité des paysages et l'organisation des activités agricoles et d'élevage dans les territoires. Dans ce contexte, le projet ESCAPADE a réuni des équipes de disciplines complémentaires (biogéochimie, transferts atmosphériques et hydrologiques, agronomie, socio-économie, mathématiques) incluant des acteurs de la recherche, du développement agricole et des acteurs économiques des territoires.

L'objectif général du projet était d'identifier et d'évaluer des voies innovantes d'atténuation des pertes d'azote et d'adaptation des systèmes de production aux changements globaux. Le projet a mobilisé des territoires à deux échelles spatiales emboîtées : des sites instrumentés de quelques km<sup>2</sup> à quelques dizaines de km<sup>2</sup> et des territoires de quelques centaines de km<sup>2</sup> englobant ces sites.

Des scénarios de gestion de l'azote ont été co-construits aux échelles classiques de la parcelle et des exploitations agricoles, ainsi qu'aux échelles novatrices des sites et des territoires. Les scénarios ont été évalués à partir des modèles développés dans le projet pour simuler la cascade des processus liés à l'azote et les pertes d'azote dans les sites et les territoires. Ces modèles ont été évalués à partir de données agricoles et biophysiques acquises sur quatre sites complémentaires par leurs conditions agro-pédo-climatiques. Le projet a permis une évaluation agro-environnementale des scénarios à partir des modèles. La diffusion des résultats se fera par des publications et communications scientifiques et auprès des agriculteurs par les instituts techniques et les coopératives partenaires au projet.

Le séminaire de clôture est organisé en deux grandes séquences. La première a pour objectif de présenter et discuter les concepts, hypothèses et méthodes qui ont prévalu au développement et à l'évaluation des outils du projet : scénarios, modèles et données. La seconde a pour objectif de présenter et discuter les résultats majeurs acquis par la mise en œuvre conjointe de ces trois types d'outils dans les sites et les territoires englobants.



Représentation schématique de la cascade de l'azote dans les territoires.

## Démarches et réflexions autour de la construction des scénarios alternatifs

F. Laurent, L. Casal, S. Gironde, D. Craheix

La construction des scénarios alternatifs de gestion de l'azote s'est déroulée sur 2 niveaux d'échelle distincts : les sites instrumentés et les territoires qui les englobent. La réflexion initiale qui a présidé à leur élaboration s'est appuyée sur l'identification de trois leviers d'action : diminution des entrées d'azote sur le territoire, modification de la gestion « intra » territoire de l'azote, ou enfin des caractéristiques paysagères.

Le dernier levier est privilégié car la question centrale posée par le projet est l'identification des « marges de manœuvre permises par la gestion paysagère des systèmes de culture et des zones non productives, selon leurs « modes d'assemblage » à l'intérieur d'espaces agricoles de taille variable.

Un schéma général de construction des scénarios a été élaboré sur le premier niveau d'échelle (« sites ») et a servi aussi pour décliner les options de gestion aux échelles « larges » (« territoires »). L'enjeu du positionnement des aménagements proposés est abordé par la comparaison de deux options distinctes vis-à-vis de la maîtrise du flux de nitrate : « interception » en valorisant les zones hydromorphes potentiellement rétentrices d'azote ; « dilution » en soustrayant à la production agricole des zones en tête de bassin capables de maintenir des flux d'eau peu concentrés et transférés à l'exutoire.

La construction des scénarios a donc été « pilotée » principalement par un enjeu « qualité de l'eau » mais les conséquences sur la qualité de l'air (NH<sub>3</sub>) ou les GES (N<sub>2</sub>O) seront examinées dans la cadre d'une évaluation multicritères. A ce titre l'enjeu économique a été abordé par des simulations sur des exploitations types : les conséquences des scénarios testés à des échelles larges restent donc à traiter.

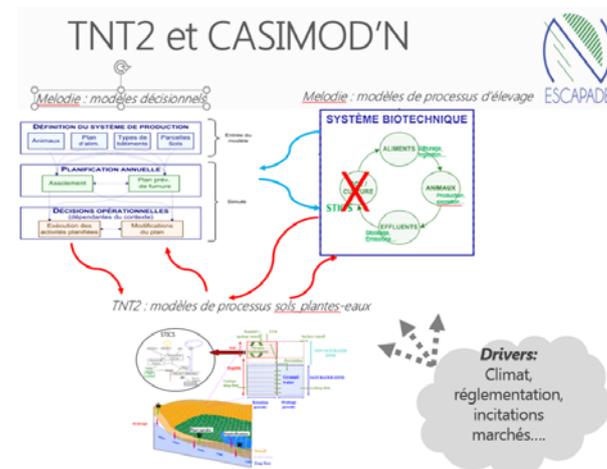
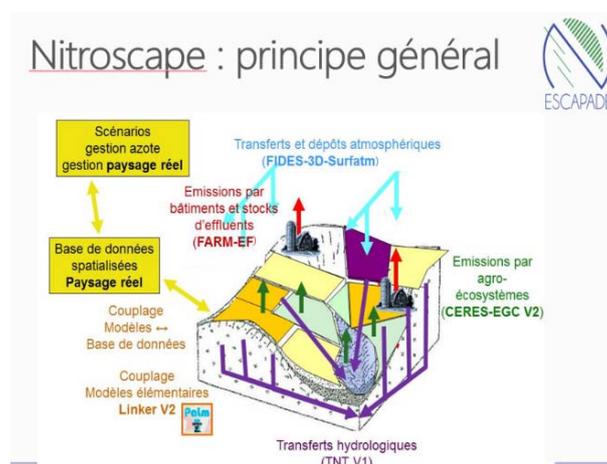
Les partenaires du projet acteurs du développement (Arvalis, Terrena, Triskalia) font part de leurs attentes vis-à-vis de ce type de leviers d'action et soulignent des points d'attention pour la valorisation des résultats du projet. A ce titre les dynamiques d'évolution des structures agricoles actuellement en cours semblent importantes à prendre en compte tenu de leurs effets sur les assolements, les itinéraires techniques, la gestion des effluents dans les bâtiments.

## Modélisation de la cascade de l'azote dans les sites

P. Durand, C. Benhamou, J. Salmon-Monviola, E. Ramat, C. Baratte,  
A.-I. Graux, P. Faverdin, L. Casal S. Ferrant, J.-L. Drouet

Dans le cadre du projet, trois modèles ont fait l'objet de développements et d'applications sur les sites instrumentés du projet, afin de jouer sur leur complémentarité pour décrire, intégrer et simuler une large gamme de processus et de scénarios. Ces trois modèles ont en commun le résultat d'un couplage fort de modèles déjà existant, d'être mécanistes (les processus principaux sont explicitement modélisés), spatialisés (l'espace est divisé selon une grille régulière où les processus sont modélisés indépendamment, et la géométrie des flux de matière échangés entre les cellules de la grille est aussi décrite), dynamiques (pas de temps journalier ou infra), déterministes (un jeu de paramètres et variables d'entrée produit un jeu unique de variables de sorties). Le modèle NitroScape couple CERES-EGC (modèle de culture), TNT2-hydro (modèle hydrologique), FIDES-3D-Surfatm (modèle de transfert d'ammoniac et d'échange d'ammoniac surface-atmosphère) et FARM-EF (modèle d'émissions d'azote à la ferme). Le modèle TNT2 couple TNT (modèle de transfert d'eau et de nitrates) avec STICS (modèle de cultures). Le modèle CASIMOD'N couple TNT2 et MELODIE (modèle d'exploitation agricole d'élevage). Ces modèles ont fortement accru leurs fonctionnalités et leur fiabilité durant le projet et sont opérationnels pour des applications sur des systèmes réels et scénarisés très divers.

Leurs intérêts et limites, en termes d'incertitude et d'applicabilité, sont discutés dans cette présentation.



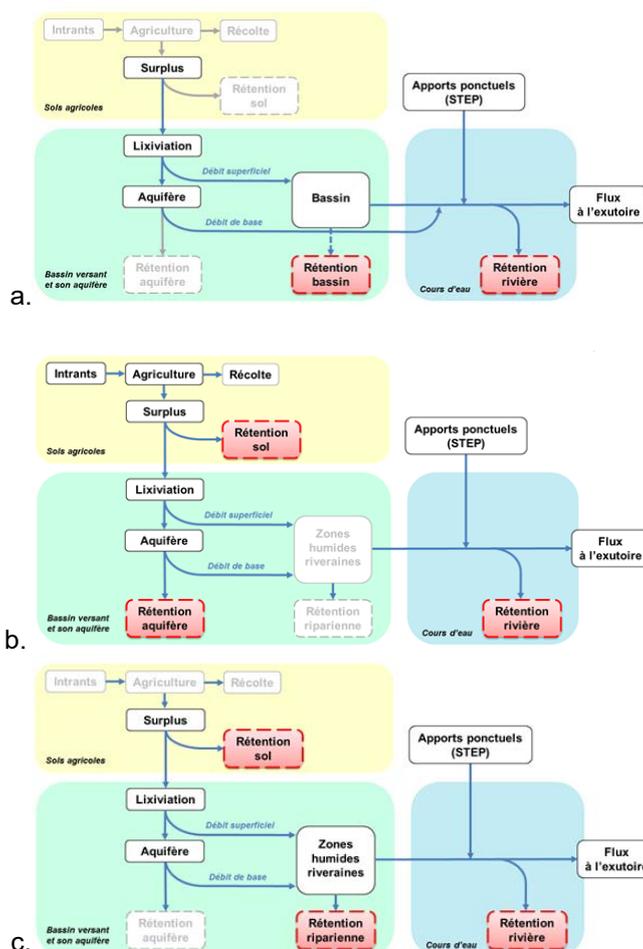
## Principes et fonctionnement des modèles de la cascade de l'azote à l'échelle territoriale : Nutting'N, SWAT et SENEQUE-Riverstrahler

A. Ramarson, G. Billen, J. Garnier, S. Théry, S. Sauvage, C. Gascuel

De nombreux modèles existent pour décrire la cascade de l'azote depuis les sols agricoles jusqu'à l'exutoire des bassins versants. Ils se distinguent, d'une part, par le degré de finesse de leur représentation – plus ou moins mécaniste – des processus impliqués (et donc dans leur pouvoir explicatif et prédictif) et, d'autre part, par l'échelle géographique de leur domaine d'application. A l'échelle de territoires d'une surface de plus de 500 km<sup>2</sup> les modèles les plus déterministes ne peuvent être appliqués, et une démarche de modélisation plus intégrative doit être mise en place.

Trois modèles ont été appliqués sur les territoires du projet ESCAPADE. (1) Nutting'N, basé sur une approche de bilans calibrés sur des bassins renseignés. (2) SWAT qui comporte un modèle de production agricole et de transferts de l'eau et l'azote dans les sols, couplé à un modèle de transfert dans le réseau hydrographique. (3) SENEQUE-Riverstrahler qui modélise les transferts de nutriments depuis les eaux sous-racinaires, à travers l'interface riparien entre le bassin versant et les cours d'eau, et jusqu'à l'exutoire du réseau hydrographique.

Les principes de ces trois modèles et les modalités de leur mise en application seront illustrés sur l'exemple du bassin de la Save.



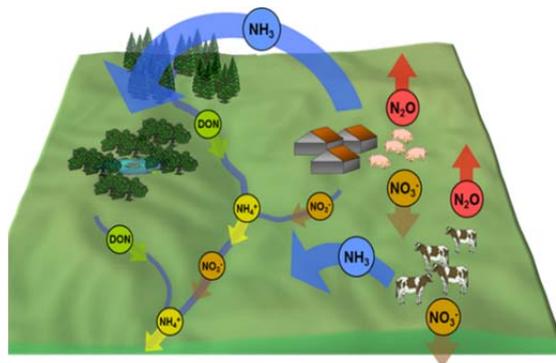
Modélisation de la cascade de l'azote dans (a) Nutting'N, (b) SWAT, (c) SENEQUE Riverstrahler.

## Données collectées pour la modélisation des scénarios dans les sites et les territoires

P. Cellier, C. Pasquier, J. Garnier

Nous présenterons les actions relatives à la collecte des données d'Escapade sous la forme d'un « data paper », publication que nous sommes donnés pour objectif de réaliser pour faire connaître les jeux de données collectés et favoriser leur diffusion. Le corps du data paper comprend les sections suivantes (repris de Nature publishing group) :

Contexte & objectifs : le projet Escapade vis à rechercher des voies innovantes à l'échelle du territoire, complémentaires des approches classiques aux échelles de la parcelle et de l'exploitation agricole, pour optimiser l'usage de l'azote et en réduire les pertes dans l'environnement, et ainsi préserver durablement les agroécosystèmes tout en maintenant la productivité des systèmes de production. Les modèles développés à l'échelle de quatre sites (quelques km<sup>2</sup>) et de quatre territoires (quelques centaines à milliers de km<sup>2</sup>) ont besoin de données d'entrée et de données de validation aux échelles pertinentes. De telles données devraient intéresser d'autres groupes travaillant à l'échelle des paysages ruraux.



Méthodes : en se fondant sur les besoins de modèles ainsi que sur des projets passés récents, nous avons établi des listes de données dans différentes catégories ainsi que des protocoles d'observation et de collecte. Les stratégies d'échantillonnage ont été adaptées pour chaque site prenant en particulier en compte la nature des activités agricoles et les caractéristiques naturelles du site.

Données enregistrées : suite à leur collecte sur le terrain sur la base de mesures physiques, chimiques et biologiques, ou sur la base d'enquête auprès d'exploitant agricoles, les données collectées ont été enregistrées sur des tableurs ou bases de données locales puis intégrées dans la base de données générale d'Escapade. Différentes cartes décrivant le milieu (topographie, sol, parcellaire, ...), déjà disponibles sur les sites d'étude, ont également été intégrées dans cette base.

Métadonnées : pour chaque type de données (cultures, sols, météo, pratiques agricoles ...) des protocoles ont été établis, incluant la méthode d'observation sur le terrain ou de collecte d'échantillons, la procédure d'analyse au laboratoire, le cas échéant. La stratégie d'échantillonnage a été établie sur la base de principes généraux communs mais adaptée site par site pour bien intégrer les conditions agricoles et d'environnement de chaque site, ou valider des objectifs spécifiques.

Validation technique : à l'échelle de la parcelle agricole, les protocoles retenus sont fondés sur des protocoles analytiques ou agronomiques existants et déjà largement validés. A des échelles plus larges, les choses sont moins bien établies, mais nous avons pu nous fonder sur des stratégies expérimentales développées dans le cadre d'autres projets nationaux ou européens.

Notes : l'ensemble des données et métadonnées seront largement documentés pour permettre un usage par d'autres équipes de recherche travaillant à l'échelle des paysages agricoles ou sur des processus plus spécifiques (e.g. émissions de N<sub>2</sub>O).

## La cascade de l'azote: que va-t-on encore faire avec les mesures ?

J. Garnier, J. Anglade, J. Berthou, A. Azougui, B. Mercier, G. Billen et coll.

G. Tallec, P. Ansart, A. Blanchouin, N. Derlet, J. Tournebize et coll.

C. Schott, C. Mignolet et coll., C. Hénault, C. Pasquier et coll.

C. Fléchar, F. Vertès, C. Gascuel, P. Durand et coll.

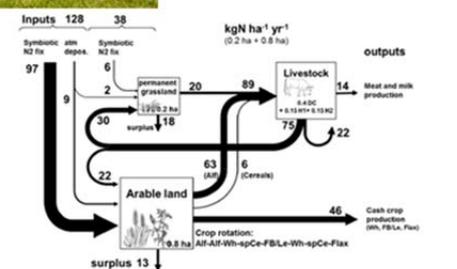
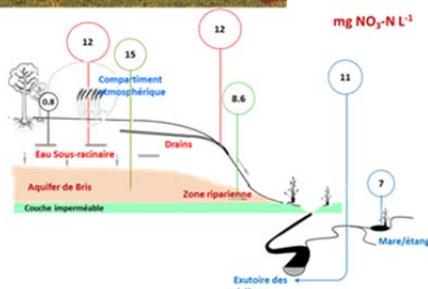
A. Probst, V. Ponnou-Delaffon, E. Guigues, S. Ferrant V. Payre, J.-L. Probst et coll.

C. Decuq, V. Lecuyer, S. Masson, J.-C. Gueudet, P. Cellier, J.-L. Drouet et coll.

Dans le cadre du projet ANR Escapade, 4 sites ont été instrumentés pour constituer une base de données nécessaire à la validation des modèles mis en œuvre pour appréhender la cascade de l'Azote à l'échelle des paysages. Outre l'acquisition des flux d'azote vers les hydrosystèmes déjà en place pour la majorité des sites, des équipements nouvellement acquis ont permis de mesurer les flux d'oxyde nitreux ( $N_2O$ ) en fonction de l'occupation des sols et de leurs caractéristiques et de déterminer les concentrations atmosphériques en  $NH_3$ .

Ces données montrent des flux d'azote en général plus élevés pour le Naizin (Bretagne), tant par sa pluviométrie élevée que son système agricole dominé par l'élevage, à la différence des autres sites essentiellement dominés par la grande culture. Les sites des Avenelles (en Brie) et OS<sup>2</sup> (en Beauce) présentent des résultats assez semblables. Le régime hydrologique de type semi-aride de l'Auradé introduit plus de la variabilité qu'ailleurs.

Au-delà de constituer des données de validation des modèles et de nourrir des bases de données nationales, européennes et mondiales, nécessaires pour alimenter les directives, ces données peuvent servir à la compréhension du fonctionnement de petits territoires grâce à l'établissement de bilans, et ces connaissances par sites peuvent être mises en perspectives pour mieux comprendre les facteurs qui déterminent leurs spécificités (climat, caractéristiques des sols, pratiques agricoles, systèmes, etc.). Les bilans et la modélisation sont ainsi appelés à se nourrir réciproquement.



De la mesure du terrain.....à un bilan fonctionnel

## Modélisation des sites instrumentés et évaluation des flux d'azote

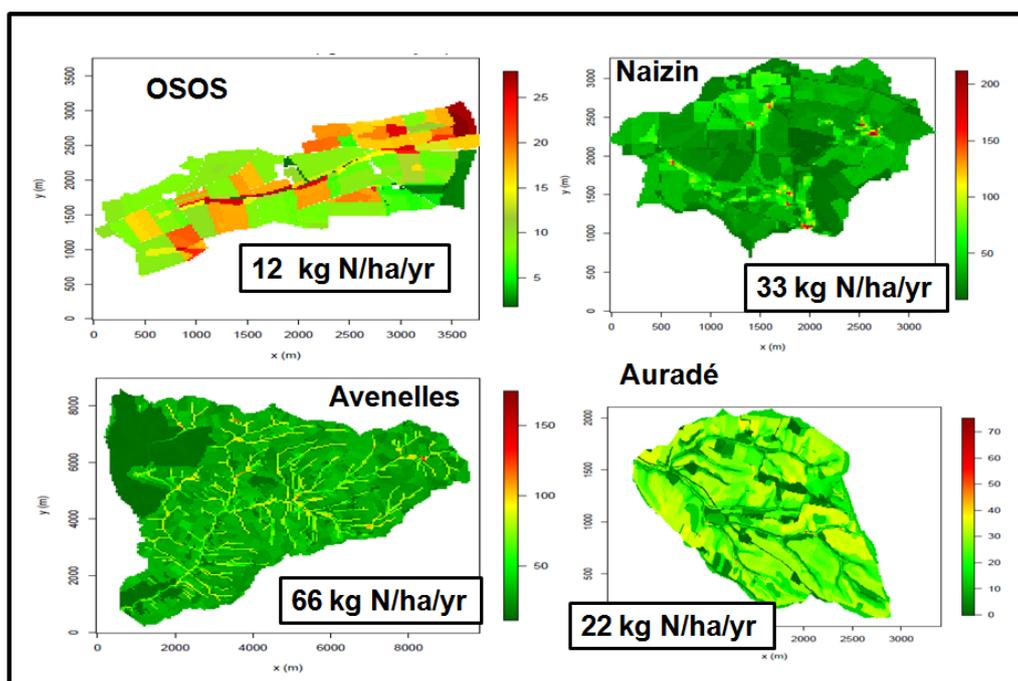
C. Benhamou, P. Durand, J.-L. Drouet

N. Akkal, J. Anglade, P. Barbillon, L. Casal, P. Cellier, C. Chambon, S. Ferrant, J. Ferrer-Savall, C. Fléchar, D. Franqueville, J. Garnier, C. Hénault, H. Monod, C. Pasquier, A. Probst, J. Salmon-Monviola et coll.

Les deux modèles NitroScape et TNT2 ont été appliqués pour simuler la cascade de l'azote sur les quatre sites instrumentés du projet : Naizin en Bretagne, OSOS en Centre-Val de Loire, Avenelles en Île-de-France et Auradé en Occitanie. Ces sites sont contrastés par leurs structures paysagères, leur étendue spatiale, topographie et contexte pédoclimatique, ainsi que par leurs pratiques agricoles et d'élevage.

Les deux modèles permettent de simuler de manière spatialisée et dynamique les ordres de grandeur des flux des différentes formes d'azote (volatilisation et dépôt d'ammoniac, pertes directes et indirectes de  $N_2O$  par dénitrification et nitrification, minéralisation, lixiviation de nitrates, prélèvement et restitution par les cultures) dans les différents compartiments des paysages (terrestre, aquatique, aérien). Les dynamiques des flux d'eau et d'azote à l'exutoire, qui intègre en un point l'ensemble des processus spatialisés du site, sont plutôt bien représentées par les modèles. Mais le manque de données ne permet pas toujours d'évaluer de manière précise la répartition spatiale des flux d'azote et l'intensité des processus de transfert et de transformation (e.g. présence d'animaux au pâturage, porosité des sols). Ce manque de données ne permet pas de statuer sur l'intensité des flux qui interagissent et se compensent (e.g. minéralisation, dénitrification, volatilisation), et différentes conditions initiales ont produit des flux simulés d'azote similaires à l'exutoire. L'analyse de sensibilité des modèles a permis de hiérarchiser les processus et les facteurs d'entrée les plus influant sur les variables cibles (e.g. pertes  $NO_3$ ,  $N_2O$ ,  $NH_3$ , bilans N, rendements) et sur lesquelles il est prioritaire de focaliser les mesures.

Les résultats obtenus sur les sites sont présentés, discutés et comparés. Ils montrent la nécessité de développements supplémentaires pour mieux représenter les structures paysagères et les flux d'azote (e.g. zones drainées, sols argileux dont les propriétés physiques évoluent au cours de l'année, paramétrisations de la diversité des cultures).



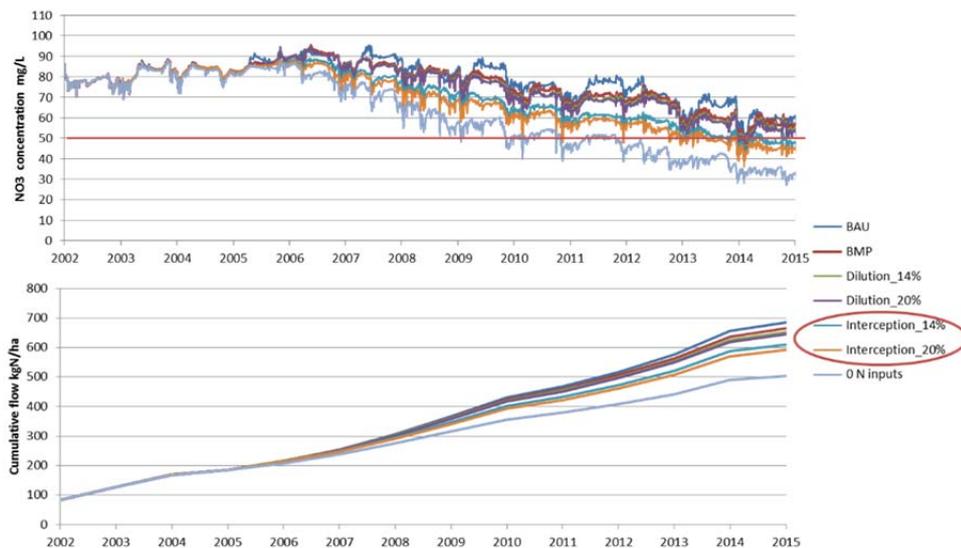
Dénitrification moyenne (kg N/ha/an) calculée par les modèles, spatialisée (cartes) et intégrée (encadrés noirs) sur les quatre sites du projet.

## Modélisation des scénarios sur deux sites contrastés sites

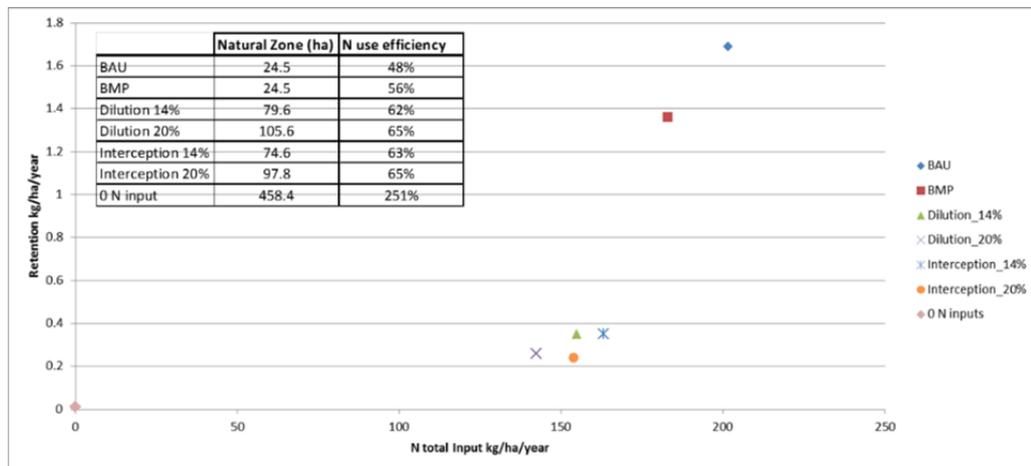
L. Casal, P. Durand, C. Benhamou, S. Ferrant, J.-L. Drouet, F. Vertès, F. Laurent

A l'échelle des sites, le jeu de scénarios incluant pratiques réelles, optimisées, implantation de zones d'interception et de dilution, a été testé sur deux sites contrastés par les systèmes de production agricoles (Auradé : grandes cultures, Naizin : polycultures élevages) et le contexte physiographique (sol, climat, relief...). Les résultats montrent d'abord des tendances similaires entre les deux sites. En termes de réduction des pertes nitriques, les scénarios se classent toujours ainsi : réel > optimisé > dilution > interception ; on constate aussi, de façon un peu contre-intuitive, qu'en exprimant les résultats en terme de rétention apparente des excès d'azote (différence entre surplus agricoles (N intrants – N exporté par les récoltes) et flux nitriques à l'exutoire), c'est toutefois le scénario réel qui offre la plus forte rétention, illustrant à la fois la forte dépendance de cette rétention au niveau d'intrants. Dans le bassin de Naizin, on constate aussi que l'augmentation des surfaces d'interception de 14 à 20% de la surface totale du bassin n'a que peu d'effets sur les flux à l'exutoire, ce qui montre que c'est plus la continuité de la zone d'interception autour du cours d'eau que sa surface totale qui est déterminante. Le fait d'avoir des résultats somme toute concordant sur ces deux sites contrastés suggère une bonne généralité des conclusions obtenues. Les impacts de ces scénarios sur les dépôts atmosphériques et les émissions indirectes de N<sub>2</sub>O sont en cours d'analyse.

a.



b.



Exemples de résultats pour Naizin. Pertes nitriques à l'exutoire (a), rétention et NUE (b).

## Typologies de paysages et de systèmes de culture, et interactions, pour la modélisation territoriale des émissions et rétentions d'azote : exemple du BV du Blavet

F. Vertès, N. Akkal-Corfini, V. Parnaudeau et C. Gascuel-Oudou, E.-G. Lazrak et C. Mignolet

A l'échelle de sites de quelques km<sup>2</sup>, les modèles d'émission d'azote vers l'air et l'eau mobilisent des données de pratiques agricoles observées à l'échelle même de la parcelle. Beaucoup de ces données ont été acquises dans le cadre des observatoires de recherche en environnement (ORE Agrhys, SOERE RBV,...). Sur ces sites il n'y a donc pas d'itinéraires techniques (ITK) ou de systèmes de culture (SdC) type, chaque exploitation et chaque parcelle étant décrite in extenso sur la base d'enquêtes.

Passant à l'échelle des grands territoires, il est nécessaire d'élaborer une typologie des éléments productifs (parcelles agricoles) et intersticiels (zones humides, haies,...) du paysage agricole, pour informer des modèles territoriaux (Swat, Sénèque, Nutting,...). La caractérisation des éléments du paysage agissant sur la rétention d'azote a été menée sur différents bassins versants selon une méthodologie basée sur les modèles de Markov cachés adaptés à des corpus de données hétérogènes combinant des variables de natures différentes (Lazrak et al., 2015). Concernant les sources de nitrate, la méthode s'appuie sur l'hypothèse que les successions culturales sont indicatrices du niveau de risques Nitrate, risque calculé à partir d'un bilan entrées – sorties d'azote et d'un indice de lixiviation basé sur le taux de couverture des sols durant la période de drainage hivernal. Les successions culturales ont été identifiées à partir i) du traitement, par chaîne de Markov (Mari et al. 2013), des données RPG pour l'occupation des sols et du RGA 2010 pour la partie cheptels et bâtiments d'élevage, ii) de classifications proposées à dire d'expert pour les différents territoires et iii) des résultats d'enquêtes de terrain sur diverses zones agricoles, en complément de données déjà disponibles.

- Sur les trois bassins versants Grand Morin, Save et Haut Loir, largement dominés par les grandes cultures, la typologie, basée sur la seule succession culturelle s'est avérée opérationnelle : aux différentes classes de la typologie correspondent des niveaux d'émission d'azote différents, avec une variabilité intra succession modérée (cv 20-30%).
- Sur le bassin versant du Blavet, la diversité des systèmes de production - élevages d'herbivores, granivores, grandes cultures, cultures fourragères et légumières, combinés de diverses manières - s'est traduite, pour les 8 successions choisies au départ, par une large variabilité intra succession, à la fois sur les soldes de bilans et sur les indices de lixiviation. Un travail complémentaire a permis de proposer une nouvelle typologie des SdC, par analyse en composante principale sur les variables caractérisant les successions de cultures et les flux d'azote mis en jeu : 4 classes principales ont été retenues, l'axe 1 opposant les SdC avec ou sans prairies aux SdC spécialisées avec ou sans légumes, (axes 1+), tandis que l'axe 2 oppose des SdC à émission d'azote faible (2-) ou élevée (2+). 14 classes et sous classes rassemblent ainsi des SdC proches en termes de succession et de niveau d'émission d'azote (avec les seuils 5, 20, 40 et 70 kg N émis/ha/an). Afin de les spatialiser ces clusters ont été rattachés à la typologie initiale de Lazrak, et en intégrant également les informations acquises sur les substrats et la topographie.

Ces typologies permettent de décliner l'ensemble des scénarios retenus, en remplaçant les SdC réels par leurs équivalents optimisés en termes d'émission d'azote, avec des bilans proches de l'équilibre et une couverture des sols maximisée, pour le scénario « Pratiques optimisées », et en remplaçant les SdC les plus émetteurs par des SdC à faibles émissions, dominées par des prairies pâturées extensivement, mixtes ou fauchées. Ce remplacement peut être ciblé sur les zones les plus émettrices, selon le scénario « dilution », ou sur les

zones les plus rétentes (bas de versant) selon le scénario « rétention » (cf Laurène Casal et al.).

En conclusion, les typologies élaborées dans le cadre du projet Escapade ont montré que dans les systèmes dominés par les grandes cultures les successions culturales et des éléments du paysage sont de bons proxy des émissions d'azote vers l'eau, alors que dans les régions d'élevage, des données supplémentaires sur les systèmes de culture sont indispensable pour les prédire. En perspective, les typologies réalisées pourront, avec l'identification de clés de répartition des types de systèmes de production, permettre de construire des scénarios combinant des performances environnementales et de durabilité économique et sociale, privilégiant économie et autonomie pour réduire les intrants et les coûts de production, déclinables pour les différents systèmes de production.

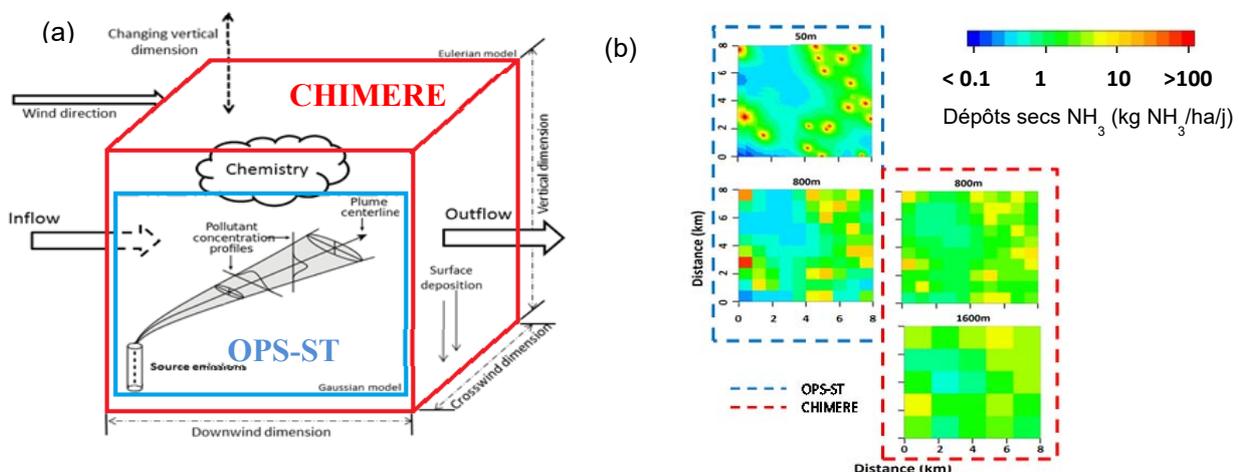
# Modélisation territoriale atmosphérique sur les typologies paysagères et changement d'échelle

N. Azouz, J.-L. Drouet, M. Beekmann, P. Cellier

Les activités agricoles sont les principales sources d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) émis dans l'atmosphère (706 kt/an, CITEPA 2016). Les fortes concentrations et les taux élevés de dépôts secs et humides de  $\text{NH}_3$  sur le sol et la végétation peuvent avoir un impact sur les écosystèmes sensibles situés à proximité des zones d'émissions. La grande variabilité spatiale des flux de  $\text{NH}_3$  rend difficile la production de cartes de dépôts de  $\text{NH}_3$  sur des échelles spatiales larges sans utiliser un grand nombre de mesures ou des modèles à haute résolution spatiale. Les impacts environnementaux des flux de  $\text{NH}_3$  sur les écosystèmes peuvent varier selon le modèle de dispersion, de transfert et de dépôt utilisé.

Nous avons comparé un modèle de panache gaussien (OPS-ST) permettant de simuler des pertes de  $\text{NH}_3$  à l'échelle locale de quelques dizaines de mètres, avec un modèle eulérien (CHIMERE) utilisant des mailles cubiques (résolution horizontale typique de 1 à 5 km de côté) et fonctionnant à l'échelle territoriale (transfert et dépôts à des distances de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres de la zone d'émissions). Deux cas d'étude ont été construits pour comparer le comportement des deux modèles : le premier cas était complètement théorique et idéalisé et le second était adapté des typologies paysagères établies dans l'un des territoires du projet, celui du Blavet en Bretagne caractérisé par une forte activité d'élevage. Des scénarios ont été créés pour ces deux cas d'étude en modifiant la résolution spatiale des modèles (i.e. tailles des mailles), les conditions météorologiques, la localisation et l'intensité des émissions par les bâtiments d'élevage, ainsi que les occupations des sols agricoles (e.g. parcelles cultivées) ou semi-naturelles (e.g. forêts, prairies).

Les résultats indiquent que la structure des deux modèles (i.e. hypothèses, formalismes), la résolution spatiale, la distribution spatiale des émissions et les occupations des sols ont généré des différences importantes dans les prédictions des concentrations et des dépôts spatialisés de  $\text{NH}_3$ , alors que les dépôts moyens de  $\text{NH}_3$  simulés par chacun des deux modèles sont relativement similaires sur un domaine de simulation donné. Il en résulte des répartitions spatiales des dépassements de charges critiques en  $\text{NH}_3$  très différentes entre les deux modèles. Ces résultats mettent en évidence de manière quantitative que les modèles territoriaux utilisant de grandes mailles ne permettent pas de détecter les dépassements de charges critiques en  $\text{NH}_3$ , en particulier dans les territoires avec des hot-spots d'émission de fortes intensités. Une des perspectives est d'intégrer les connaissances acquises avec les modèles fonctionnant à l'échelle locale dans les modèles territoriaux.



- Principes des modèles CHIMERE (mailles eulériennes) et OPS-ST (panache gaussien).
- Dépôts secs de  $\text{NH}_3$  simulés avec les 2 modèles pour différentes résolutions spatiales.

# Modélisation de la cascade de l'azote à l'échelle des territoires: Evaluation des pertes, des transferts et des rétentions d'azote; Exploration de scénarios de modifications paysagères

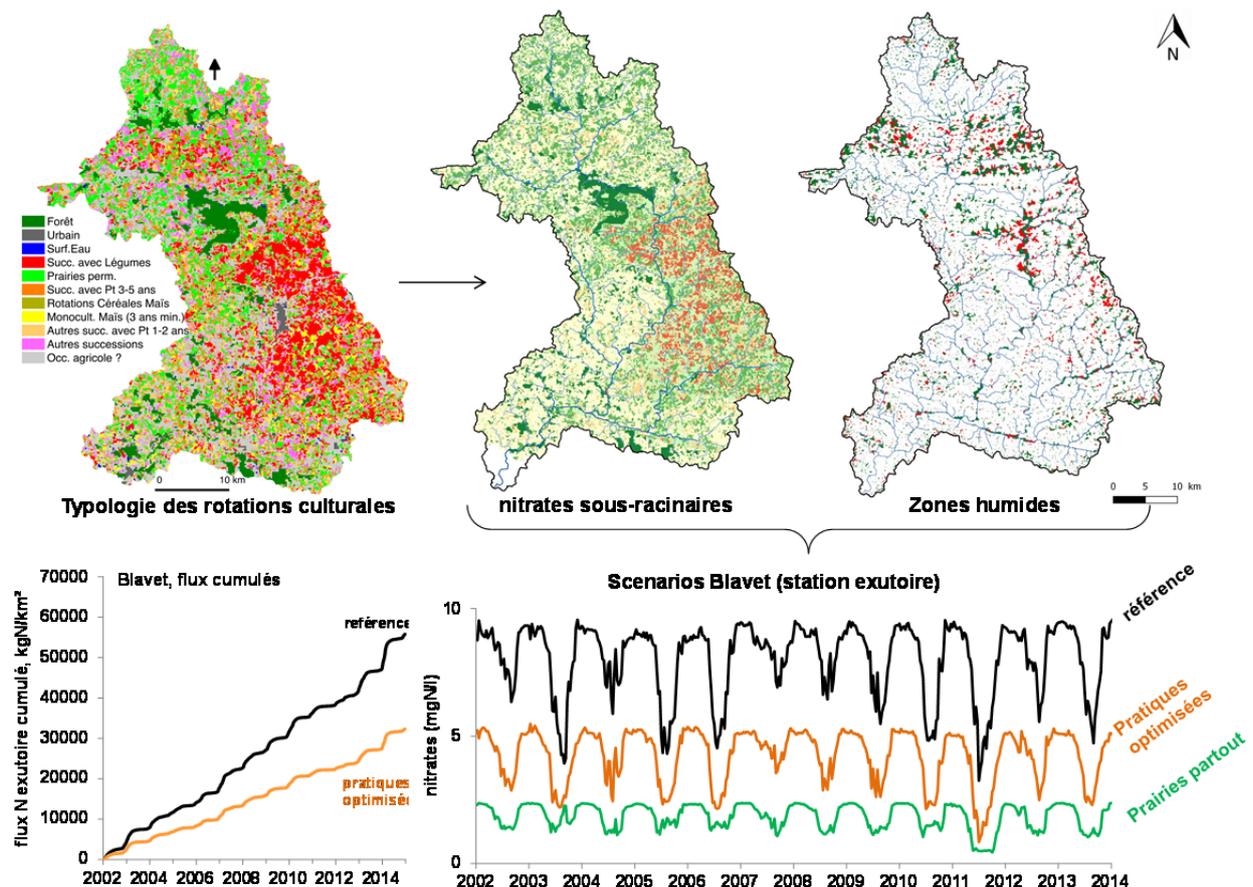
G. Billen, A. Ramarson, J. Garnier, S. Sauvage, F. Vertès

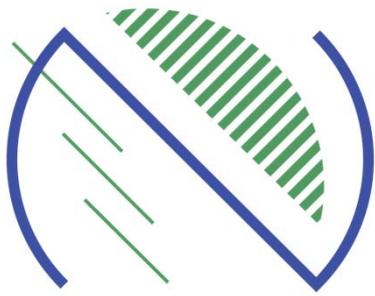
La question posée par le projet ESCAPADE est d'évaluer dans quelle mesure le levier de la gestion des éléments paysagers permet de retenir une partie des pertes environnementales d'azote engendrées par l'activité agricole.

Les différents modèles appliqués et développés dans le projet ESCAPADE (NuttingN, SWAT et SENEQUE/RIVERSTRALER) pour représenter la partie hydrologique de la cascade de l'azote à l'échelle des territoires permettent

- (1) d'évaluer les flux d'azote de l'agriculture vers l'hydrosystème et l'effet de l'optimisation des pratiques sur ces flux et sur les concentrations des eaux de surface.
- (2) d'évaluer la 'rétention' des zones humides riveraines et l'effet qu'on peut attendre de la remise en herbe des zones humides actuellement en culture
- (3) d'évaluer l'effet des retenues collinaires.

Il apparaît clairement que l'optimisation des pratiques agricoles est, après la mise en défens d'une part significative des surfaces cultivées, le levier le plus efficace pour atténuer, à la source, les dommages liés à la cascade de l'azote.





ESCAPADE

<http://www.n-escapade.fr/>

Partenaires

ECOSYS, INRA-AgroParisTech, Grignon  
 SAS, INRA-AgroCampus, Rennes  
 ASTER, INRA, Mirecourt  
 SOLS, INRA, Orléans  
 MalAGE, INRA, Jouy-en Josas  
 PEGASE, INRA-AgroCampus, Rennes  
 FIRE : METIS, UPMC-CNRS, Paris  
 IRSTEA, Antony  
 MinesParisTech, Fontainebleau  
 ECOLAB, CNRS-UPS-INPT, Toulouse  
 ARVALIS-Institut du Végétal, Boigneville  
 TERRENA, Angers  
 TRISKALIA, Landerneau

Sous-contractants

INRA-Transfert, Paris  
 CERFACS, Toulouse  
 LISIC, Calais  
 BEF, INRA, Nancy  
 BIA, INRA, Toulouse  
 CESBIO, Toulouse  
 LISA, CNRS-UP7-UP12, Créteil  
 Terres Inovia, Grignon

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

1<sup>er</sup> février 2013 – 31 juillet 2017

Jean-Louis Drouet (ECOSYS) et coll.

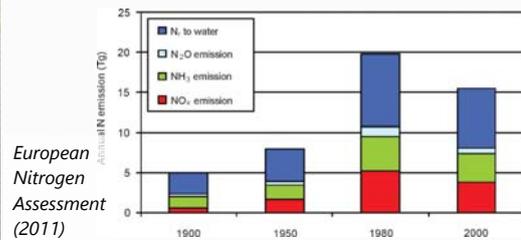
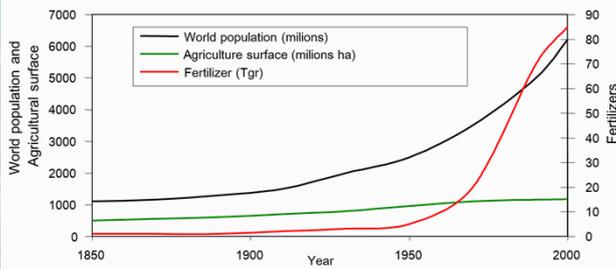
Séminaire de clôture – 23 juin 2017 – Paris



ANR-12-AGRO-0003



Enjeux de l'azote en agriculture



Multi-polluants : N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>...

Multi-sources : agriculture, fossile, naturel

Multi-récepteurs : cultures, prairies, forêts, cours d'eau, humains...

Multi-impacts : GHG, air, sols, eaux, biodiversité, santé...

→ **Nécessité d'approches intégrées**

ESCAPADE

## Impacts des excès d'azote sur les écosystèmes

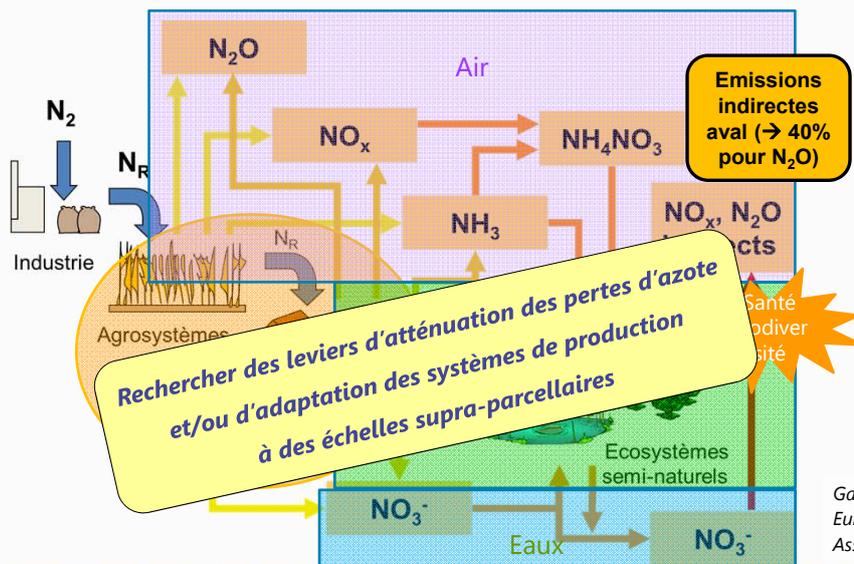


- **Gauche:** lichen dans un environnement naturel
- **Droite:** lichens remplacés par des algues sous l'effet de l'ammoniac

- **Excès d'azote en zone côtière** sur la formation d'algues à l'origine de la formation de mousse gélatineuse

ESCAPADE

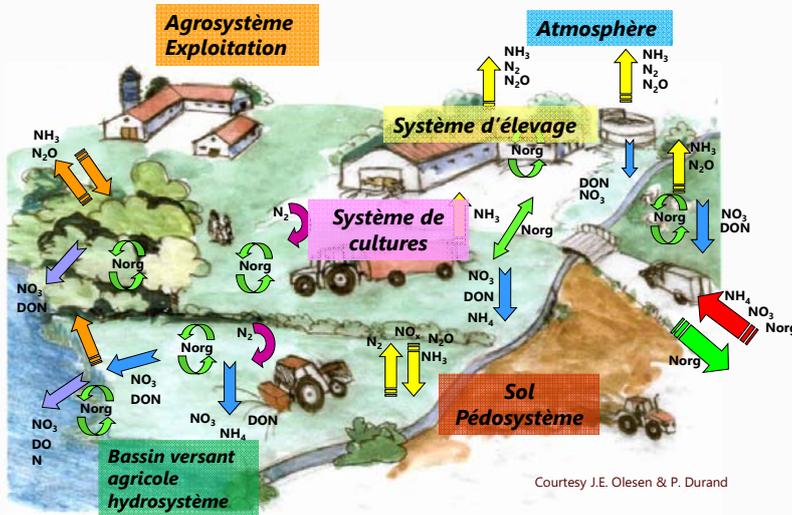
## Cascade de l'azote dans les paysages



Galloway et al., 2003)  
European Nitrogen  
Assessment (2011)

ESCAPADE

## Complexité des flux d'azote dans les paysages



Courtesy J.E. Olesen & P. Durand

### Paysage

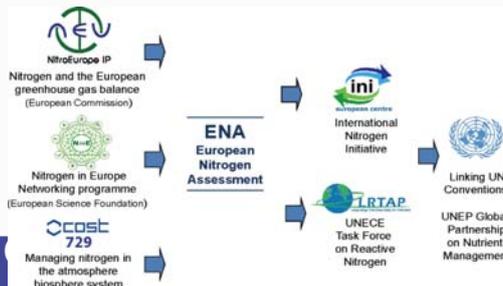
- ✓ Ensemble de **sources** (activités **anthropiques** : bâtiments d'élevage, parcelles cultivées...) et de **puits** d'azote (zones **semi-naturelles** : prairies permanentes, bandes enherbées, haies, forêts, fossés, cours d'eau...)
- ✓ De **distribution hétérogène** et d'**intensités variables**
- ✓ En **interaction spatiale** et **temporelle**
- **Système complexe**
- **Processus nombreux**
- **Impacts multiples**

ESCAPADE

## Historique d'ESCAPADE



- **Quelques projets sur la cascade de l'azote dans les petits paysages lors du montage d'ESCAPADE**  
 FP6-NitroEurope (2006-2011) – Composante « Landscape Analysis » → NitroScape  
 ANR-ACASSYA (2009-2012) – « ACompagner l'évolution Agro-écologique de Systèmes d'élevAge dans les bassins versants côtiers » → Casimod'N
- **Quelques projets en cours dans les grands paysages lors du montage**  
 Hydrologie : Piren-Seine, GAGILAU, AQUAFLASH  
 Atmosphère : NOGAS, cadastres NH3, FP7-ECLAIRE  
 Agro-systèmes : FUTUROL, FP7-AnimalCHANGE, FP7-CANTOGETHER
- **Contexte international**
- **Contexte GIS GC-HP2E « Cascade de l'azote »**  
 2009-2010 : AMI « Gestion N dans les paysages »  
 → projet retenu, Séminaire « Cascade N »  
 2011 : Panorama des équipes N en France, opportunité de montage de projet(s)  
 2012 : Montage **ESCAPADE** → sélectionné 😊



ESCAPADE



## Concepts généraux et structure du projet ESCAPADE

4 sites et territoires contrastés (climats, sols, pratiques)



**Kervidy-Naizin** (4.9 km<sup>2</sup>)  
 → **Blavet** (2029 km<sup>2</sup>)  
 Climat tempéré humide  
 Sol cristallin  
 Polycultures  
 Elevage intensif  
 Depuis 1992

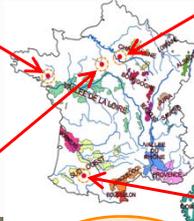


**T1**  
**Scenarios**  
**Gestion N**  
**Motifs paysagers**

**Avenelles** (50 km<sup>2</sup>)  
 → **Grand Morin** (1200 km<sup>2</sup>)  
 Climat semi-continental  
 Sol marneux  
 Polycultures-forêt  
 Quelques élevages  
 Depuis 1962



**T4 & T5**  
**Collecte et gestion**  
**des données N**  
**Sites**



**T2**  
**Modélisation**  
**cascade N**  
**Sites**  
 (3-50 km<sup>2</sup>)

**OS<sup>2</sup>** (10 km<sup>2</sup>)  
 → **Haut-Loir**  
 Climat semi-continental  
 Sol sédimentaire drainé  
 Polycultures  
 Depuis 2008



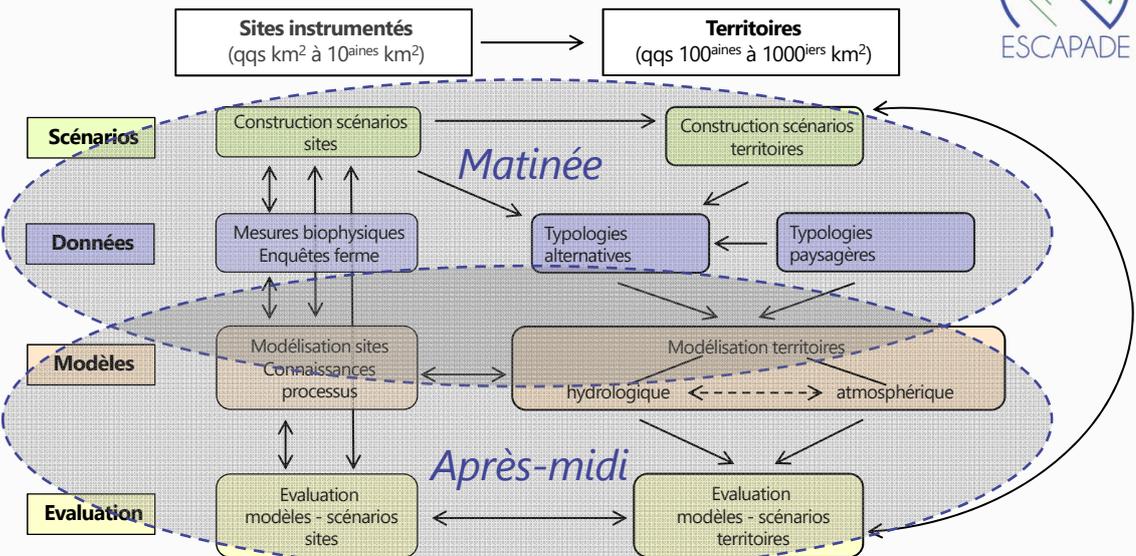
**T3**  
**Modélisation**  
**cascade N**  
**Territoires**  
 (qqs 100-1000 km<sup>2</sup>)



**Auradé** (3.2 km<sup>2</sup>)  
 → **Save** (1115 km<sup>2</sup>)  
 Climat semi-aride  
 Substrat imperméable  
 Polycultures  
 Depuis 1982

ESCAPADE

## Interdisciplinarité et synergies dans ESCAPADE



ESCAPADE

## Concept et programme du séminaire



Concepts généraux

10h00-10h40 : **Introduction : objectifs et concepts du projet et du séminaire**

**Les scénarios en fil conducteur** (Jean-Louis Drouet et François Laurent)

10h40-11h30 : **Modélisation de la cascade de l'azote dans les sites et les territoires du projet**

Concepts généraux de la modélisation aux deux échelles : sites et territoires (Patrick Durand et Antsiva Ramarson)

11h30-11h45 : *Pause café*

11h45-12h35 : **Données collectées pour la modélisation des scénarios dans les sites et les territoires**

Concepts généraux d'acquisition des données sur les structures paysagères, les pratiques agricoles et les flux et concentration d'azote (Pierre Cellier et Catherine Pasquier)

Flux d'azote mesurés sur les sites : exemple de l'Orgeval/Avenelles (Josette Garnier)

Résultats - Discussion

12h35-14h00 : *Buffet*

14h00-15h50 : **Evaluation des scénarios par la modélisation dans les sites et les territoires et confrontation aux données**

Sites : modélisation des scénarios réels et hypothétiques (Cyril Benhamou et Laurene Casal)

Sites et territoires : production de typologies paysagères : exemple du Blavet en Bretagne (Françoise Vertès) modélisation atmosphérique des dépôts d'azote (Niramson Azouz)

Territoires : modélisation des flux hydriques à partir des typologies et des scénarios (Gilles Billen)

15h50-16h35 : **Discussion générale**

16h35-16h45 : **Conclusion et clôture du séminaire**

# ESCAPADE



Merci aux  
contributeurs  
et financeurs



ANR  
ANR-12-AGRO-0003



Séminaire 23 juin 2017



George Abitbol

## Les scénarios Sites & Territoires

F. Laurent (Arvalis), L. Casal (Doctorante UMR SAS)  
S. Gironde (Terrena), D. Craheix (Triskalia),

## Contexte



### • 2 échelles :

- **sites** « instrumentés » (Auradé (AU), Naizin (NZ), Orgeval (OR), OS<sup>2</sup>)
- **territoires** : *échelle qui englobe la précédente, à laquelle se définissent les enjeux environnementaux et les modalités de gestion*

### • 3 types de leviers :

- Diminuer les entrées d'azote sur le territoire
- Modifier la gestion « intra » territoire de l'azote
- **Modifier les caractéristiques paysagères.**

- **Définition scénario** : une ou plusieurs mesures combinées sur une ou plusieurs zones du site / territoire. (Une même mesure appliquée à des zones distinctes correspond à des scénarios distincts).

ESCAPADE

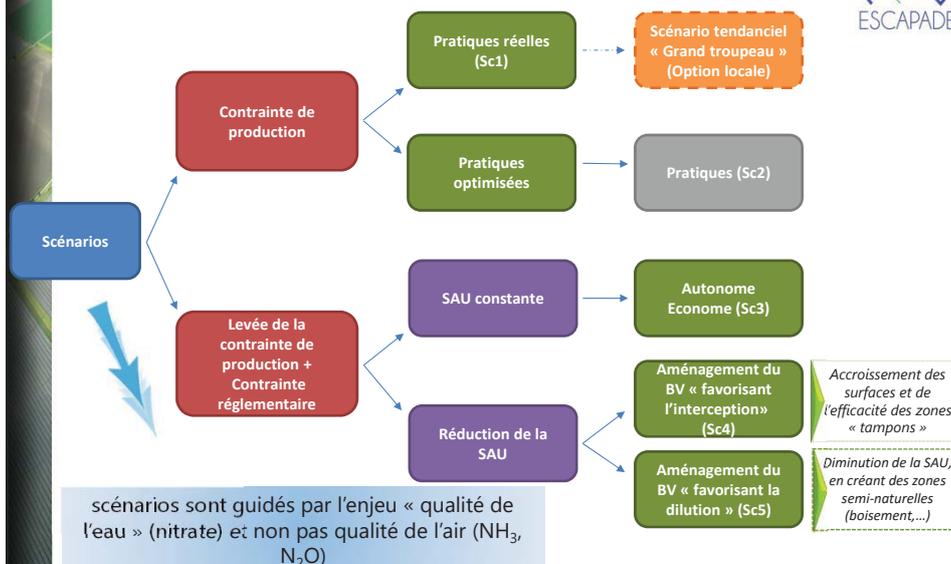
## Réflexions « Sites »



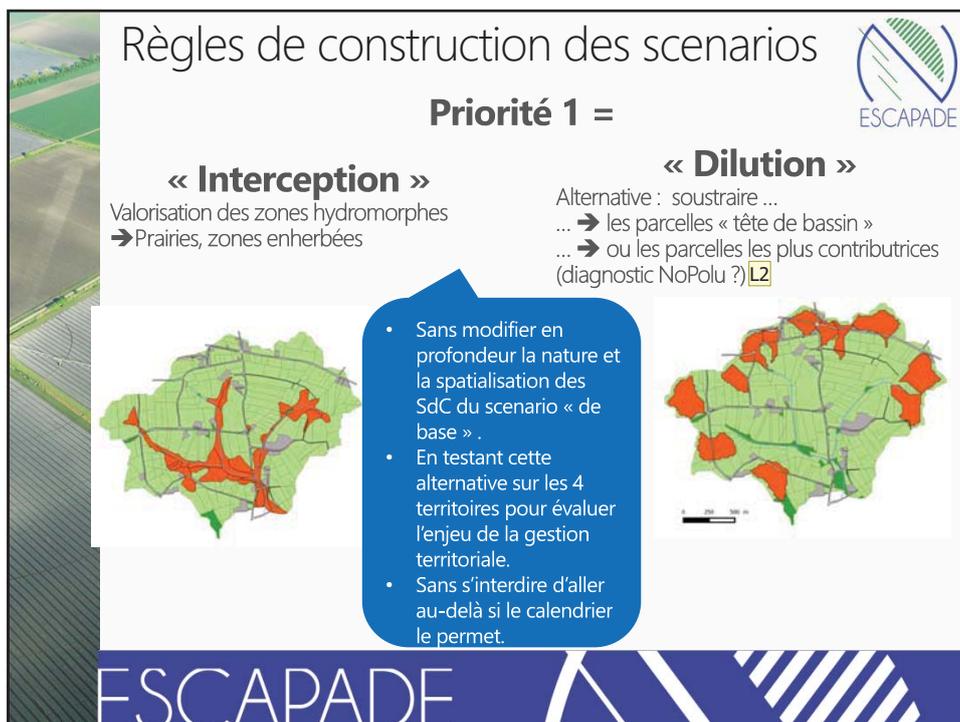
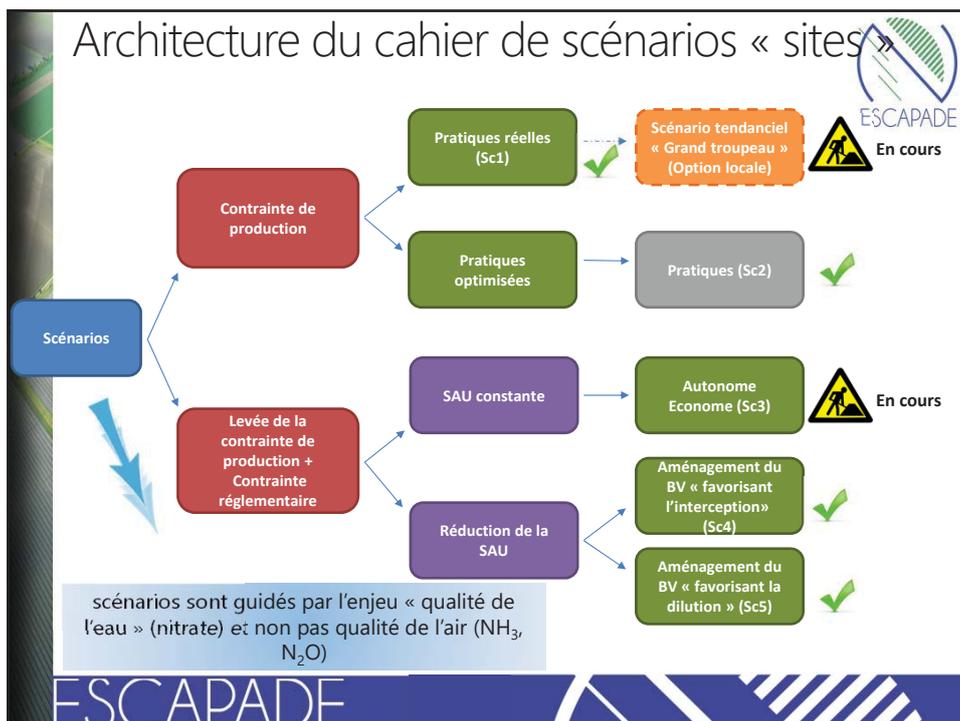
- **Pas de temps** : 10 ans (sur années climatiques observées)
- **Pas de phase de transition**
- **Privilégier des scénarios « paysagers » qui cumulent les effets de plusieurs mesures** (haies, zones enherbées, zones humides, ...), à effet maximal sur la limitation des flux de Nr.
- **un scénario « de référence » constitué des pratiques agricoles « réelles »** observées (ou reconstituées) sur la dernière décennie.
- **un scénario « optimisation »** : sur la base de S0, ajuster les itinéraires techniques
- **une option extrême dite « blanc » : couverture intégrale du bassin par de la prairie fauchée non fertilisée.** Deux objectifs :
  - « **intrasite** » : fournir le temps de réponse et le niveau de stabilisation potentiel (extrême) des flux de Nr
  - « **intersite** » : comparer l'effet de modalités de gestion mises en œuvre sur plusieurs bassins (haies, Cipan, bandes enherbées, ...) en « centrant » les flux de Nr par rapport à ceux calculés sur cette modalité « blanc »

ESCAPADE

## Architecture du cahier de scénarios « sites »



ESCAPADE



# Scenarios « Territoires »



Les « territoires » offrent d'autres opportunités liées à une plus grande surface :

- Produits organiques : échanges, transferts, ...
- Zones humides
- Repositionnement de systèmes de culture selon «sensibilité» aux pertes N.

## ➤ Privilégier les 2 scénarios alternatifs « interception » et « dilution ».

- « **interception** » : localiser des bandes enherbées, haies , zones boisées, prairies sur des fonds de talwegs développés sur les zones hydromorphes). Les surfaces soustraites à l'agriculture se limitent à des « infrastructures écologiques » de faible emprise spatiale.
- « **dilution** » : localiser des occupations du sol non agricoles, soit sur les zones amont (têtes de bassin), soit sur les parcelles les plus contributrices.

## ➤ Les performances des scénarios alternatifs sont évaluées par rapport au scénario «pratiques optimisées »

## ➤ Dans un second temps : des scénarios mettant en œuvre d'autres systèmes de production, allant au-delà des options « dilution » et « interception », et qui ont également des implications paysagères.

ESCAPADE



Quelques réflexions complémentaires des partenaires





# 1 Attentes / motivations

En quoi les échelles « intermédiaires » nous offrent des leviers d'action complémentaires voire plus efficaces que ce qu'on sait classiquement faire ?

Hiérarchiser les leviers d'actions selon leur efficacité (identifier des leviers actionnables par les agriculteurs)

Coupler les approches environnementales et économiques

- à l'échelle des exploitations
- à l'échelle du territoire



# 2 Points d'attention

- **Prise en charge hétérogénéités « intra »** : les leviers liés au réglage individuel des techniques ou des systèmes sont encore importants
- **Impacts économiques chiffrés de manière indirecte et partielle** (exploitations agricoles types) : point de vigilance.
- **Faisabilité future des scénarios** dépendra aussi de la phase de transition
- **Changement d'échelle** :
  - ✓ Mobilisation de modèles de nature différente aux deux niveaux d'échelle (« site » vs « territoire ») : les processus pris en charge sont différents et/ou formalisés de façon distincte : il faut accepter de ne pas répondre aux mêmes questions sur des enjeux pourtant identiques
- **Quelle incertitude sur les variables de sortie ?** (à resituer dans stratégie prise décision).
- **L'organisation territoriale des filières est déterminante dans la performance attendue des scénarios** (« densité » de collecte, de transformation...) et en conséquence sur leur faisabilité économique (et sociale.)
- Considérer aussi la **dynamique d'évolution des exploitations** (agrandissement des troupeaux → impact sur l'assolement, les itinéraires techniques, la concentration des effluents en bâtiment...)







## Modélisation de la cascade de l'azote dans les territoires du projet

A. Ramarson (UMR METIS)

### Problématique de la T3



- **La question d'ESCAPADE :**

- Existe-t-il des configurations paysagères qui permettent de limiter les effets en cascade des pertes d'azote agricole ? De '**retenir**' l'azote perdu?

- **La spécificité de la T3 :**

- Développer une modélisation opérationnelle de la cascade de l'azote à l'échelle des territoires

De l'échelle du site instrumenté  
(1-10 km<sup>2</sup>)

Auradé  
Naizin  
Avenelles  
OS<sup>2</sup>



À celle du territoire  
(100-10000 km<sup>2</sup>)

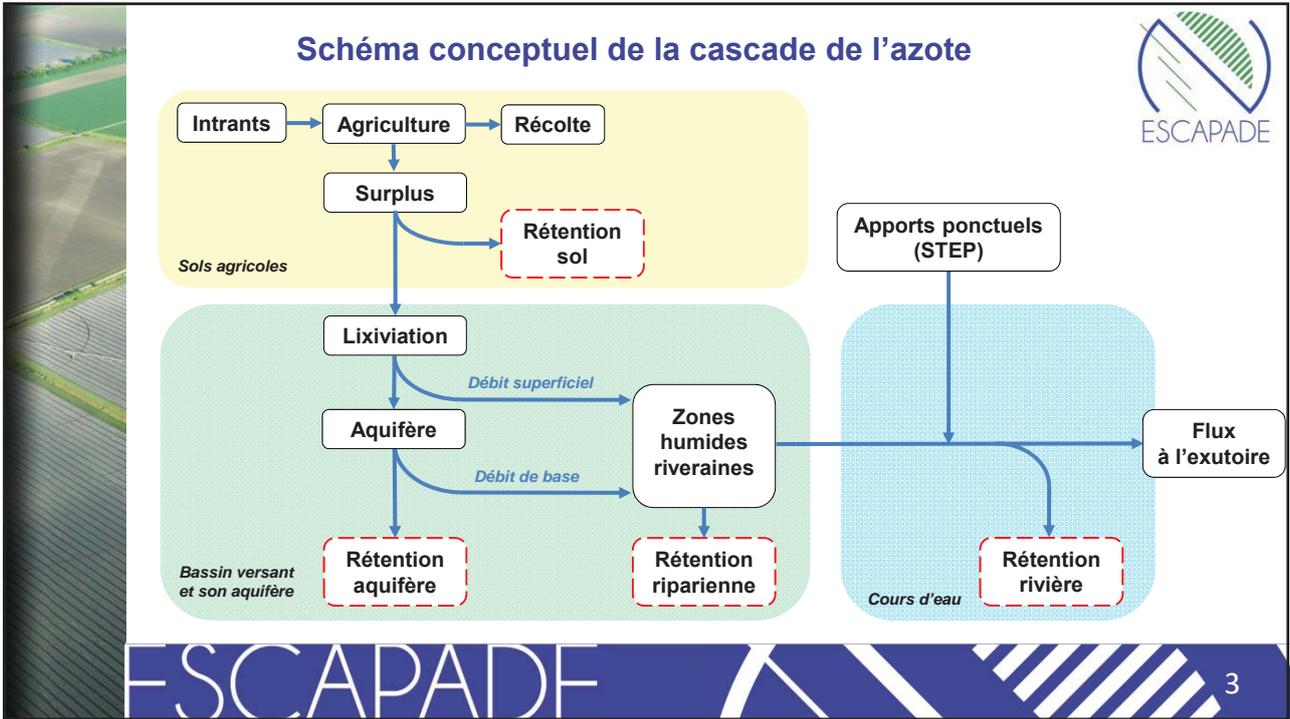
Save  
Blavet  
Grand Morin  
Haut-Loir



- Mettre en évidence les postes de rétention de l'azote à l'échelle du territoire

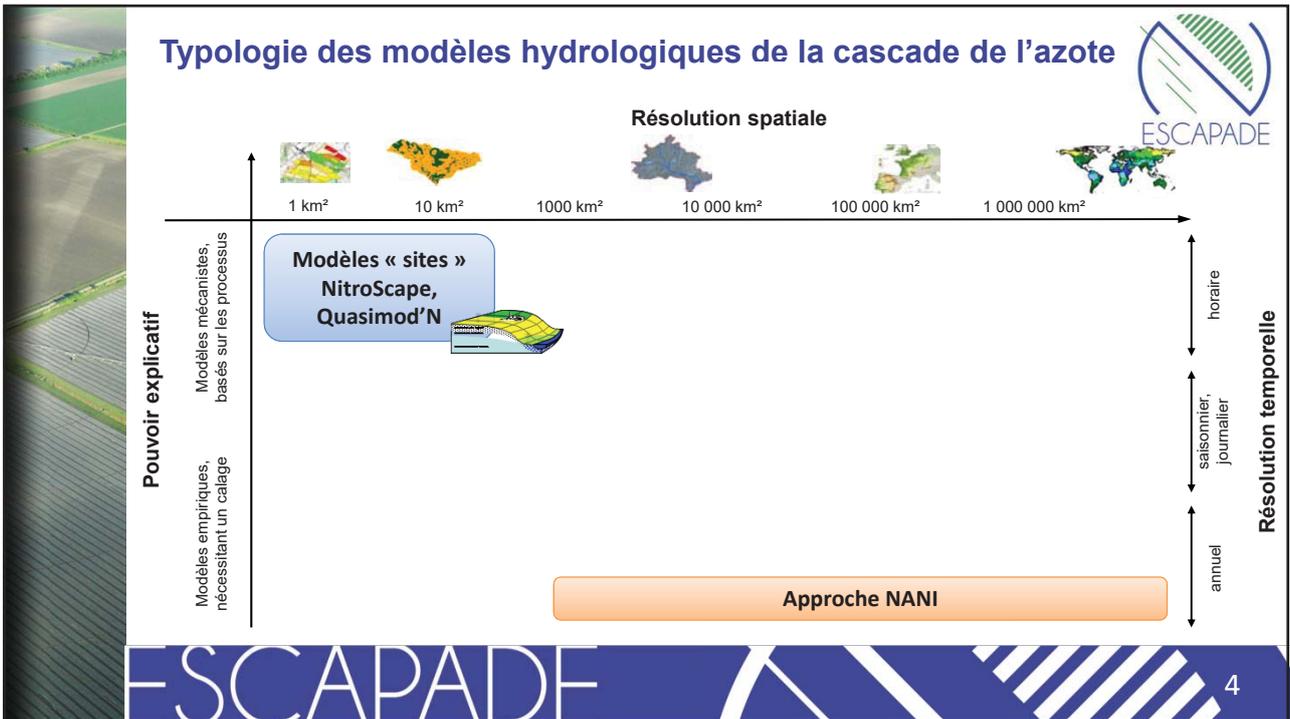
- Situation de référence → Base pour l'optimisation paysagère (scénarisation)

# ESCAPADE



ESCAPADE

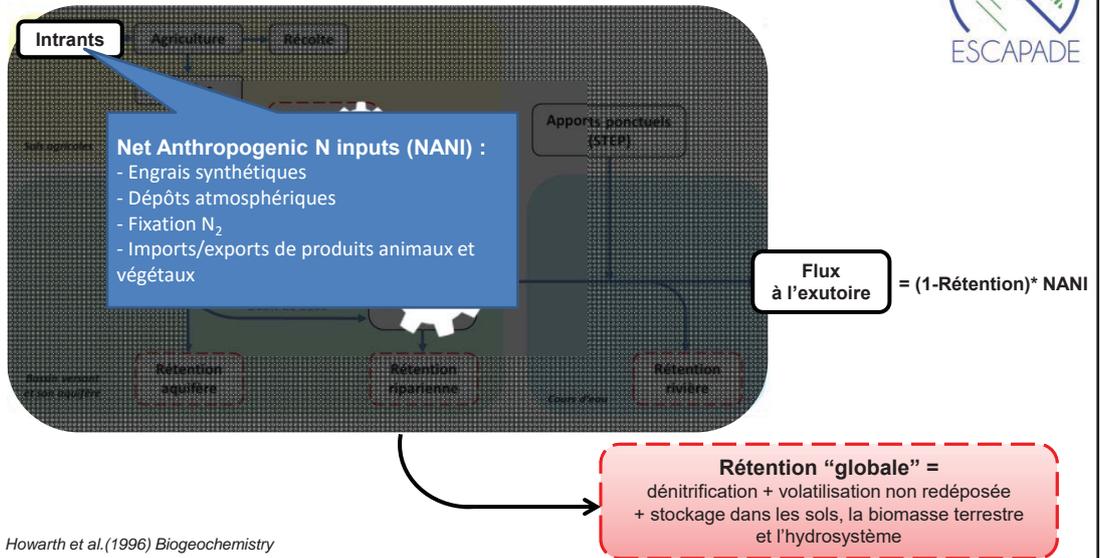
3



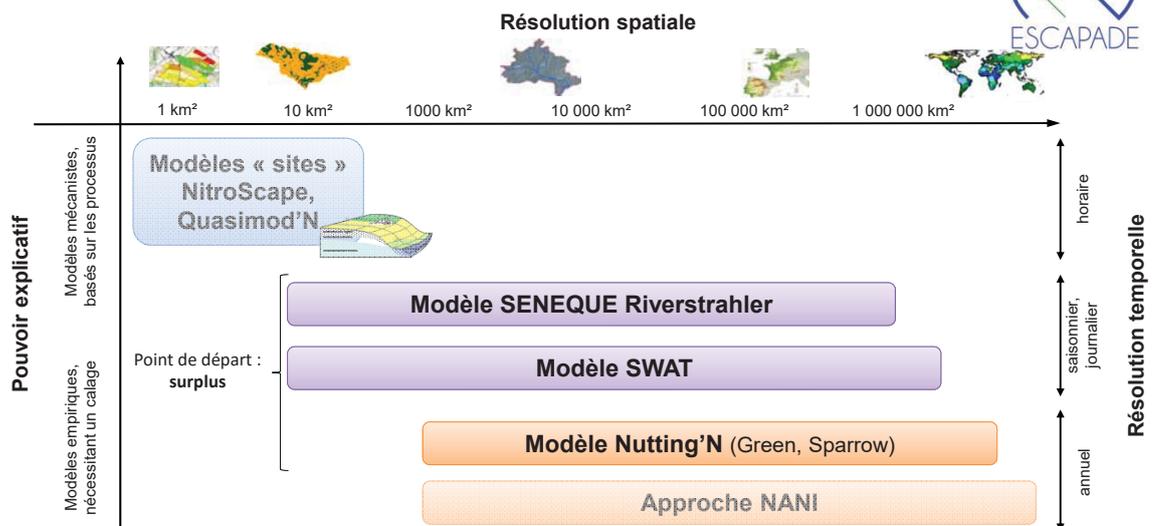
ESCAPADE

4

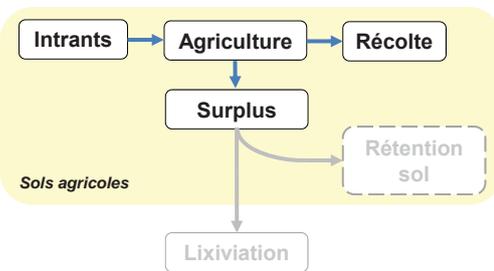
## Approche NANI : bilan d'azote entrée-sortie



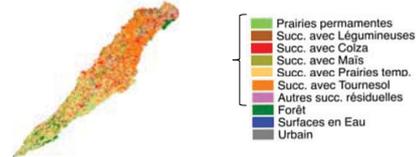
## Typologie des modèles hydrologiques de la cascade de l'azote



## Outil GRAFS : calcul du surplus (SENEQUE-Riverstrahler et Nutting'N)



### 1. Typologie de systèmes de cultures (Lazrak) (résolution spatiale)



### 2. Bilan d'azote de chaque système de cultures à l'échelle d'un cycle de rotation (résolution temporelle)

- Rotation culturale
- Usage du sol
- Itinéraire technique

A noter :

- Autre méthode de calcul du surplus utilisée par l'UMR SAS (NOPOLU)
- SWAT intègre directement le calcul du surplus (module agronomique)

## Trois approches de modélisation à confronter



**Nutting'N**  
(UMR SAS)

Dupas et al., 2013, 2015 ;  
Legeay et al., 2016

**SWAT**  
(UMR EcoLab)

Arnold et al., 1998, 1999 ;  
Neitsch et al., 2005

**SENEQUE  
Riverstrahler**  
(UMR METIS)

Billen et al., 2000 ;  
Ruelland et al., 2007

	Principe	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Nutting'N (UMR SAS) <i>Dupas et al., 2013, 2015 ; Legeay et al., 2016</i>			
SWAT (UMR EcoLab) <i>Arnold et al., 1998, 1999 ; Neitsch et al., 2005</i>			
SENEQUE Riverstrahler (UMR METIS) <i>Billen et al., 2000 ; Ruelland et al., 2007</i>			

## Trois approches de modélisation à confronter



### Nutting'N (UMR SAS)

Dupas et al., 2013, 2015 ;  
Legeay et al., 2016

### SWAT (UMR EcoLab)

Arnold et al., 1998, 1999 ;  
Neitsch et al., 2005

### SENEQUE Riverstrahler (UMR METIS)

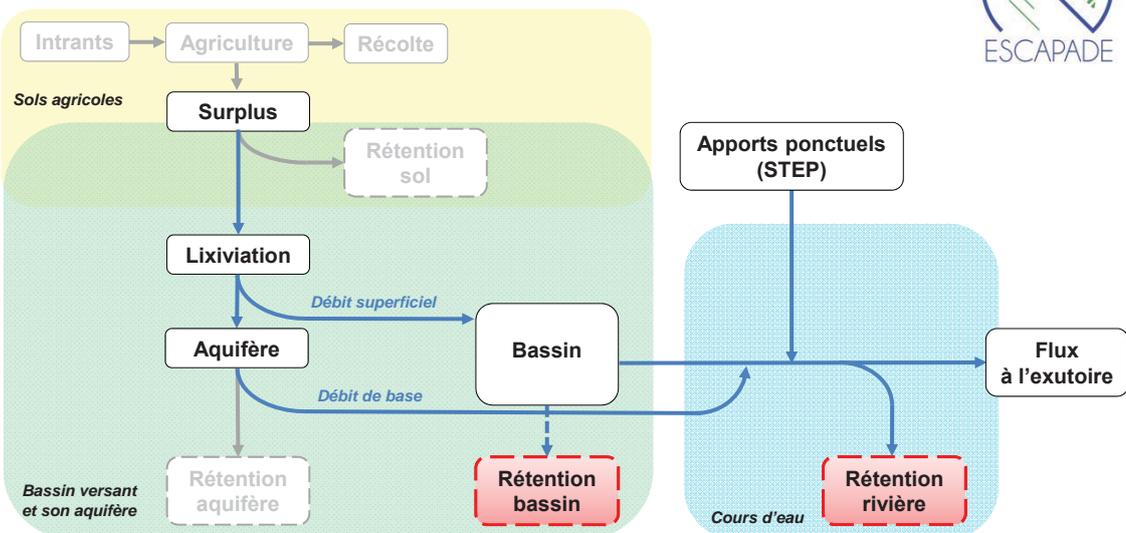
Billen et al., 2000 ;  
Ruelland et al., 2007

	Principe	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Nutting'N (UMR SAS)	Approche empirique calibrée sur un large échantillon de bassins versants à l'échelle nationale et régionale	Tout le bassin	Moyenne pluri-annuelle
SWAT (UMR EcoLab)			
SENEQUE Riverstrahler (UMR METIS)			

ESCAPADE

9

## Modèle Nutting'N



ESCAPADE

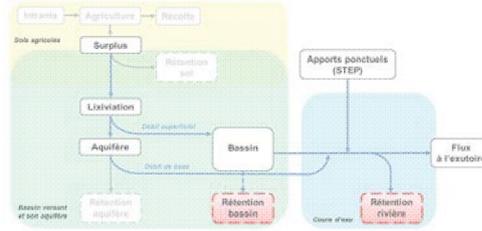
10

## Modèle Nutting'N



Deux postes de rétention de l'azote

- Calibration nationale
- Calibration régionale en fonction du type de substrat géologique



Rétention bassin

Rétention rivière

$$= \exp[-983 / pe - 0,0105 * \% ZPHTF - 0,000604 * IDPR] \text{ Surplus} * (1 - BFI)$$

$$= \exp(-0,000569 * HL) [\text{App diffus} + \text{App Ponctuels}]$$

- Pluies efficaces

- % Zones potentiellement humides à très forte probabilité
- Indice d'aptitude du sous-sol au ruissellement ou à l'infiltration
- Base Flow Index = écoulement de base / écoulement total

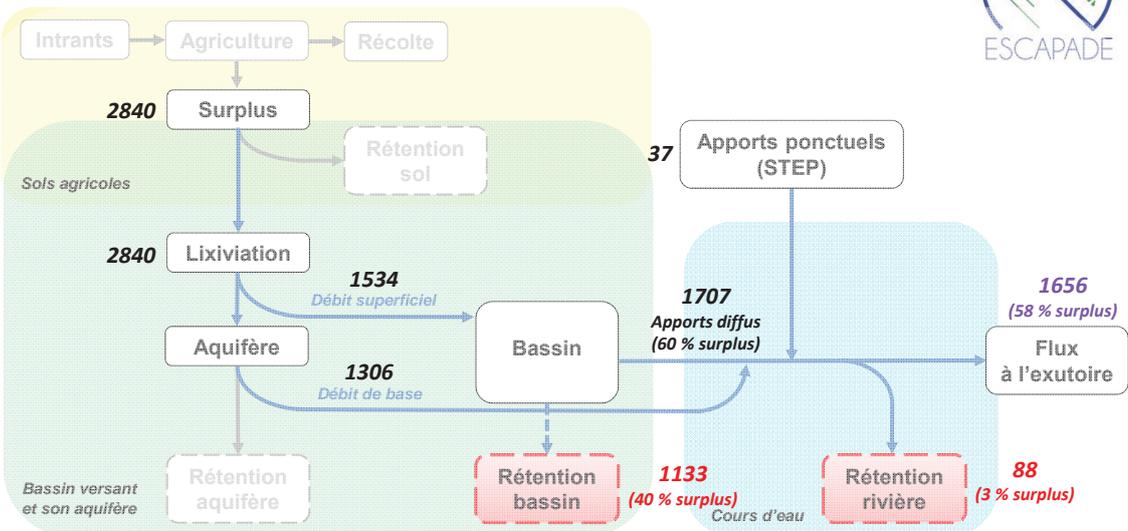
- Charge hydraulique

(temps de résidence des drains / profondeur moyenne des cours d'eau)

ESCAPADE

## Résultats Nutting'N : Save (calibration nationale)

TN/an



ESCAPADE

## Trois approches de modélisation à confronter



### Nutting'N (UMR SAS)

Dupas et al., 2013, 2015 ;  
Legeay et al., 2016

### SWAT (UMR EcoLab)

Arnold et al., 1998, 1999 ;  
Neitsch et al., 2005

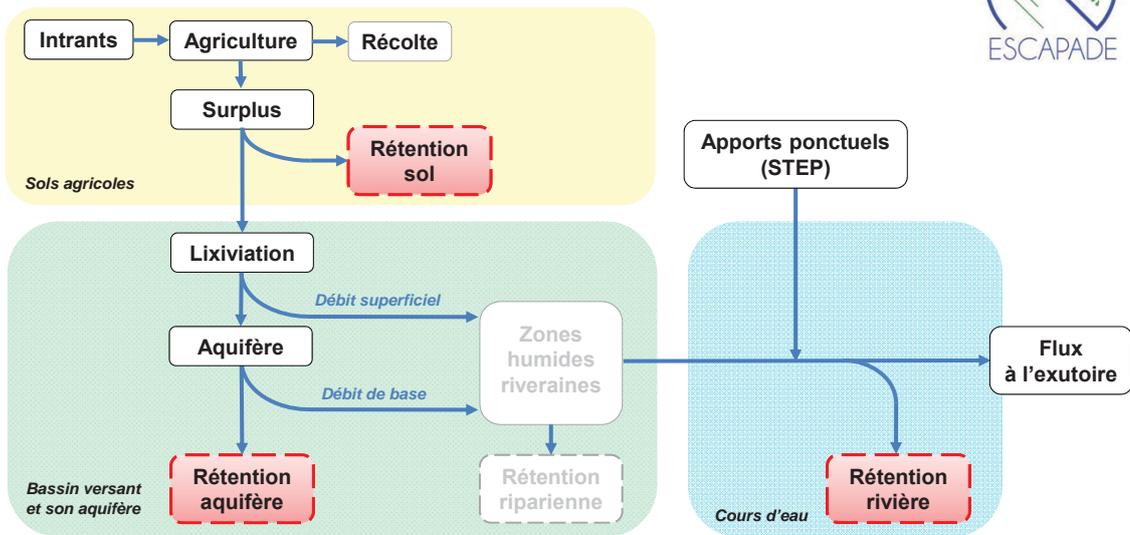
### SENEQUE Riverstrahler (UMR METIS)

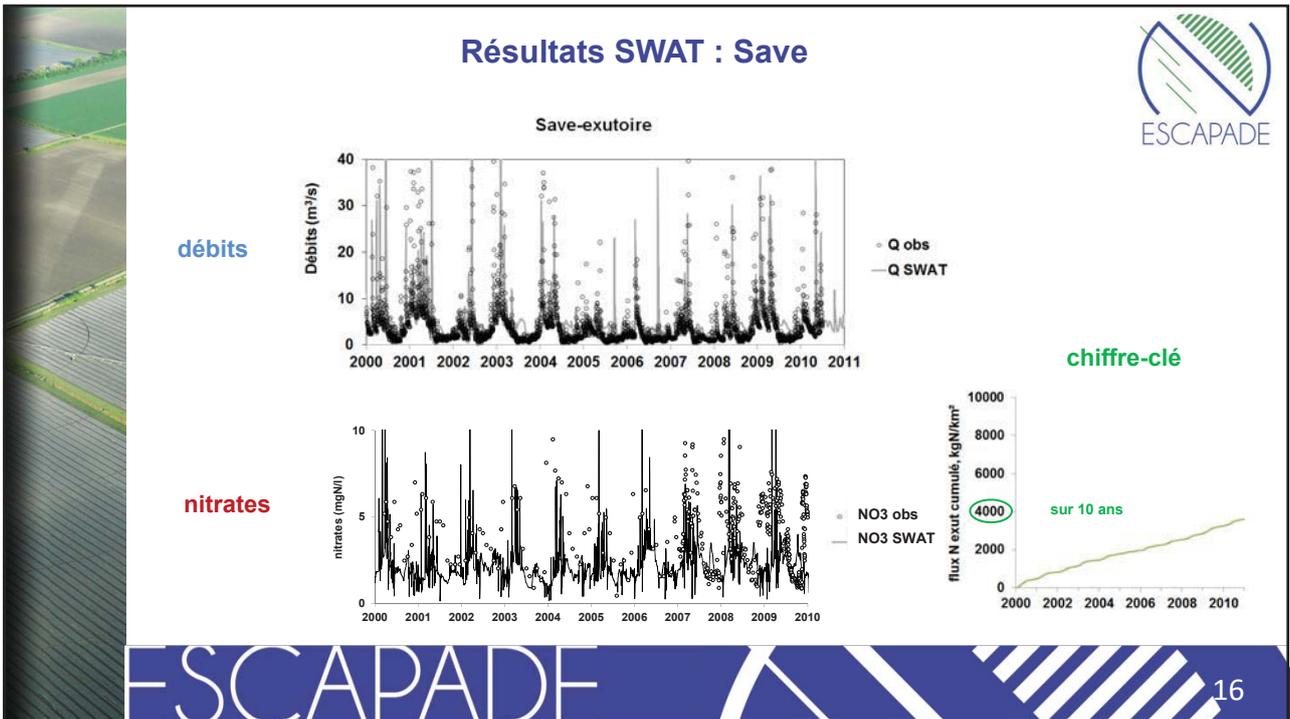
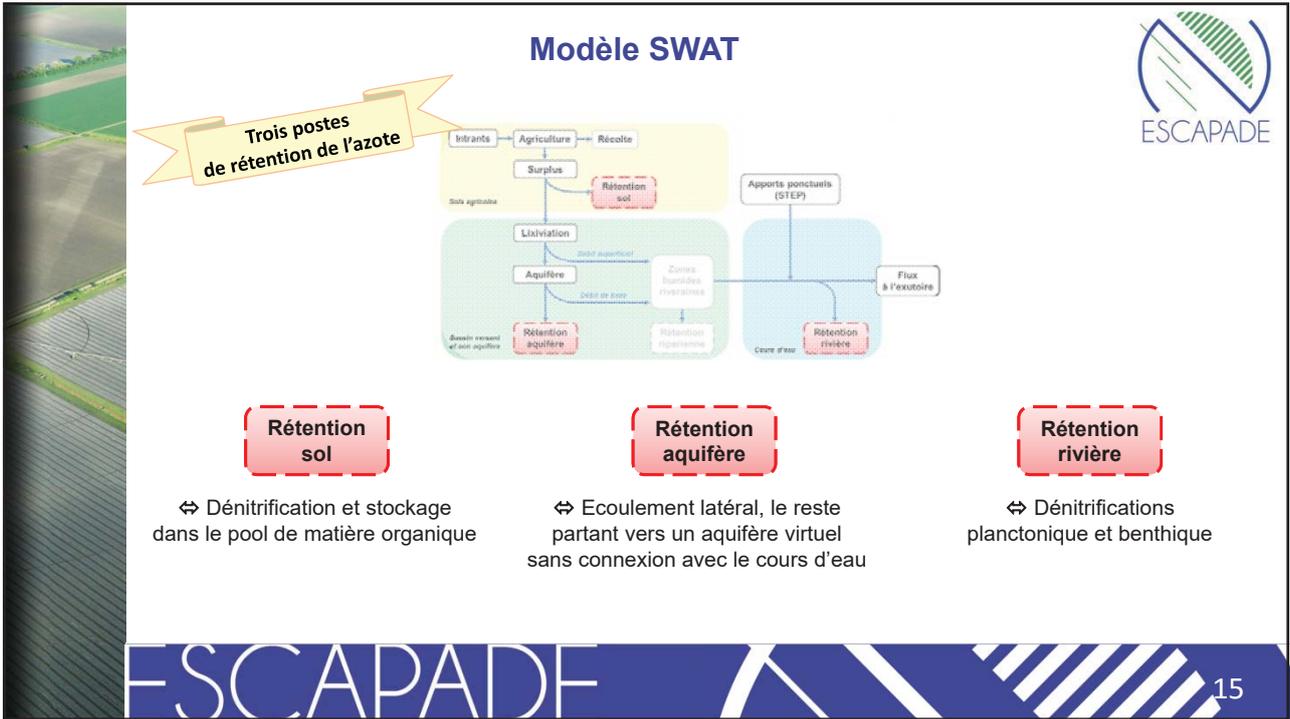
Billen et al., 2000 ;  
Ruelland et al., 2007

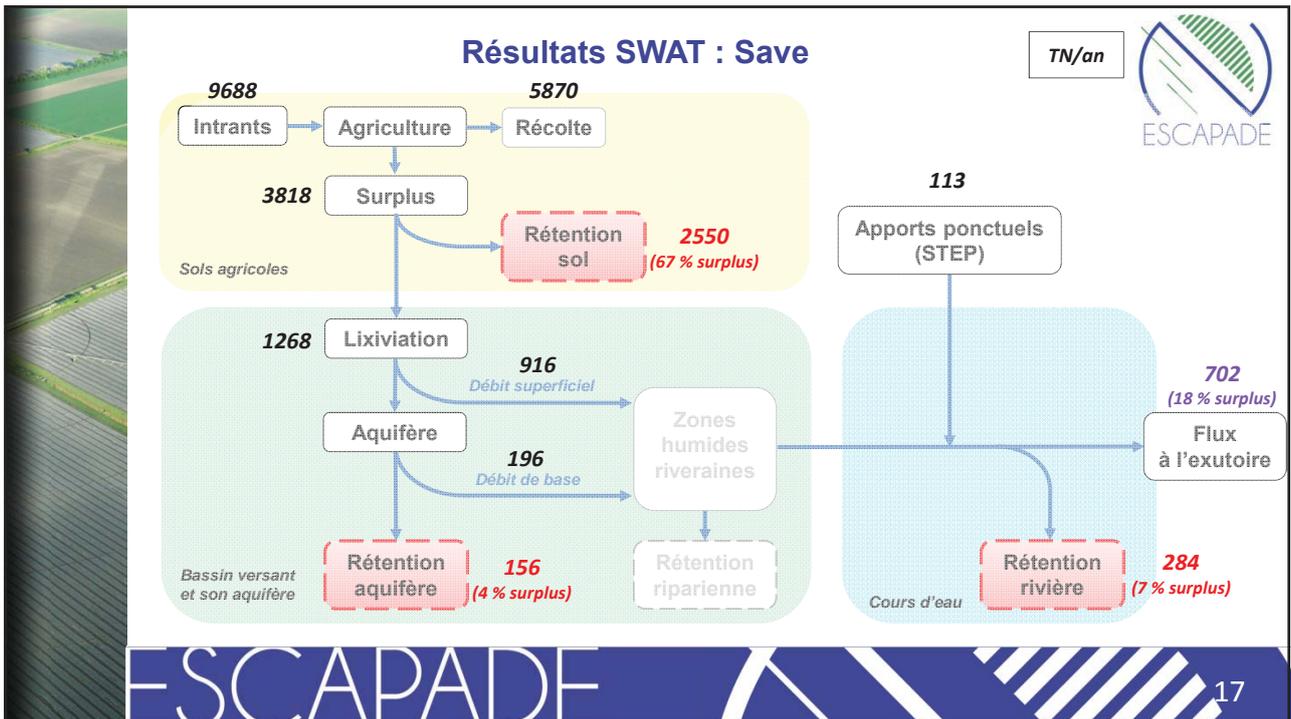
Principe	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Approche empirique calibrée sur un large échantillon de bassins versants à l'échelle nationale et régionale	Tout le bassin	Moyenne pluri-annuelle
Approche déterministe sur les systèmes de culture (EPIC) couplée à une approche déterministe sur le réseau hydrographique (QUAL2)	Semi-distribuée par unité de réponse hydrologique (HRU)	Journalière

Entité homogène :  
- Type de sol  
- Usage du sol  
- Classe de pente

## Modèle SWAT







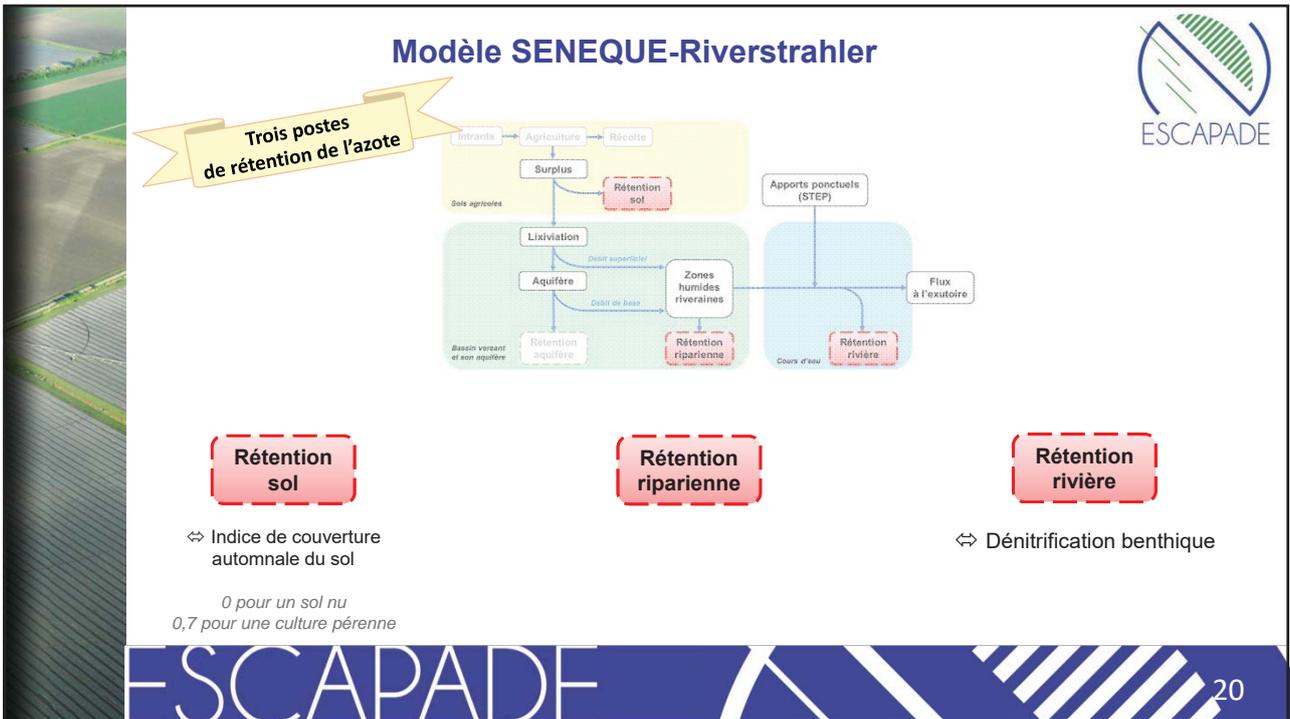
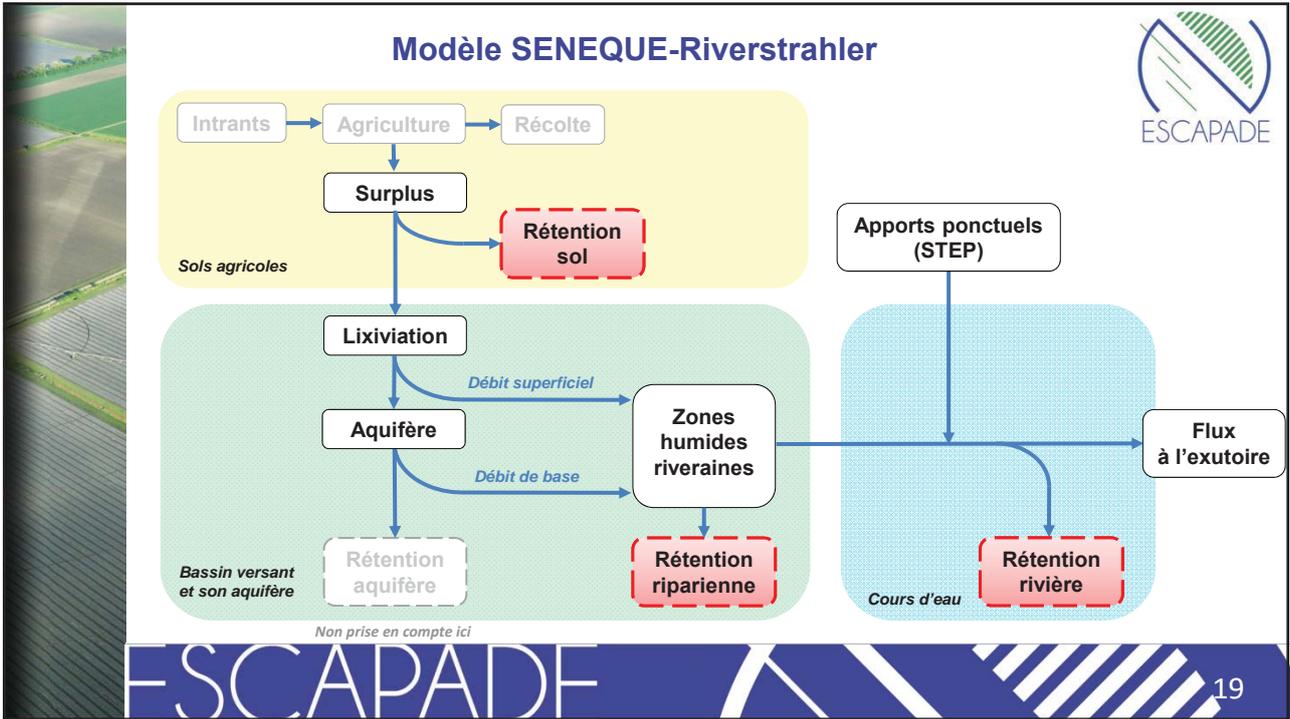
17

### Trois approches de modélisation à confronter



	Principe	Résolution spatiale	Résolution temporelle
<div style="border: 1px solid orange; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <b>Nutting'N</b> (UMR SAS) <i>Dupas et al., 2013, 2015 ; Legeay et al., 2016</i> </div> <div style="border: 1px solid purple; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <b>SWAT</b> (UMR EcoLab) <i>Arnold et al., 1998, 1999 ; Neitsch et al., 2005</i> </div> <div style="border: 1px solid purple; padding: 5px;"> <b>SENEQUE Riverstrahler</b> (UMR METIS) <i>Billen et al., 2000 ; Ruelland et al., 2007</i> </div>	<p>Approche empirique calibrée sur un large échantillon de bassins versants à l'échelle nationale et régionale</p> <p>Approche déterministe sur les systèmes de culture (EPIC) couplée à une approche déterministe sur le réseau hydrographique (QUAL2)</p> <p>Approche bilan sur les systèmes de culture (GRAFS) couplée à une approche déterministe sur le réseau hydrographique et ses zones d'interface</p>	<p>Tout le bassin</p> <p>Semi-distribuée par unité de réponse hydrologique (HRU)</p> <p>Semi-distribuée par sous-bassins versants élémentaires</p>	<p>Moyenne pluri-annuelle</p> <p>Journalière</p> <p>Décadaire</p>


18

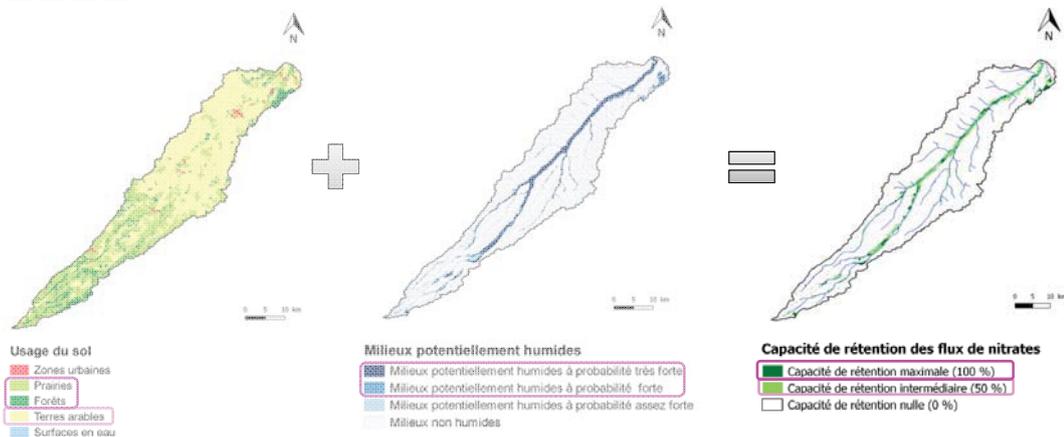


## Modèle SENEQUE-Riverstrahler



Rétention riparienne

→ 1. Typologie de zones humides rétentes d'azote



ESCAPADE

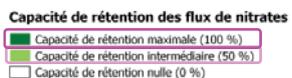
21

## Modèle SENEQUE-Riverstrahler



Rétention riparienne

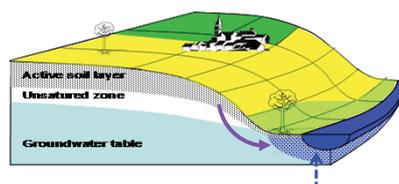
→ 1. Typologie de zones humides rétentes d'azote



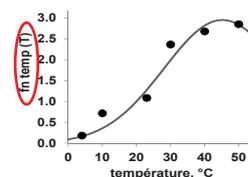
→ 2. Calcul à chaque décade de la différence entre :

\* le flux de nitrates issu du bassin versant (non court-circuité par le drainage)

\* la capacité de dénitrification riparienne = volume zone humide \* potentiel de dénitrification à 20°C \* fonction température (0,08-0,13 mmol/m<sup>3</sup>/h)



Volume de zone humide riparienne active



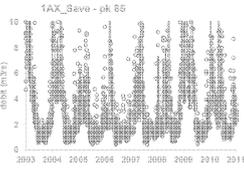
ESCAPADE

22

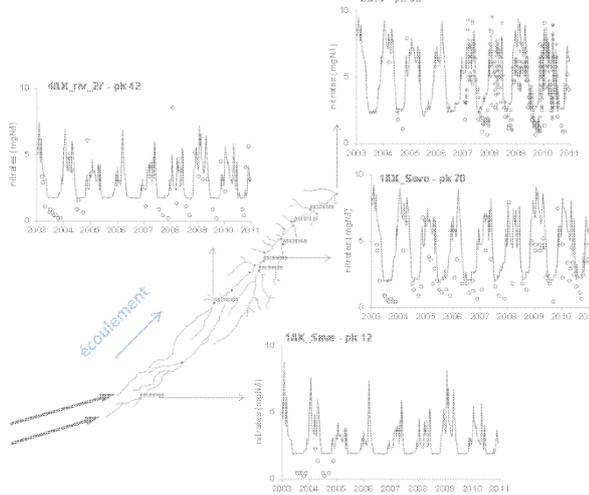
## Résultats SENEQUE-Riverstrahler : Save



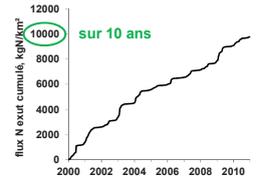
### débites



### nitrates



### chiffres-clés



Référence :  
9,6 kgN/haSAU/an

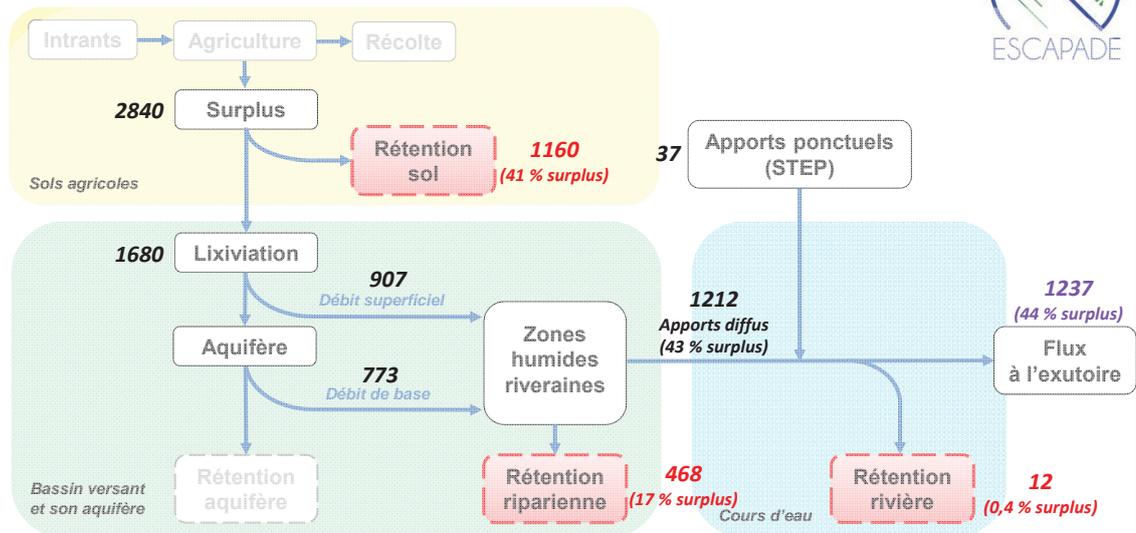
Prise en compte  
d'un débit de 2 m<sup>3</sup>/s à 2 mgN/l  
par le canal de la Neste

ESCAPADE

23

## Résultats SENEQUE-Riverstrahler : Save

TN/an



ESCAPADE

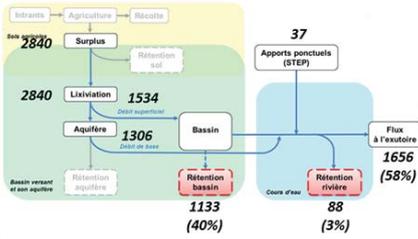
24

## Résultats Save

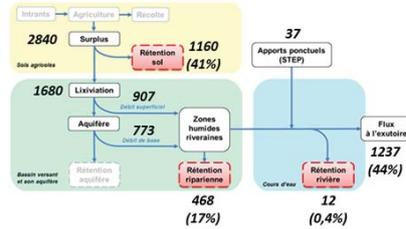
Flux exprimés en TN/an  
(...%) : pourcentage du surplus initial



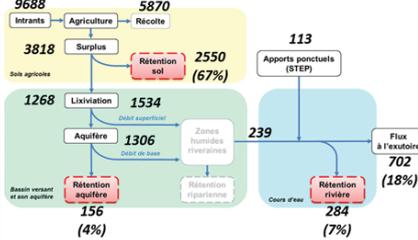
### Nutting'N : calibration nationale



### SENEQUE-Riverstrahler



### SWAT



	Nutting'N	SENEQUE-R.	SWAT
Rétention « bassin » (dont « sol »)	40 %	58 %	71 %
Rétention « rivière »	3 %	0,4 %	7 %
Flux à l'exutoire	58 %	44 %	18 %

Flux d'azote (pourcentage du surplus initial)

ESCAPADE

25

## Conclusion

- Trois modèles opérationnels pour représenter la cascade de l'azote à l'échelle des territoires
- Des postes de rétention de l'azote d'intensité variable :



	Nutting'N (éq° nationale)	SENEQUE-R.	SWAT (Save)
Rétention « bassin » (dont « sol »)	25 - 40 %	52 - 73 %	71 %
Rétention « rivière »	3 - 5 %	0,4 - 2 %	7 %
Flux à l'exutoire	58 - 74 %	> 26 - 49 %	> 18 %

Flux d'azote retenus et exportés à l'exutoire, exprimés en pourcentage du surplus initial  
(valeurs minimale et maximale pour les quatre bassins)

ESCAPADE

26

## Conclusion



### - Intérêts de la modélisation croisée : complémentarité

- Modèles empiriques VS modèles mécanistes
- Postes de rétention différents
- Tendances similaires

### - Limites des modèles :

- Parfois grande sensibilité aux données d'entrée (SWAT : calibration hydrologique)
- Transférabilité des outils (SWAT : difficulté d'implémentation sur les autres bassins)

- Situation de référence : base pour les scénarios d'optimisation paysagère

ESCAPADE

27



## MERCI DE VOTRE ATTENTION

[antsiva.ramarson@upmc.fr](mailto:antsiva.ramarson@upmc.fr)

ESCAPADE

28



## Modélisation de la cascade de l'azote au niveau du paysage

Benhamou C., Durand P., Salmon-Monviola J., Flechard C., Ferrant S., Probst A., Garnier J., Tallec G., Cellier P., Casal L., Anglade J., Franqueville D., Chambon C., Drouet J.L, et al.

**Objectif : un ensemble de modélisations  
pour de simuler les composantes  
essentielles de la cascade de l'azote à  
l'échelle du paysage**



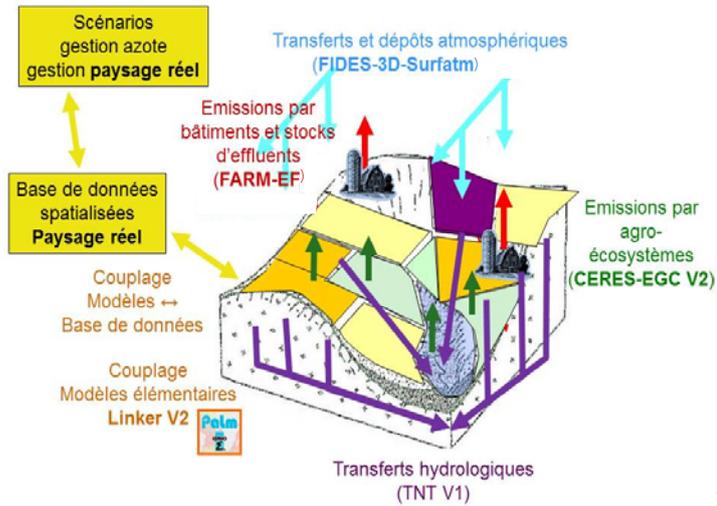
- émissions-transferts-dépôts **atmosphériques**
- transferts **hydrologiques** dissous ( $\text{NO}_3\text{-NH}_4$ ),
- flux d'azote **agricole** volontaires (apports, transferts internes et exportations),
- devenir de l'azote dans les **espaces non agricoles** (dépôts et émissions de gaz azotés, stockage long terme...)

**Pour :**

- > les quantifier dans des **contextes diversifiés.**
- > caractériser **le rôle des interactions spatiales et des structures du paysage**

ESCAPADE

# Nitroscape : principe général



ESCAPADE

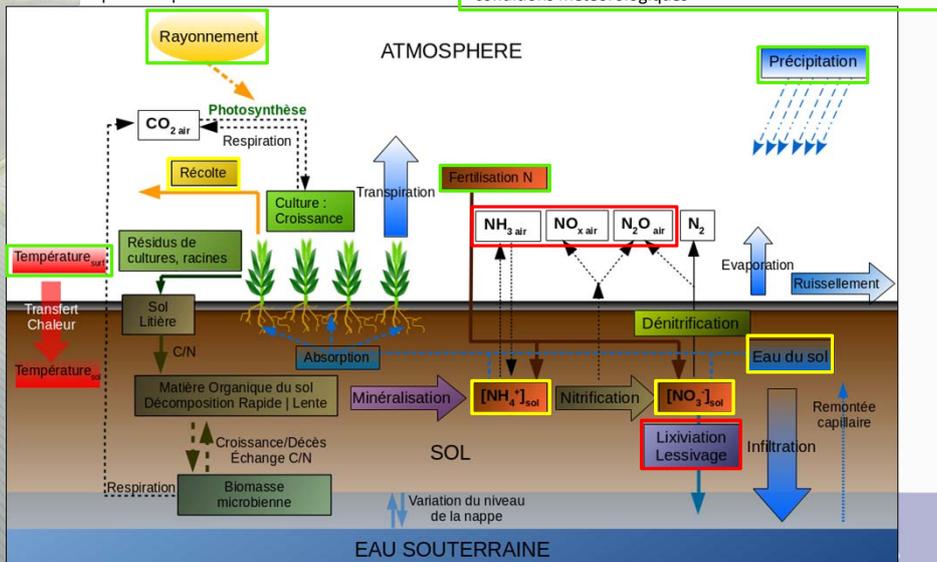
## NitroScape – modèle CERES-EGC



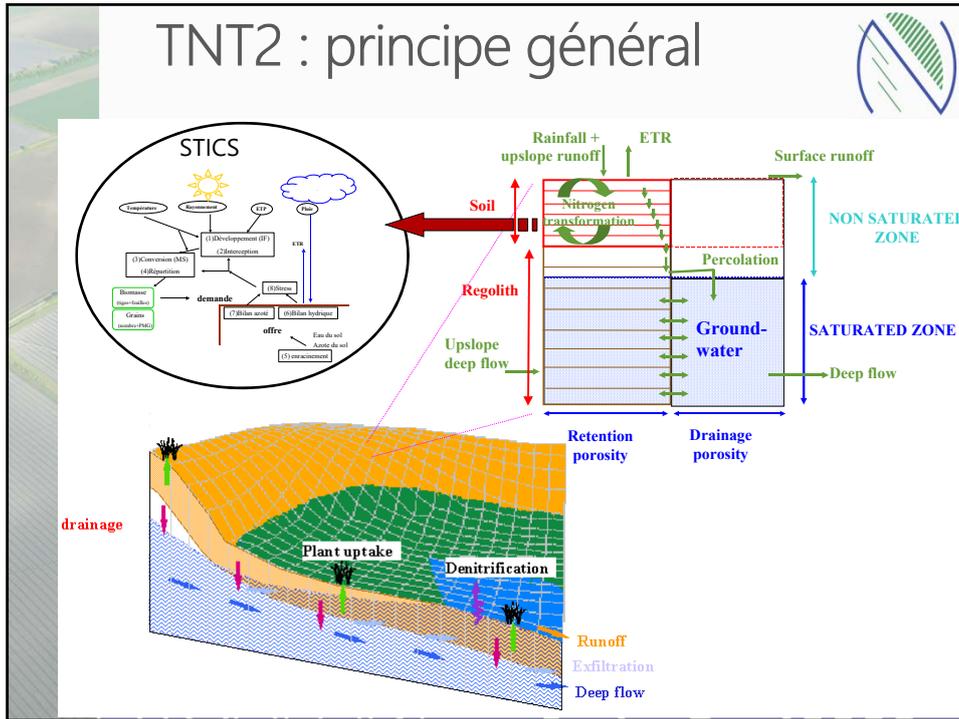
Modèle déterministe de croissance des cultures et d'échange sol-plante-atmosphère  
Pas de temps = 1 jour  
Résolution spatiale = parcelle

### Données d'entrées :

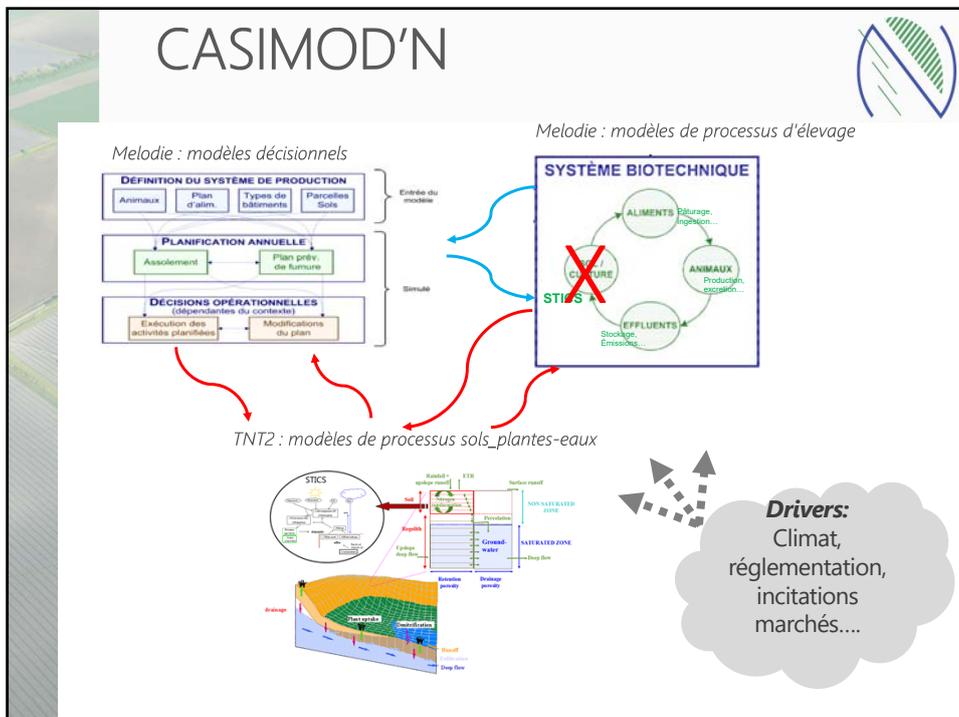
- gestion agricole : occupation du sol, itinéraires techniques
- caractéristiques des sols
- conditions météorologiques



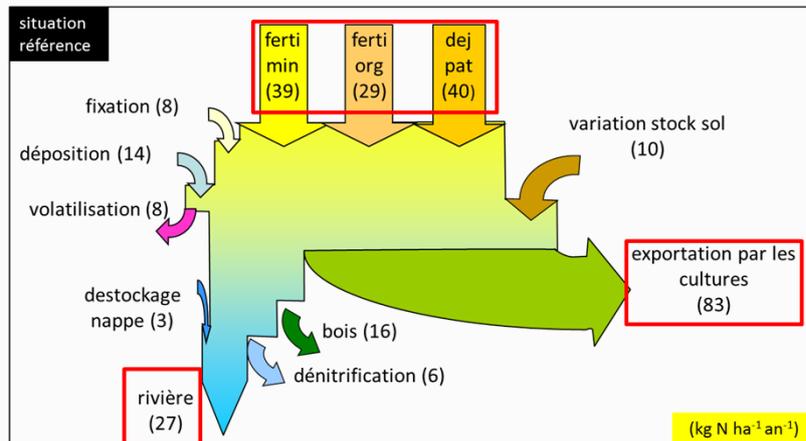
# TNT2 : principe général



# CASIMOD'N



# En Résumé



## développements apportés aux modèles



- Couplage Nitroscape – Fides-Surfatm
- Déconnection optionnelle du modèle hydrologique dans Nitroscape
- Module Prairie Nitroscape
- Mobilité de l'ammonium TNT2 et Nitroscape
- Module haie et bande enherbée TNT2
- Méthode de calibration des paramètres hydrologiques
- Méthode de calcul des bilans (TNT2 et Nitroscape)
- scripts de transferts données agro BDD Nitroscape <-> TNT2
- Module ammonium-N<sub>2</sub>O TNT2 (en test)
- Couplage complet TNT2 – Mélodie dans CASIMOD'N (en test).

# Interêts et limites



- Représentation des processus
  - Intérêts
    - Représentation « mécaniste », avec individualisation des processus et des facteurs de contrôle
      - Contrôles de cohérence
      - Favorise les comparaisons (inter-sites, inter-scenarios...)
      - Autorise les surprises....
    - Représentation spatiale explicite
      - Aspects spatiaux de la cascade N : transferts d'un compartiment de l'espace à l'autre, dilution, « hot spots-hot moments »

ESCAPADE

# Interêts et limites



- Représentation des processus
  - Limites
    - Représentation incomplète, inégale
      - Légumineuses, prairies, TCS, espaces naturels...
    - Déséquilibre et inadéquation paramètres vs observations
      - Calibration peu contrainte
      - Validation impossible « ça a l'air de marcher »
      - Multiples possibilités de compensations : ex. dénit vs minéralisation... « ça marche peut être pour de mauvaises raisons »

ESCAPADE

## Interêts et limites



- applicabilité
  - Intérêts
    - Structure l'acquisition de données et favorise leur valorisation
    - Permet de raisonner sur le comportement du système, les facteurs de contrôle de 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> ordre, avec retours éventuels sur le modèle lui-même (appropriation...)

ESCAPADE

## Interêts et limites

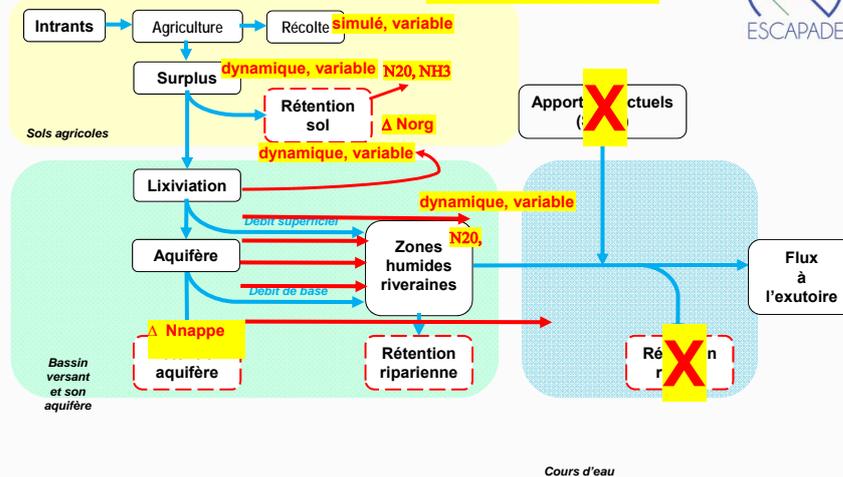


- applicabilité
  - limites
    - Beaucoup d'efforts de développement, acquisition et formatage des données, analyse de résultats...
    - Pour des résultats qui soulèvent plus de questions qu'elles n'en résolvent (incertitude, fiabilité...)
    - FRUSTRANT, surtout pour les opérationnels
    - Outils de recherches, outils d'animation et de co-construction, mais utilisation normative risquée!

ESCAPADE

# Comparaison d'échelles

Schéma conceptuel de la cascade de l'azote dans les modèles  
territoire **et les modèles sites**



ESCAPADE

13

# Comparaison d'échelles

*Impacts potentiel des simplifications aux échelles supérieures*



- Description moins fine de la variabilité des pratiques et de leur spatialisation
  - impact résultant probablement assez faible sur les fuites, notamment nitriques (mélange...)
  - Robustesse et simplification!
- Effets limités des contrôles dynamiques (climat, hydro, topo...) des processus sources-puits
  - Impact limité sur les situations observées stationnaires (compensations), mais incontrôlable si variations importantes et non stationnaires
- Simplification du schéma conceptuel (écoulement superf/profond, rétention sol cste vs rétention riparienne saisonnière...)
  - Impact limité sur les situations observées stationnaires
  - Robustesse, généricité, applicabilité
  - Limite les scénarios testables, limite (interdit?) les résultats contre intuitifs

ESCAPADE

14

# Comparaison d'échelles

## Conclusions



- Garder les modèles pour leur échelle de validité
- La complexité et le « réalisme » des modèles sites n'est pas un gage de fiabilité et de robustesse plus grandes des résultats, notamment sur les situations stationnaires, observées.
- Pour les modèles sites, les résultats de scénarios dépendent de la qualité des formalismes des processus et de leurs interactions : les surprises sont possibles, et renvoient d'abord à des questions de recherches, avant les conclusions opérationnelles
- Pour les modèles territoires, les résultats des scénarios sont directement la conséquences des hypothèses et des références utilisées : les questions soulevées sont plutôt d'ordre opérationnel.



ESCAPADE

Données collectées pour la modélisation  
des scénarios dans les sites et les territoires

Agence Nationale de la Recherche  
ANR



## Déroulé de la session



Approche générale d'acquisition des données sur les paysages  
d'Escapade ([Pierre Cellier, INRA-Ecosys, Grignon](#))

Focus sur les enquêtes de ferme ([Catherine Pasquier, INRA-UR SOLS, Orléans](#))

La cascade de l'azote : que va-t-on faire d'autre avec les mesures?  
([Josette Garnier, CNRS-Metis, Paris](#))

Avec de multiples contributions des acteurs de la tâche 4

ESCAPADE





ESCAPADE

Approche générale d'acquisition des données sur les paysages d'Escapade

Pierre Cellier  
INRA-Ecosys, Grignon

Agence Nationale de la Recherche  
ANR



Paysage et azote : rendre compte de la complexité d'un système multi-milieu, multi-composés, multi-acteurs ... en support à la modélisation

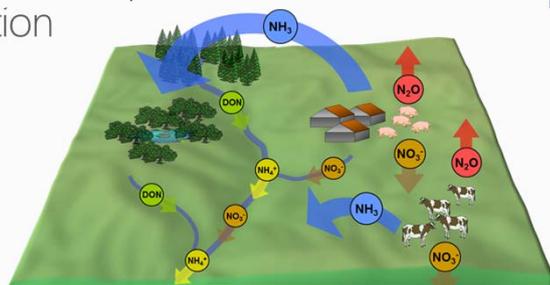


→ Une diversité de composés avec des enjeux environnementaux et des échelles spatiales différents

→ Forte variabilité spatiale et temporelle

→ Des niveaux d'organisation différents

- ✓ Bassin versant pour l'hydrologie ; flux « canalisés »
- ✓ Exploitation pour l'organisation des activités agricoles : flux « anthropiques »
- ✓ Zone ouverte pour les transferts atmosphériques = f(direction et intensité du vent)



(d'après Mark Theobald)

ESCAPADE

## Un « data paper Escapade », pourquoi ?



→ Informer la communauté scientifique de l'existence et la disponibilité du jeu de données

→ Valoriser les données, avec un objectif d'ouverture :

- ✓ en leur apportant une bonne visibilité
- ✓ en facilitant leur réutilisation par une rédaction soignée des métadonnées
- ✓ en explicitant leur potentiel de réutilisation

→ Obtenir une reconnaissance du travail réalisé (crédit aux auteurs), grâce à sa citabilité

*(d'après le site INRA datapartage  
<http://www6.inra.fr/datapartage/>)*

ESCAPADE

## Un « data paper Escapade », comment ?



- Le data paper est une publication qui **décrit un jeu de données scientifiques brutes**, notamment à l'aide d'informations précises, appelées métadonnées
- Les données décrites doivent être **accessibles**, soit sous forme de fichiers annexés, soit plus généralement par un lien pérenne (URL, DOI) vers « l'entrepôt de données » en ligne
- Le data paper est publié sous la forme d'un **article examiné par les pairs** dans une revue scientifique classique ou dans un data journal
- Le data paper informe la communauté scientifique de la **disponibilité de ces jeux de données et de leur potentiel pour des utilisations futures**.
- Contrairement à un article de recherche classique, le **data paper décrit uniquement des données scientifiques** et les circonstances et méthodes de leur collecte
- Néanmoins, il présente les analyses techniques et statistiques validant la **qualité des données**.
- Le data paper montre **l'originalité et la portée du jeu de données** qu'il décrit. Il s'agit là de l'argument majeur pour convaincre le rédacteur en chef d'accepter le data paper.

*(d'après le site du CIRAD : <https://coop-ist.cirad.fr/aide-a-la-publication/rediger/data-paper/1-qu-est-ce-qu-un-data-paper>)*

ESCAPADE

## Un « data paper Escapade », comment ?



- A la différence d'un article scientifique classique qui exploite, analyse et interprète les données scientifiques, un **Data Paper décrit finement un/des jeu(x) de données** de façon à en faciliter la compréhension, et l'éventuelle réutilisation.
- Le(s) jeux de données est(sont) **déposé(s) dans un (ou plusieurs) entrepôt(s)** et associé(s) à un identifiant (souvent le DOI).
- Le Data Paper décrit les données
  - ✓ il comprend les **éléments descriptifs associés (métadonnées)**, et toutes les informations techniques (méthodes, formules, applications logicielles...) utiles à la compréhension de l'obtention des données et à leur réutilisation par d'autres scientifiques
  - ✓ il est publié soit dans un **journal classique**, soit dans un journal spécifique appelé "**Data Journal**"
  - ✓ il est **associé à un identifiant** et relié aux données par des hyperliens pérennes, éventuellement issus d'entrepôts différents
  - ✓ il fait l'objet d'un **examen par des pairs** du domaine disciplinaire (pas toujours)
  - ✓ il doit **pouvoir être corrigé** (avec un gain de qualité au fur et à mesure des utilisations, annotations, corrections...). Les corrections doivent alors être explicitées et l'article versionné.

(d'après le site INRA datapartage)

ESCAPADE

## Structure du « data paper »



Différentes proposition des revues.

Celle de de Nature publishing group =

- *Contexte et objectifs*
- *Méthodes*
- *Données enregistrées*
- *Métadonnées*
- *Validation technique*
- *Notes explicatives*

ESCAPADE

# Contexte et objectifs



- Le projet Escapade vis à rechercher des voies innovantes à l'échelle du territoire, complémentaires des approches classiques aux échelles de la parcelle et de l'exploitation agricole, pour optimiser l'usage de l'azote et en réduire les pertes dans l'environnement, et ainsi préserver durablement les agroécosystèmes tout en maintenant la productivité des systèmes de production.
- Les modèles développés à l'échelle de quatre sites (quelques km<sup>2</sup>) et de quatre territoires (quelques centaines à milliers de km<sup>2</sup>) ont besoin de données d'entrée et de données de validation aux échelles pertinentes.
- Contexte spatial = « paysage » de quelques km<sup>2</sup>, bassin versant
- Contexte temporel = plusieurs années ; variable selon le type de données

ESCAPADE

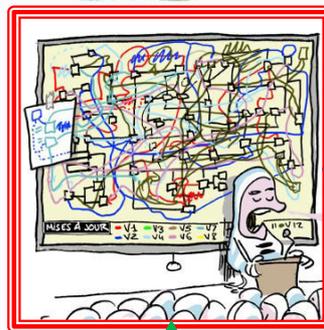
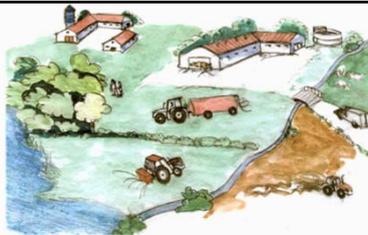
# Méthodes



## Données d'entrée décrivant le paysage et les activités anthropiques

(essentiellement agricoles):

- Occupation du sol
- Parcellaire
- Bâtiments, routes, ...
- Pratiques agricoles: élevage, cultures
- Données météo
- ...



## Données d'évaluation décrivant les champs de flux et concentrations calculés par les modèles

- Concentration NH<sub>3</sub>
- Émissions de N<sub>2</sub>O
- Production végétale
- ...

ESCAPADE

# Les données enregistrées



**1. Données d'inventaire** : données d'occupation des sols, incluant le parcellaire, cartes topographiques, cartes de sols, permettant d'avoir une couverture spatiale aussi exhaustive que possible.

**2. Données sur les pratiques agricoles** au niveau des parcelles (cultures et prairies), des bâtiments et de la gestion des troupeaux : cultures, fertilisation, travail du sol, récolte, pâturage, ... Ces données seront collectées à partir d'enquêtes sur l'ensemble des exploitations ayant des parcelles ou des bâtiments sur le territoire concerné.

**3. Données d'évaluation du modèle intégré et des modèles élémentaires** : il s'agit ici de mesurer des flux et/ou des concentrations en des points-clefs des paysages pour permettre une évaluation aussi pertinente que possible des modèles. Concernant l'échelle de temps, elle dépend à la fois de la nature de la mesure et des possibilités analytiques.

→ Protocoles = Livrable 4.2

ESCAPADE

# Quelles stratégies de collecte?



## Données d'entrée et paramètres des modèles.

Ces données, nécessaires au fonctionnement des modèles, doivent être collectées de manière aussi **exhaustive** que possible

- OK pour **Topographie et parcellaire**
- Presque OK pour **cartes des sols, réseau hydrographique / drainage, carte des cultures**
- Plus compliqué pour les **données d'exploitation et de pratiques agricoles**
- Impossible pour les **données météorologiques** : en général un ou deux points sur chaque paysage extrapolé à l'ensemble.

## Données de vérification des modèles

Exhaustivité impossible. **Stratégie différente selon les types de données**

- Écosystèmes : collecte des données (suivi culture, eau et azote du sol, émission N<sub>2</sub>O ...) sur les grandes catégories de cultures du site
- Atmosphère (NH<sub>3</sub>) : différentes stratégies possibles selon les types de sources et des choix locaux
- Hydrologie (cours d'eau et nappe) : exutoire(s), transects piézo

→ *Quelques points à qq dizaines de point par an, selon les variables*

→ Livrable 4.1

ESCAPADE

# Les protocoles



- T4
  - Protocoles Observations
  - Enquete\_Ferme
  - Comptes-Rendus
  - Presentations T4
  - MesuresEvaluation
  - Sites
  - Rapports Livrables
    - ESCAPADE\_Protocoles
    - Rapport\_final
- T5
- T6
- Seminaire\_22-23\_mai\_2017
- A valider
- Corbeille

- 5 Publications
- ESCAPADE\_L4.1.3h\_protocole\_Sol-NO3-NH4  
Pierre Cellier - 19/01/2015 -
  - ESCAPADE\_Carto\_NH3-N2O\_sites\_L4.2.2  
Pierre Cellier - 23/06/2014 -
  - ESCAPADE\_Carto\_NH3-N2O\_sites\_L4.2.2  
Pierre Cellier - 23/06/2014 -
  - ESCAPADE\_strategie\_expérimentale\_paysage\_L4  
Pierre Cellier - 23/06/2014 -
  - ESCAPADE\_strategie\_expérimentale\_paysage\_L4  
Pierre Cellier - 23/06/2014 -

- 8 Publications
- ESCAPADE\_L4.3.1.g\_Calcul\_fluxN2O\_chambre  
Pierre Cellier - 18/01/2015 -
  - ESCAPADE\_L4.3.1.f\_Protocole\_Chambre\_UMT-GES-N2O\_annexe  
Pierre Cellier - 18/01/2015 -
  - ESCAPADE\_L4.3.1.f\_Protocole\_Chambre\_UMT-GES-N2O  
Pierre Cellier - 18/01/2015 -
  - ESCAPADE\_L4.1.3e\_protocole\_Chambre\_N2O  
Pierre Cellier - 18/01/2015 -
  - ESCAPADE\_L4.1.3d\_protocole\_badges\_NH3  
Pierre Cellier - 18/01/2015 -
  - ESCAPADE\_L4.1.3e\_ICOS\_CroplandProtocol-draft  
Pierre Cellier - 18/01/2015 -
  - ESCAPADE\_L4.1.3b\_ICOS\_SoilMeteo-Protocol  
Pierre Cellier - 18/01/2015 -
  - ESCAPADE\_L4.3.1\_protocoles\_vérification\_paysage  
Pierre Cellier - 18/01/2015 -



# Métadonnées



Mesures atmosphériques								
44	NH <sub>3</sub> concentration (capteur)	µg-N m <sup>-3</sup>	x_NH <sub>3</sub> _passive	Mensuel	O	200	Badges Alpha	Ammonia flow injection analysis
45	NH <sub>3</sub> concentration (boite)	µg-N m <sup>-3</sup>	x_NH <sub>3</sub> _Delta	Mensuel	O	150	Boites Delta	
47	NO <sub>y</sub> concentration (boite)	µg-N m <sup>-3</sup>	x_Noy_Delta	Mensuel	O	150	Boites Delta	
48	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> particules concentration	µg-N m <sup>-3</sup>	x_NH4part_Delta	Mensuel	O	150	Boites Delta	
49	NO <sub>x</sub> particules concentration	µg-N m <sup>-3</sup>	x_Nopart_Delta	Mensuel	O		Boites Delta	
50	CO <sub>2</sub> concentration (continu)	µmol-CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup>	x_CO2_cont	horaire	N			
51	CO <sub>2</sub> flux (continu)	µmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	F_CO2_cont	horaire	N			
52	N <sub>2</sub> O flux	µg-N m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	F_N2O	Mensuel	O	0	Chambres statiques	Chromato Gaz + ECD
53	CH <sub>4</sub> flux	µg-C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	F_CH4	Mensuel	O	0	Chambres statiques	Chromato Gaz + FID
54	CO <sub>2</sub> flux	µg-C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	F_CO2	Mensuel	O	0	Chambres statiques	Chromato Gaz + FID
Mesures dans la nappe (prélèvement dans les piézomètres)								
56	Profondeur de nappe	m	GWD	15 min	O	10 piézomètres		
57	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> concentration	mg N l <sup>-1</sup>	GW_NO3	Trimestriel	O	10 piézomètres		
58	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> concentration	mg N l <sup>-1</sup>	GW_NH4	Trimestriel	P	10 piézomètres		
59	Concentration N total	mg N l <sup>-1</sup>	GW_TotN	Trimestriel	P	10 piézomètres		
Mesures dans le cours d'eau (exutoire au moins)								
61	Débit total (periodique)	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	StreamDisPer			--		
62	Débit total (continu)	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	StreamDisCont	minute	O	1 point de mesure		
63	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> concentration	mg N l <sup>-1</sup>	Stream_NO3	journalier	O	1 point de mesure		
64	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> concentration	mg N l <sup>-1</sup>	Stream_NH4	certaines crues	O	1 point de mesure		
65	Concentration N total	mg N l <sup>-1</sup>	Stream_TotN	certaines crues	O	1 point de mesure		
66	DOC	mg C l <sup>-1</sup>	Stream_DOC	journalier	O	1 point de mesure		

## Structure du « data paper »



Différentes proposition des revues.

Celle de de Nature publishing group =

- Contexte et objectifs
- Méthodes
- Données enregistrées
- Métadonnées
- Validation technique → littérature et référence autres projets
- Notes explicatives



ESCAPADE

## Perspectives

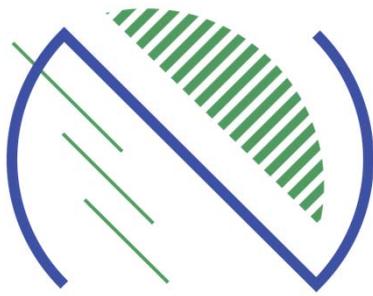


- L'ensemble des éléments semble réuni : contexte, méthodes, protocoles, métadonnées, validation technique des méthodes...
- Encore du travail pour finaliser les jeux de données : travail sur la base de données et interactions avec la modélisation
- Choix d'une revue
- Choix d'un entrepôt
- ...

→ Rédaction d'un « data paper » à initier à la rentrée 2017 ?

ESCAPADE

Le 23 juin 2017



ESCAPADE

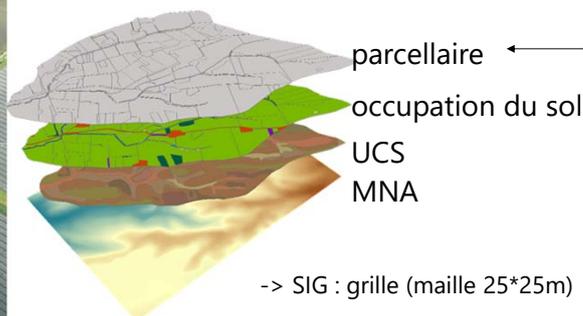


Collecte des Données  
Enquêtes « Fermes »

Catherine Pasquier, UR SOLS, Orléans, site OS<sup>2</sup>

## Collecte des données

### Structure des paysages et des exploitations agricoles



Données spatiales  
existantes sur chacun des sites

### Variables agronomiques



-> saisie dans la BDD Fermes

Données temporelles (saison culturale)  
nécessitant un travail d'enquêtes

ESCAPADE

# La BDD Fermes

Description des variables agronomiques :

- **ITK** pour chaque type d'occupation du sol
- **conduite d'élevage** en bâtiment et au champ pour chaque type d'animal.



**General Farm Data**  
Coordonnées  
Importation/exportation

**General Field Data (ITK)**  
Id Parcelle / Drainage  
Culture (type, date semis/récolte, rendement)  
Travail du sol, (type et date), Pailles  
Fertilisations (type, date et quantité)  
Amendement (type, date et quantité)  
Fauche, pâturage (dates), animaux (type, nb).  
Irrigation (date et quantité)

**Manure Stores**  
Stockage des effluents (type, durée, surface quantité)

**Livestock Building**  
Bâtiments (surface, mode de ventilation...)  
Animaux (type, nb, période)  
Production d'effluents

# Le travail d'enquêtes

## 1ère étape

- Création des formulaires d'enquêtes
- Rencontre avec les agriculteurs



## 2ème étape

- Saisie des données via le formulaire ACCESS
- Modifications dans la base (ajout de culture)



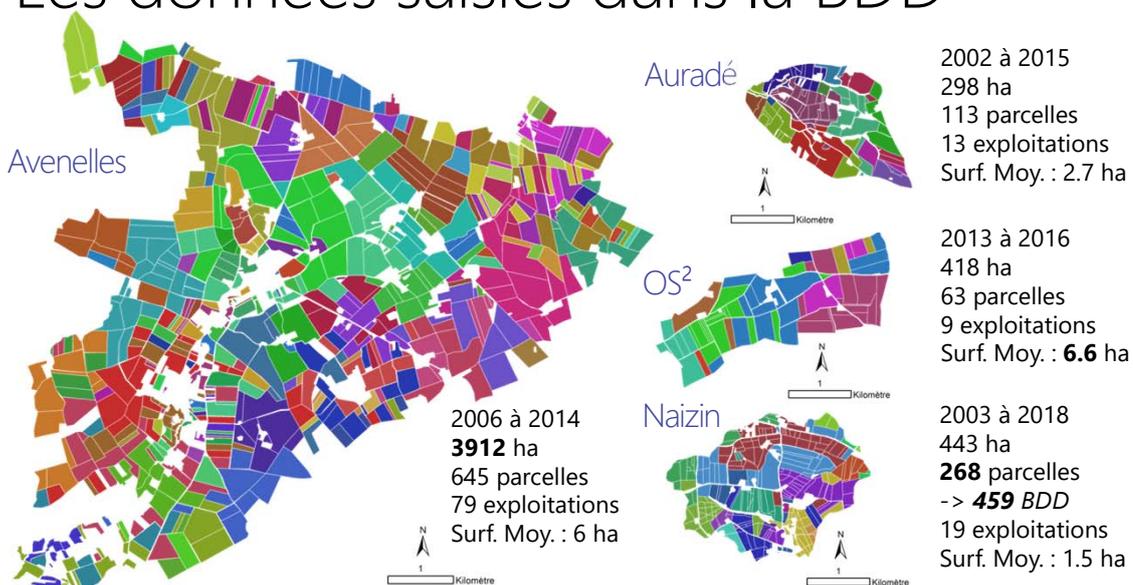
## 3ème étape

- Reconstitution des données manquantes (historique)
  - RPG
  - Télédétection(cultures)
- Reconstitution des pratiques types à partir d'enquêtes (ITK)



ESCAPADE

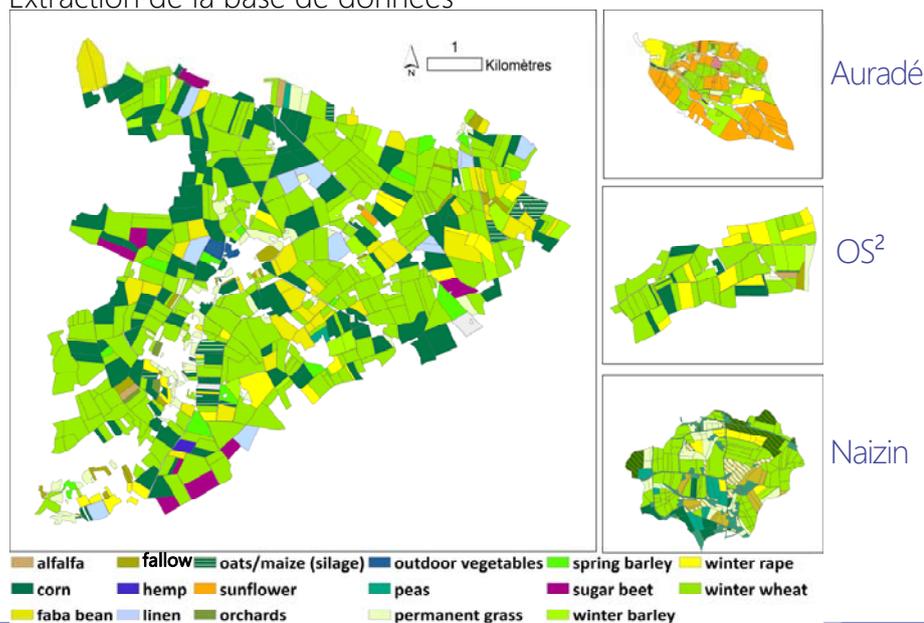
# Les données saisies dans la BDD



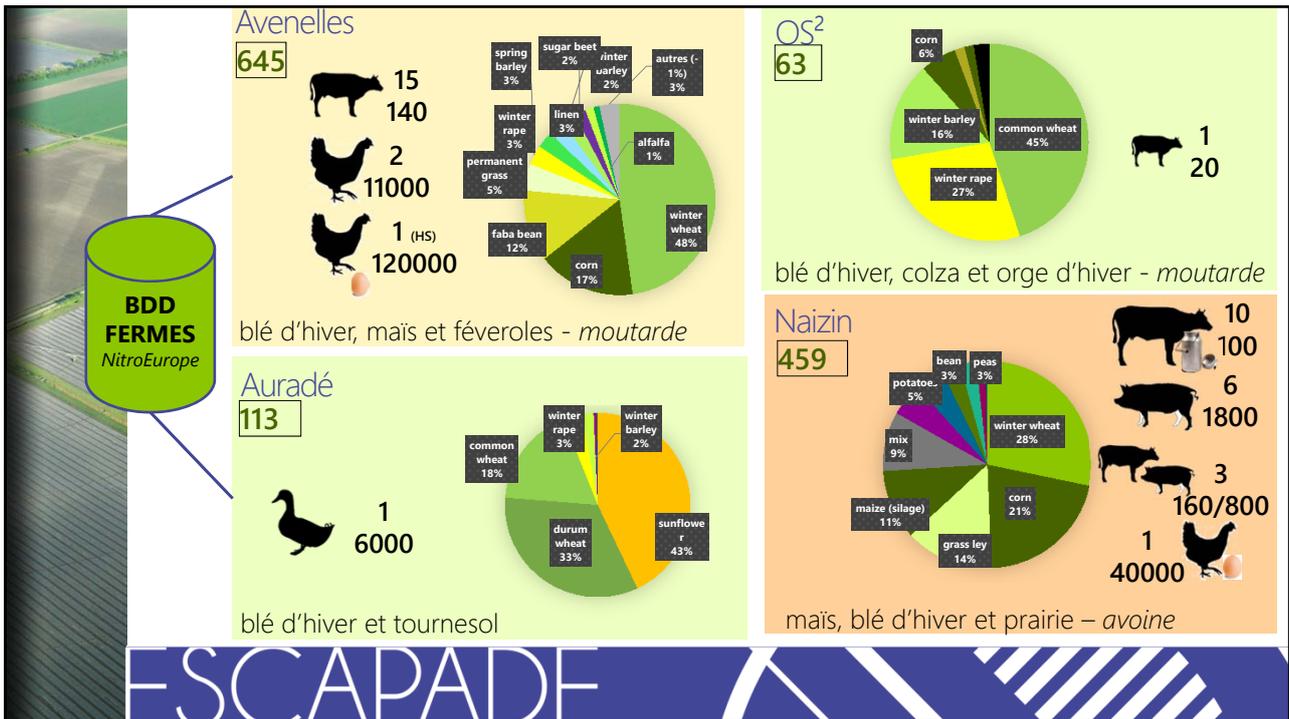
ESCAPADE

2014

Extraction de la base de données



ESCAPADE

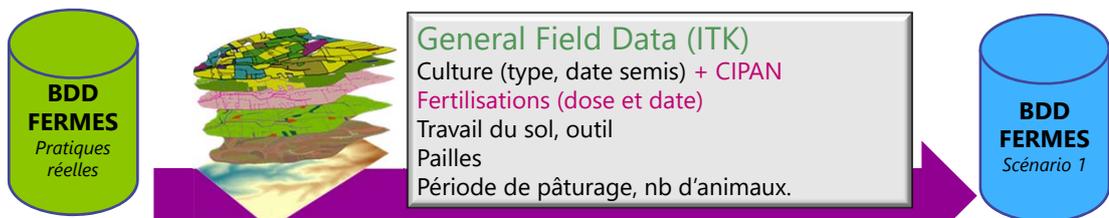


## Construction d'un scénario

Exemple : Scénario 1 « optimisation » sur OS²

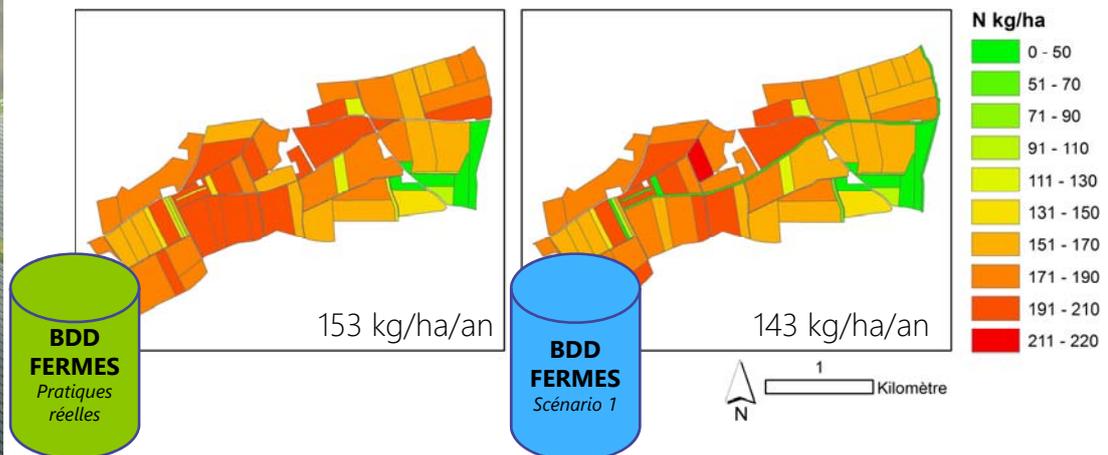
Modifications de la base de données initiale :

- **Modification du parcellaire** : création de bandes enherbées
- Même culture
- **Modification des dates d'apports et des quantités N (Azolis®)**
- **Introduction systématique des CIPAN et repousses de colza**



# Construction d'un scénario

Exemple : Scénario 1 « *optimisation* » sur OS<sup>2</sup>, 3 ans



# Conclusion – Retour d'expérience

OS<sup>2</sup>, 10 ans d'enquêtes, 20 à 30 agriculteurs

- pas d'envoi courrier -> rencontre avec plan
- enquêtes en période hivernale
- entretenir les relations
- 1h par exploitation (sans élevage)
- données pâturage ☹







23 juin 2017 : Restitution du projet



**UMR Metis** : Josette Garnier, Juliette Anglade, Abel Azougui, Julie Berthou , Benjamin Mercier, Antsiva Ramarson, Gilles Billen et coll.

**HBAN Irstea** : Gaëlle Tallec, Patrick Ansart, Arnaud Blanchouin, Nadine Derlet , Julien Tournebize et coll.

**ASTER INRA**: Céline Schott, Catherine Mignolet et coll.

**UR SOL INRA**: Catherine Hénault, Catherine Pasquier et coll.

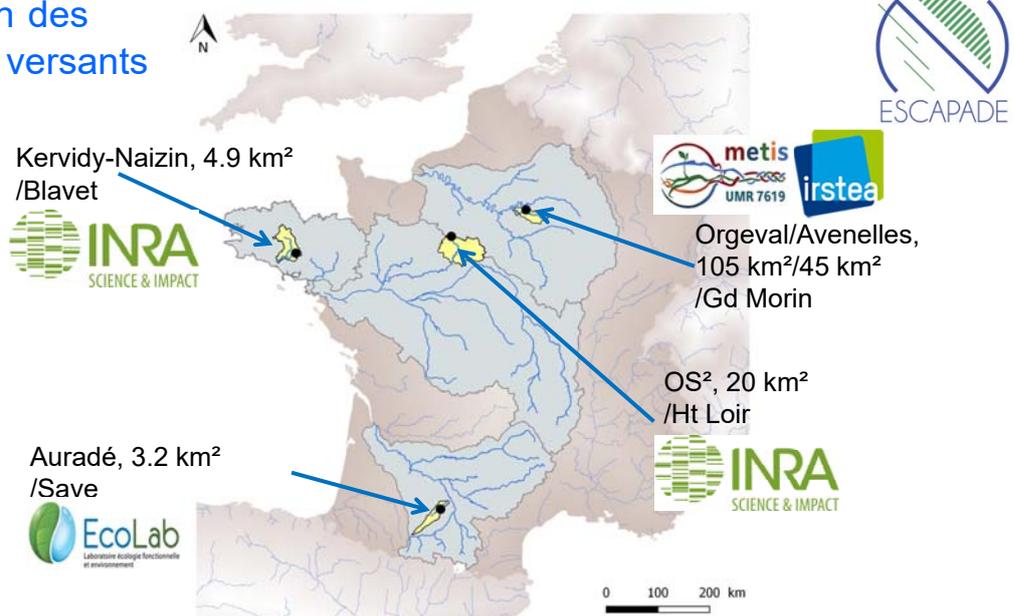
**SAS INRA**: Chris Flécharde, Françoise Vertes, Chantal Gascuel, Patrick Durand et coll.

**UMR ECOLAB**: Anne Probst, Vivien Ponnou-Delaffon, Emmanuelle Guigues, Sylvain Ferrand, Virginie Payre, Jean-Luc Probst et coll.

**ECOSYS INRA** : Céline Decuq, Vanessa Lecuyer, Sylvie Masson, Jean-Christophe Geudet, Pierre Cellier, Jean-louis Drouet et coll.

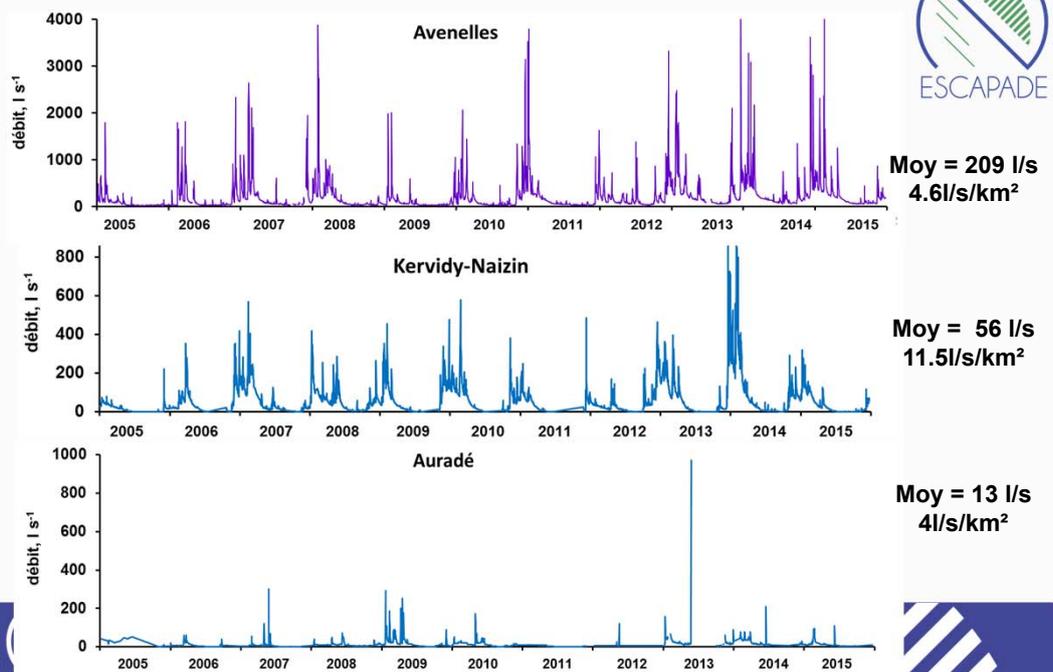
**La Cascade de l'azote: que va-t-on faire d'autre avec les mesures ?**

## Situation des bassins versants

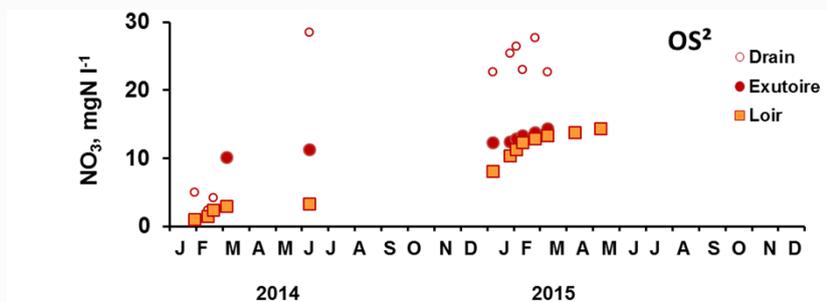


ESCAPADE

## Evolution des débits



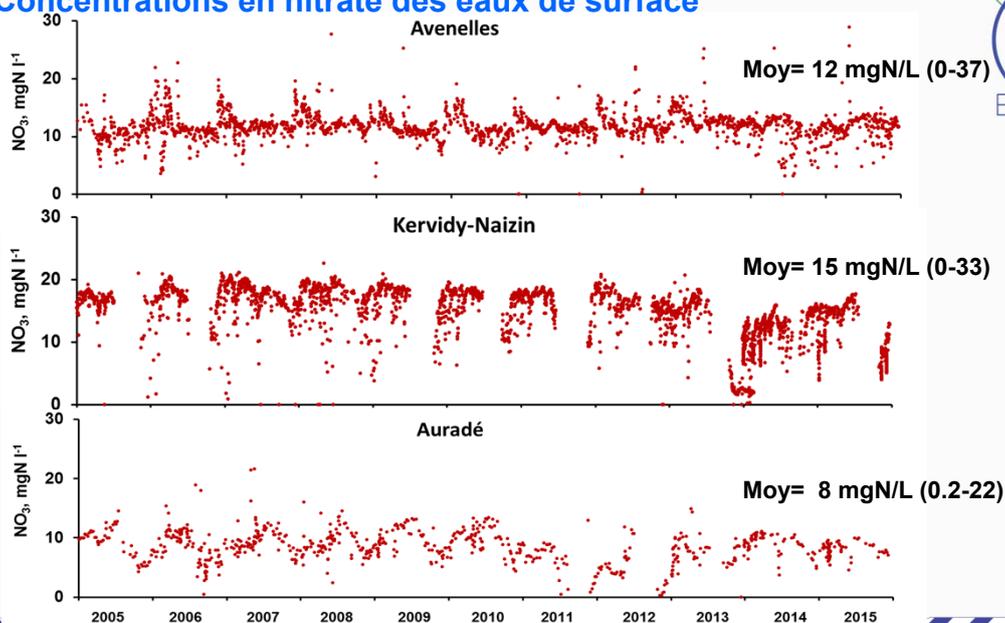
## Concentrations en nitrate des eaux de surface



En moyenne selon les années :  
 drain (9-25 mgN/L) > OS<sup>2</sup> (3-13 mgN/L) > Loir (2-12 mgN/L)

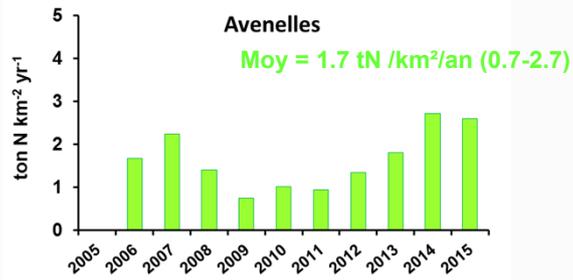
ESCAPADE

## Concentrations en nitrate des eaux de surface

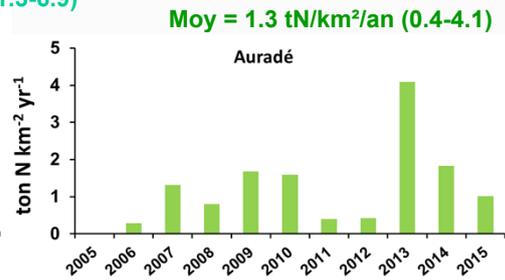
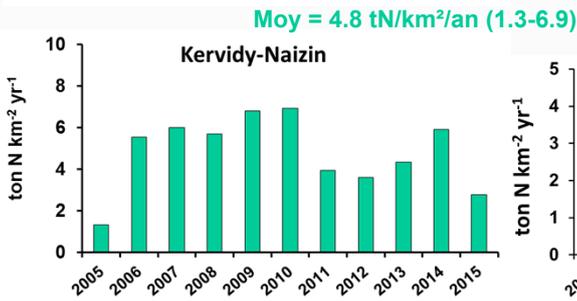


ESCAPADE

## Flux annuels de nitrates



$$\text{FlxN} = Q_m * (\sum C_i \cdot Q_i) / \sum Q_i$$



ESCAPADE

## Concentrations en nitrate des eaux souterraines

2014-2015



	Piézomètres mgN-NO <sub>3</sub> /l	Lysimètres mgN-NO <sub>3</sub> /l	Drain mgN-NO <sub>3</sub> /l	Rivière mgN-NO <sub>3</sub> /l	Abattement %
Avenelles	11.7	14.8	11.7	11.5	<b>22</b>
Kervidy-Naizin	17.9	-	-	12.8	<b>29</b>
Auradé	-	16.6	-	8.5	<b>49</b>
OS <sup>2</sup>	-	15.2	17.2	12.4	<b>18*</b>

\* 60 % pour le Loir

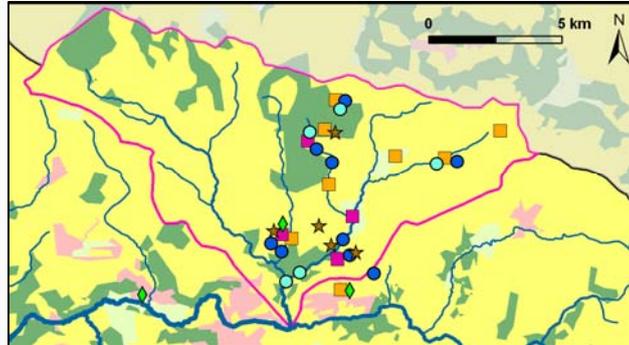


ESCAPADE

## Le sous-bassin de l'Orgeval: instrumentation



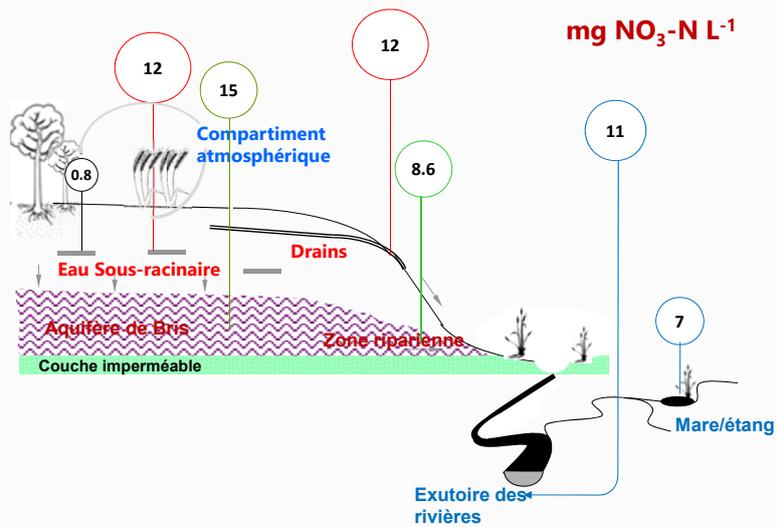
- 104 km<sup>2</sup>
- 4.1 10<sup>3</sup> hab.
- ~40 hab. km<sup>-2</sup>



Site d'instrumentation		Usage du sol	
○	Eaux de surface	□	Bassin de l'Orgeval
●	Eaux souterraines	□	Bassin du Grand-Morin
■	N <sub>2</sub> O (Chambres d'accumulation)	■	Prairies
■	NH <sub>3</sub> (Badges Alpha)	■	Terres arables
◇	Météo	■	Zones naturelles
★	Propriétés du sol	■	Zones urbaines

ESCAPADE

## La cascade du nitrate dans le système hydrique des Avenelles



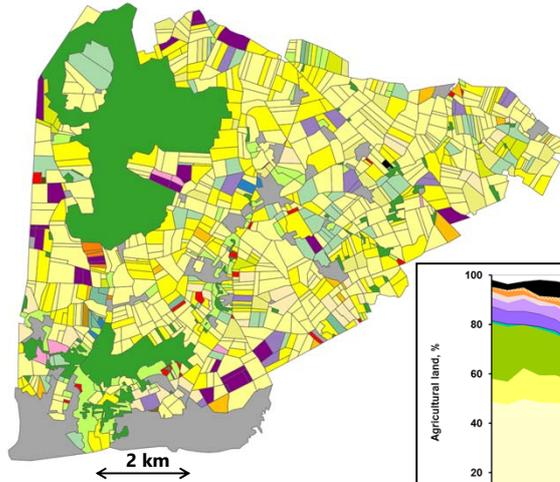
ESCAPADE

## L'azote dans le bassin agricole

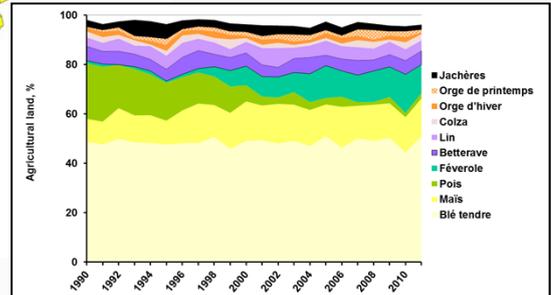


### Assolement 2014

- blé
- orge
- escourgeon
- avoine
- maïs
- colza
- betterave
- féveroles
- pois
- pommes de terre
- carotte
- chanvre
- lin
- prairie
- luzerne
- maraîchage
- verger
- jachère
- sol nu
- bois
- urbanisation
- forage de schiste



Sources : HBAN - IRSTEA / FR3020 FIRE

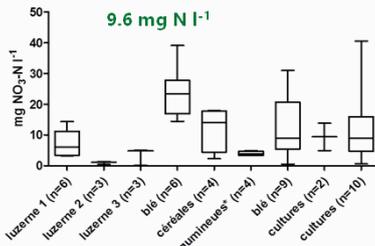


ESCAPADE

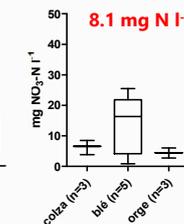
## Concentrations sous-racinaire en nitrate à l'échelle de rotations types



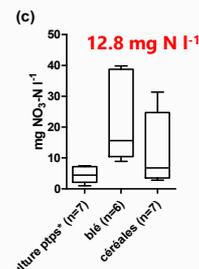
### (a) AB



### (b) AC

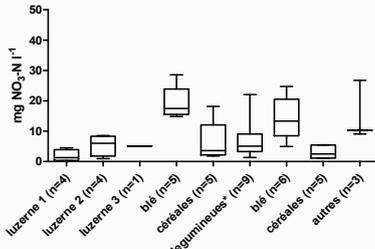


### 2013-2014

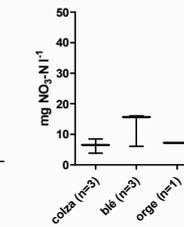


### 2014-2015

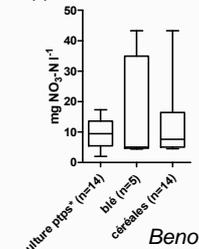
### (a)



### (b)



### (c)

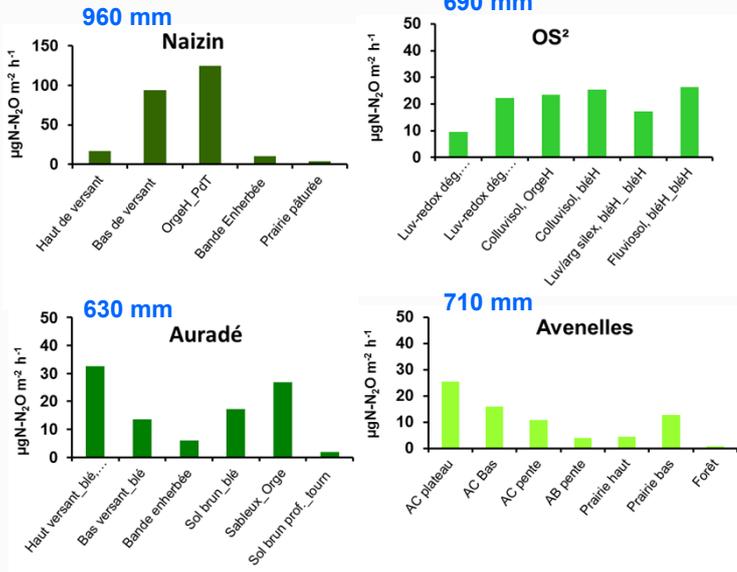


- Concentrations dépendantes des successions de cultures
- Intégration sur les rotations

Benoit et al., 2014, Nut Cycl Agrosystem

ESCAPADE

## Emissions de N<sub>2</sub>O

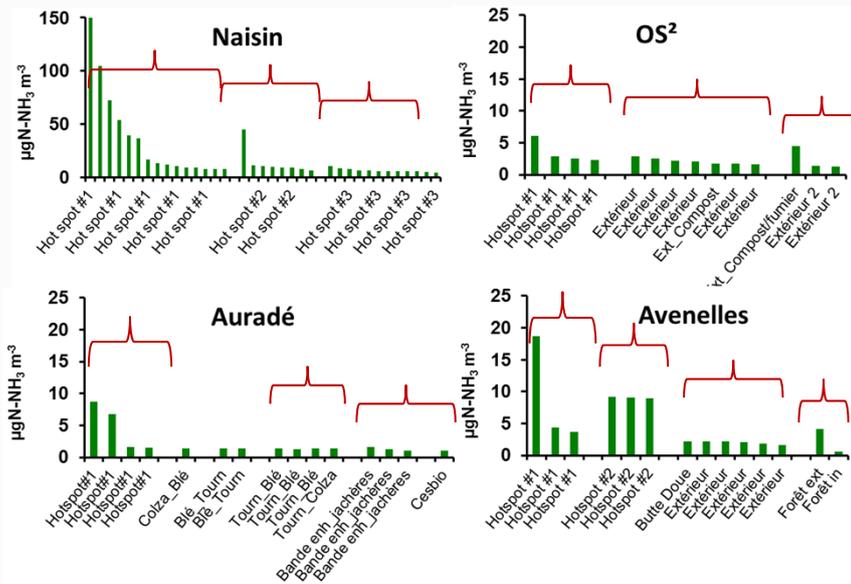


- ❑ 2.5 à 5 fois plus d'émission sur le Naizin
- ❑ 75-95 kg N-N<sub>2</sub>O/km<sup>2</sup>/an pour l'Orgeval
- ❑ Deux années différentes: 2014, plus sèche, 2015 plus humide



ESCAPADE

## Teneur en NH<sub>3</sub> par hotspot



ESCAPADE

## Rôle des zones humides construites



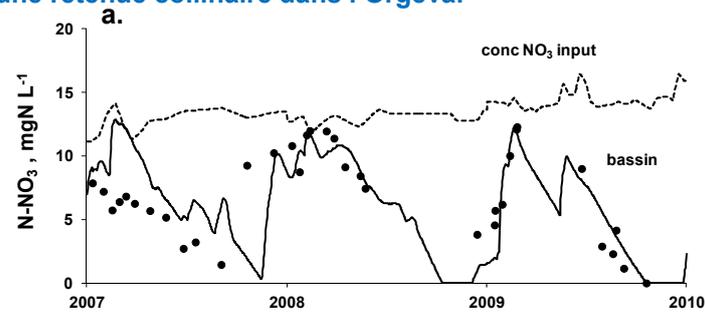
- Des **zones humides construites** peuvent apporter le même service d'atténuation de la contamination nitrique des eaux agricoles



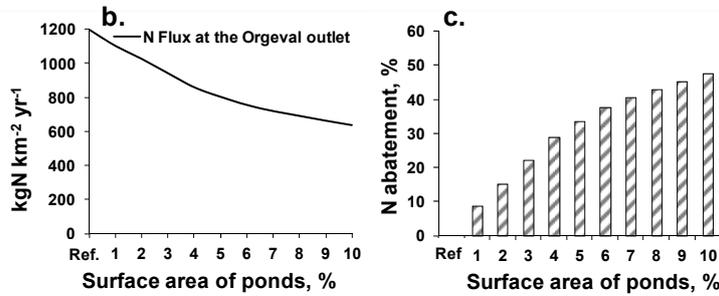
Aulnoy (77), bassin tampon alimenté par un collecteur de drain agricole.



## Exemple d'une retenue collinaire dans l'Orgeval



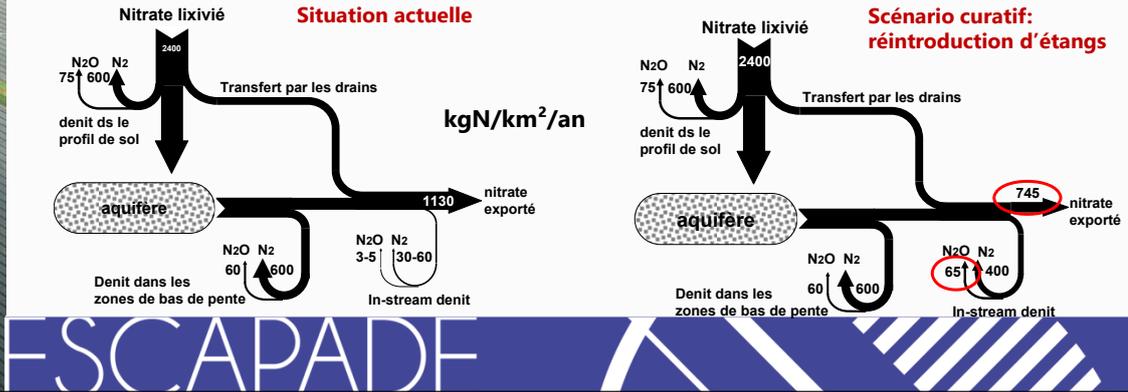
Garnier et al., 2014, JEMA



## Bilan de la cascade de l'azote dans le bassin de l'Orgeval



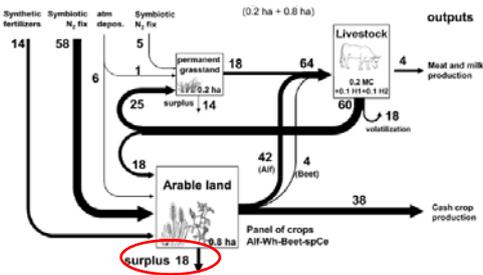
Garnier et al., 2014, JEMA  
Benoit et al., 2015, AEE



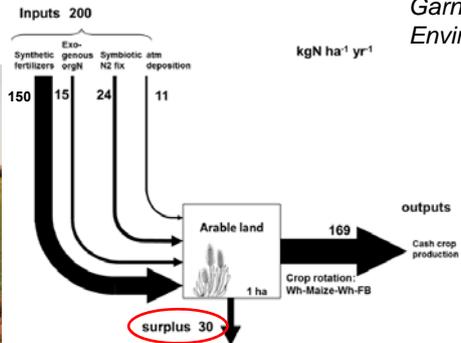
## Scénarios de restructuration (Orgeval/Avenelles)

- Le passé et le présent

En 1955: polyculture-élevage en Brie laitière



Aujourd'hui: après drainage, céréaliculture chimique



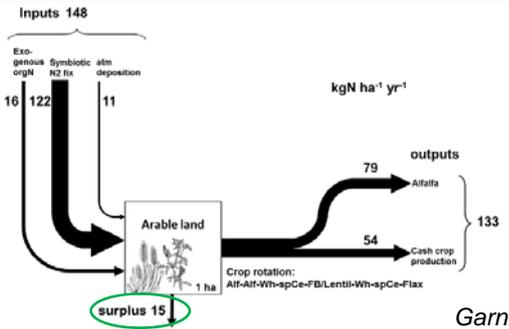
Garnier et al., 2016, Environ Sci & Policy



## Scénarios de restructuration (Orgeval/Avenelles)

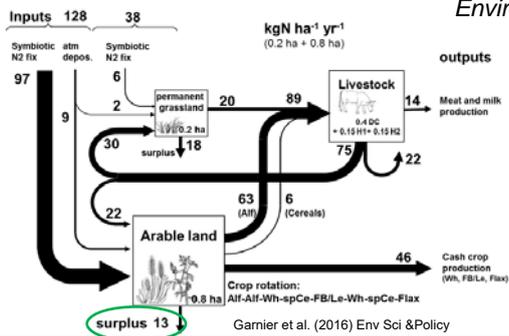
Des signaux faibles à la restructuration

Aujourd'hui, quelques agriculteurs en grande culture biologique



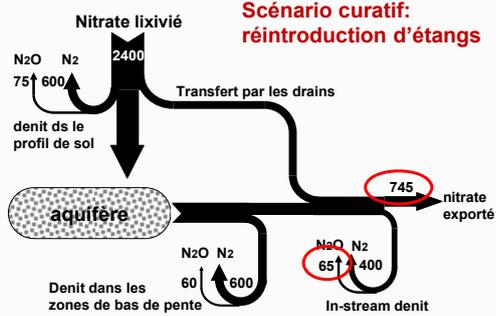
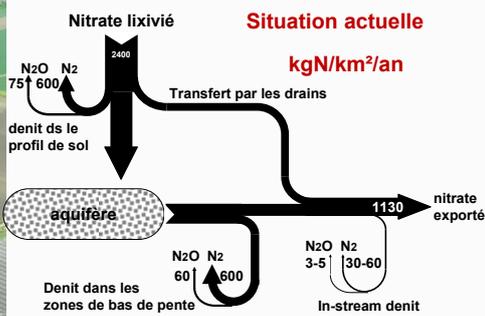
Garnier et al., 2016, Environ Sci & Policy

Demain? réintroduction de l'élevage laitier comme débouché de la luzerne bio

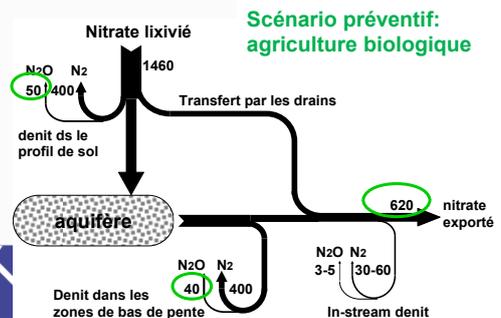


Garnier et al. (2016) Env Sci & Policy

## Bilan du scénario de restructuration (Orgeval)



- L'introduction d'étangs permet de réduire les flux hydriques de N, mais augmente les émissions de N<sub>2</sub>O
- Un changement de système agricole réduit plus les flux hydriques de N et ceux de N<sub>2</sub>O





## Conclusions

- **Des jeux de données pour les modèles destinés à :**
  - leur implémentation (BD pratiques)
  - leur validation (BD mesures des formes de l'azote dans la cascade)
- **Des jeux de données pour établir des bilans de fonctionnement des systèmes**



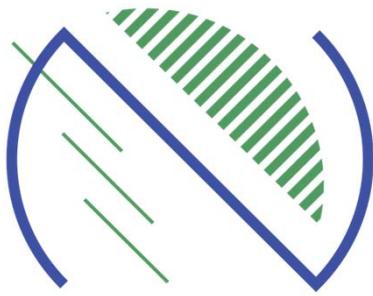
## Perspectives

- Une poursuite de **l'acquisition de données** (hydrologiques, biogéochimiques, émissions par les sols): sur les Avenelles, OS<sup>2</sup>, Naizin, Auradé
- **Analyser les données en terme de gradients** (climato-hydrologiques, systèmes agricoles)

→ **intégration des observations, bilans et modélisations**







ESCAPADE



## Modélisation des sites instrumentés et évaluation des flux d'azote

C. Benhamou, P. Durand, J.-L. Drouet  
N. Akkal, J. Anglade, P. Barbillon, L. Casal, P. Cellier, C. Chambon, S. Ferrant, J. Ferrer-Savall, C. Fléchar, D. Franqueville, J. Garnier, C. Hénault, H. Monod, C. Pasquier, A. Probst, J. Salmon-Monviola et coll.

Séminaire de clôture – 23 juin 2017 – Paris

## Objectifs et approche générale

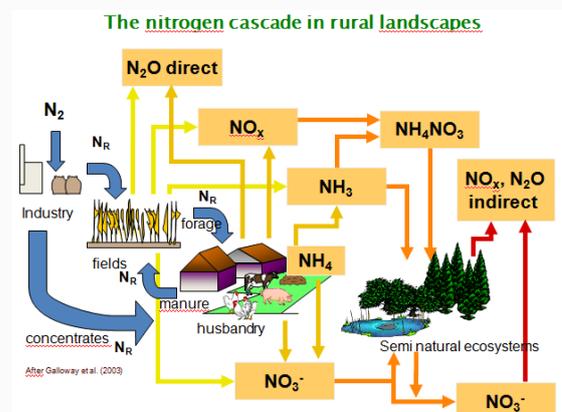


### Questions :

- Quels sont les processus impliqués ?
- Comment les différents processus interagissent entre eux ?
- Quelle est l'influence de la structure du paysage ?

### Outils:

- Enquêtes de ferme
- Reconstitution des rotations types
- Données d'initialisation
- Données de vérifications
- Les modèles NitroScape et TNT2



ESCAPADE

## Modèles intégrés de la cascade de l'azote dans les paysages



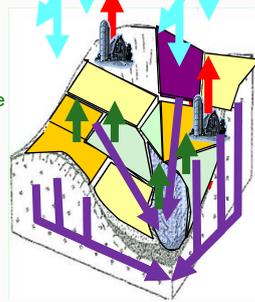
### NitroScape

(FP6-NitroEurope, 2006-2011)

Émission des bâtiments d'élevage et stockage d'effluents (FarmEF)

Transfert atmosphérique émissions et dépôts (FIDES-3D-Surfatm)

Transferts et transformations dans le complexe sol-pante-atm (CERES-EGC)



Hydrologie (TNT)

$N_2$

$N_2O$

$NH_3$

$NH_4^+$

$NO_3^-$

Base de données spatialisée

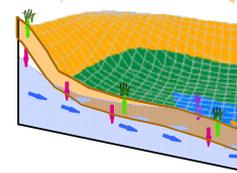
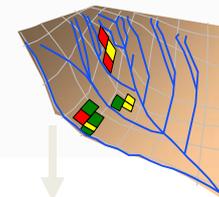
Processus impliqués :

- Minéralisation
- Nitrification
- Volatilisation-Dépôt
- Dénitrification
- Flux latéraux
- Prélèvement par les plantes
- ...

### TNT2

(ANR Acassya, 2009-2012)

Modèle agro-hydrologique intégré (TNT2)



ESCAPADE

## Sensibilité du modèle



Analyse sur bassin virtuel avec une architecture simple et sur quelques facteurs tests

Résolution spatiale :

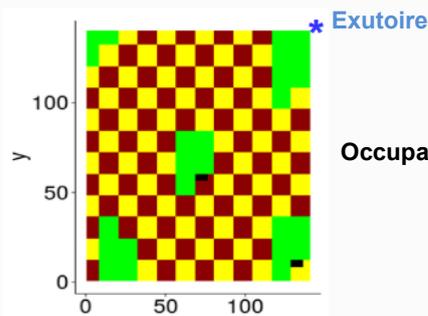
- A: Résolution de la grille
- B: Résolution des couches de sol

Paramètres physiques :

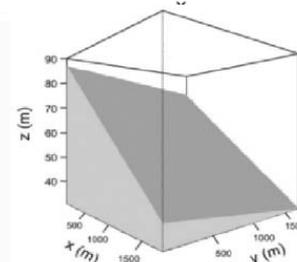
- C: Transmissivité
- D: Décroissance de la transmissivité
- E: Épaisseur de l'horizon de surface
- F: Porosité de l'horizon de surface
- G: Ratio micro/macroporosité
- H: Épaisseur de l'horizon profond
- I: Décroissance de la porosité

Pratiques agricoles :

- J: Type de fertilisation (min/org)
- K: Quantité d'apport par fertilisation



Occupation du sol



Topographie

Exutoire

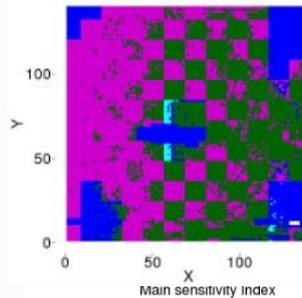
ESCAPADE

## Sensibilité du modèle

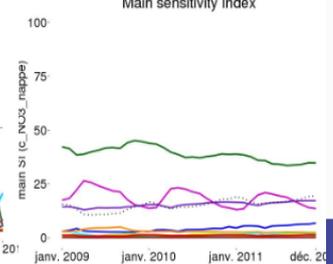
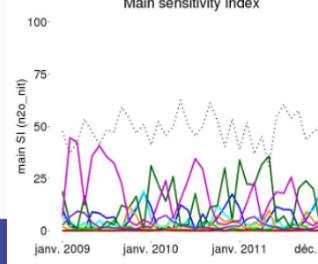
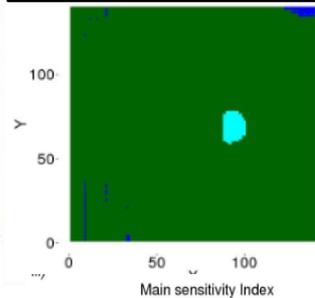
Analyse spatiale et temporelle

■	A: Résolution de la grille
■	B: Résolution des couches de sol
■	C: Transmissivité
■	D: Décroissance de la transmissivité
■	E: Épaisseur de l'horizon de surface
■	F: Porosité de l'horizon de surface
■	G: Ratio micro/macroporosité
■	H: Épaisseur de l'horizon profond
■	I: Décroissance de la porosité
■	J: Type de fertilisation (min/org)
■	K: Quantité d'apport par fertilisation

ACP sur la nitrification



ACP sur la concentration en nitrate de la nappe



ESCAPADE

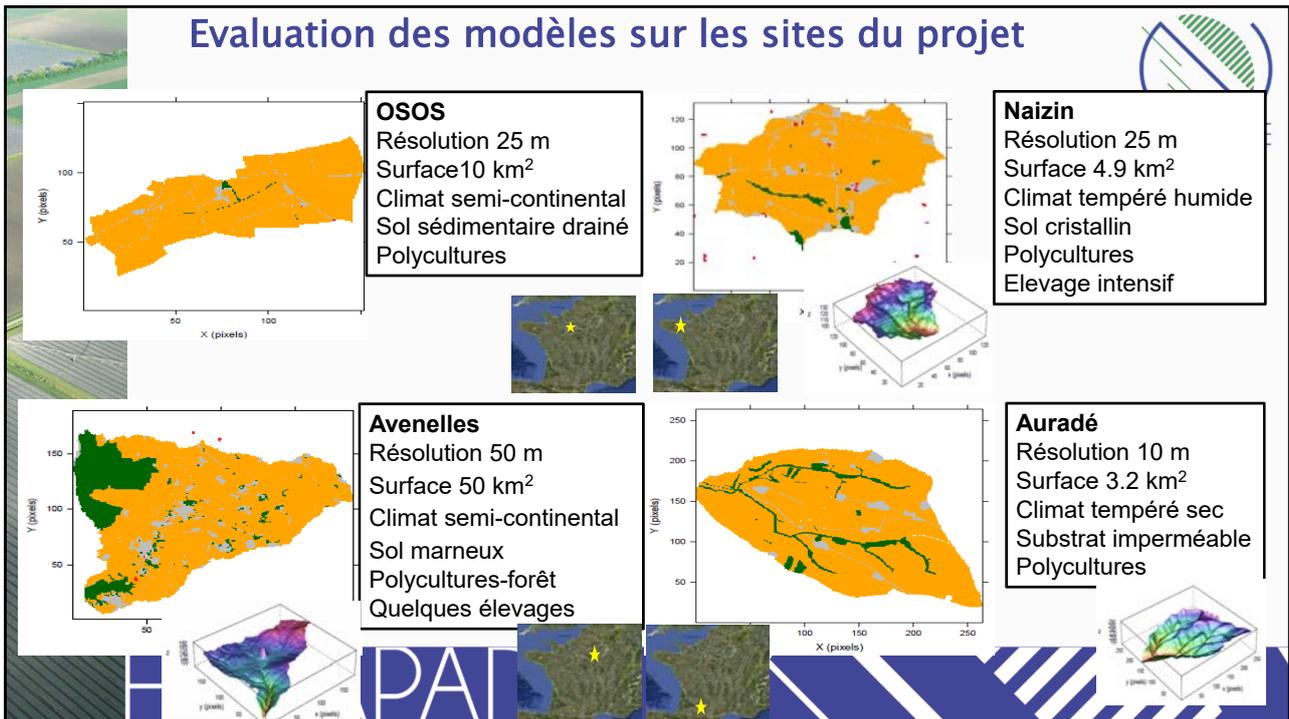
## Paramètres à forte sensibilité

- Porosité de surface
  - Transferts et transformations des nitrates et de l'ammonium
  - Emissions de  $N_2O$
  - l'évapotranspiration
  - les écoulements profonds
- Résolution et les paramètres hydrologiques
  - Les écoulements profonds
  - L'extension des zones humides (dénitrification)
- Pratiques agricoles
  - La quantité et qualité d'intrant
  - Croissance des cultures
- Paramètres des processus biogéochimiques
  - Minéralisation
  - Volatilisation
  - Dénitrification

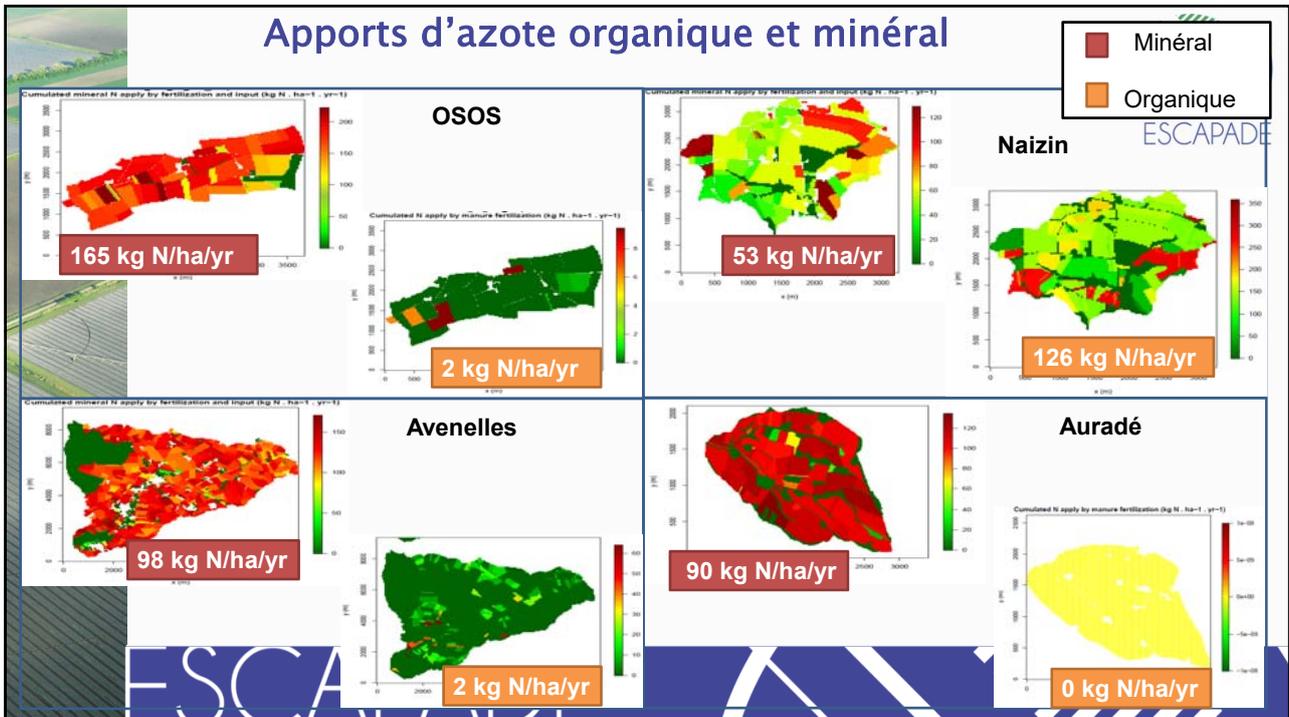
ESCAPADE

ESCAPADE

## Evaluation des modèles sur les sites du projet



## Apports d'azote organique et minéral



## Méthode de calibration

### ➤ Calibration automatique

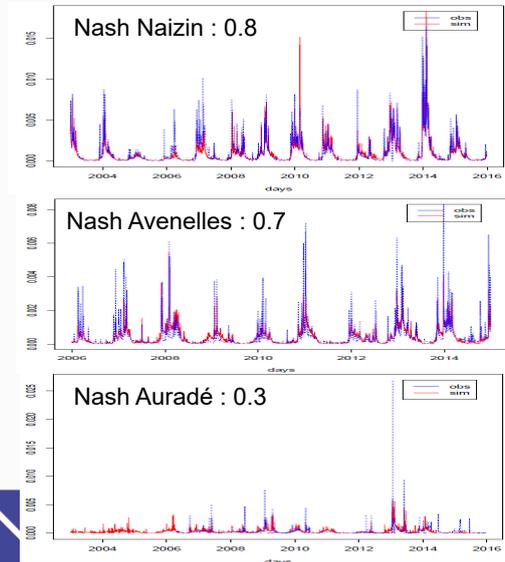
- Paramètres hydrologiques (T et m)
- Itérations sur un critère classique en hydro (Nash)
- Temps de calibration fonction de :
  - résolutions horizontale et verticale
  - nombre de paramètres

### ➤ Calibration par essai-erreur

- Paramètres d'initialisation (itk)
- Paramètres agronomiques (STICS et CERES)
- Paramètres de structure
  - Porosité de surface
- Paramètres liés aux processus
  - Minéralisation
  - Dénitrification
  - Volatilisation

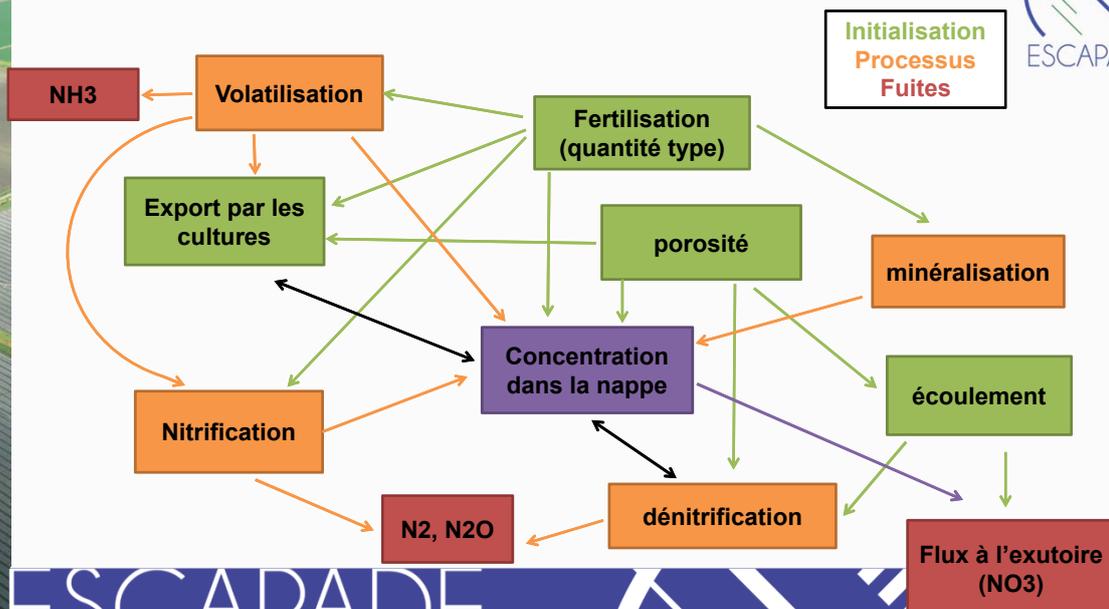


Calibration TNT2

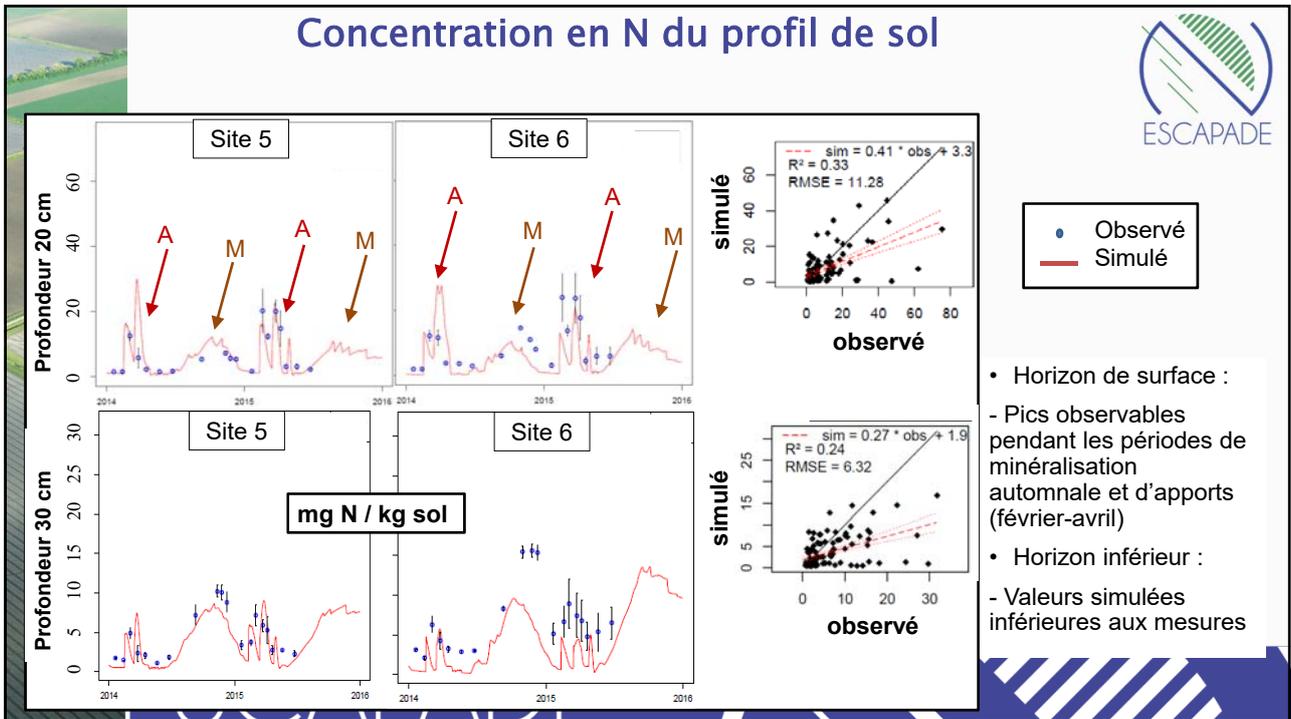
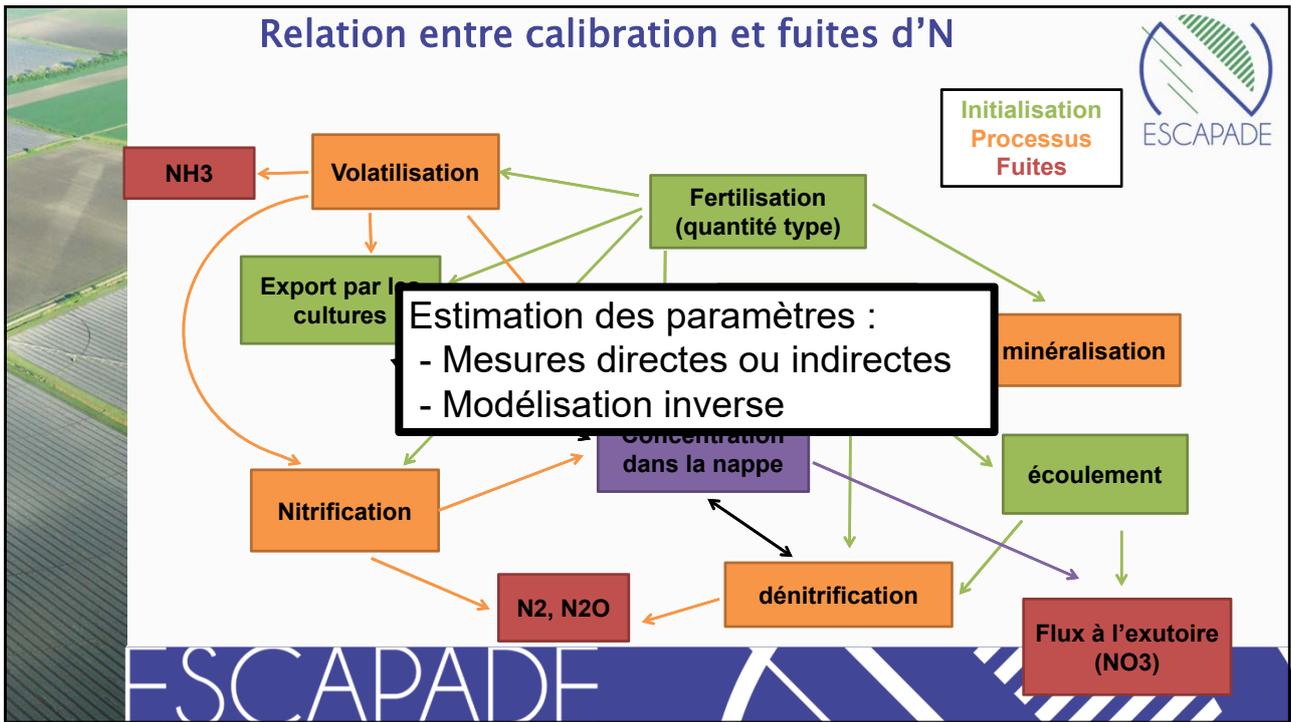


ESCAPADE

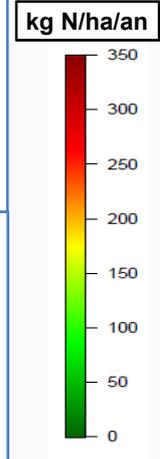
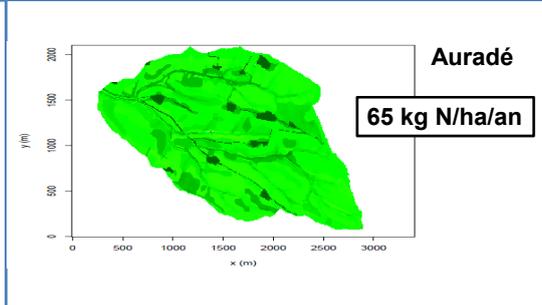
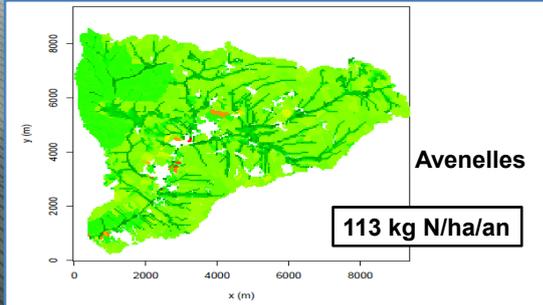
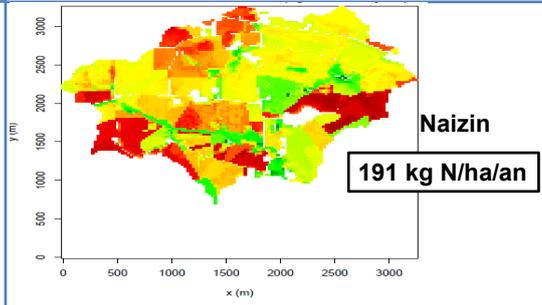
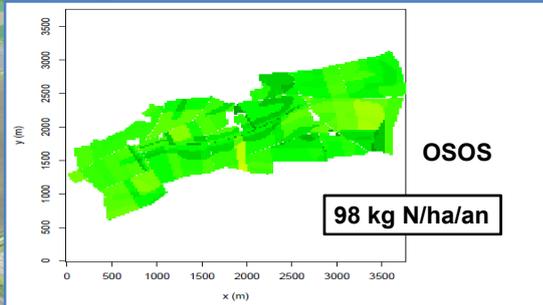
## Relation entre calibration et fuites d'N



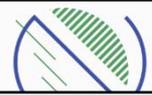
ESCAPADE



## Minéralisation nette sur les 4 sites

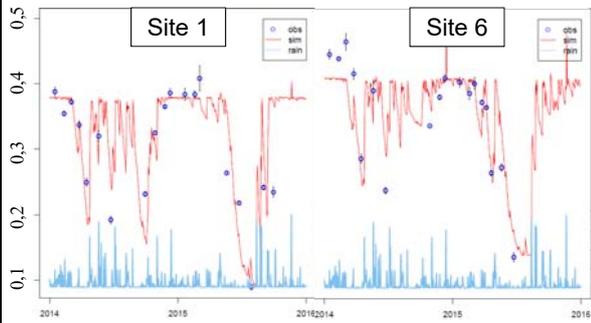
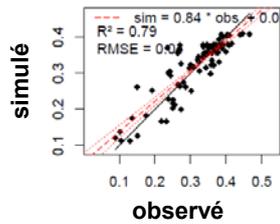


## Teneur en eau et émission de N<sub>2</sub>O



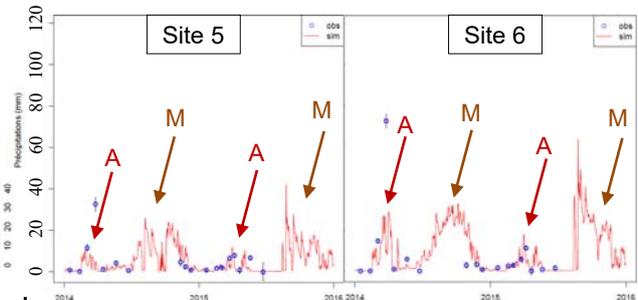
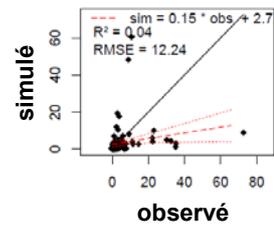
### Teneur en eau (m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup> sol) - profondeur 20cm

● Observé  
— Simulé



### Emission de N<sub>2</sub>O (g N / ha / j)

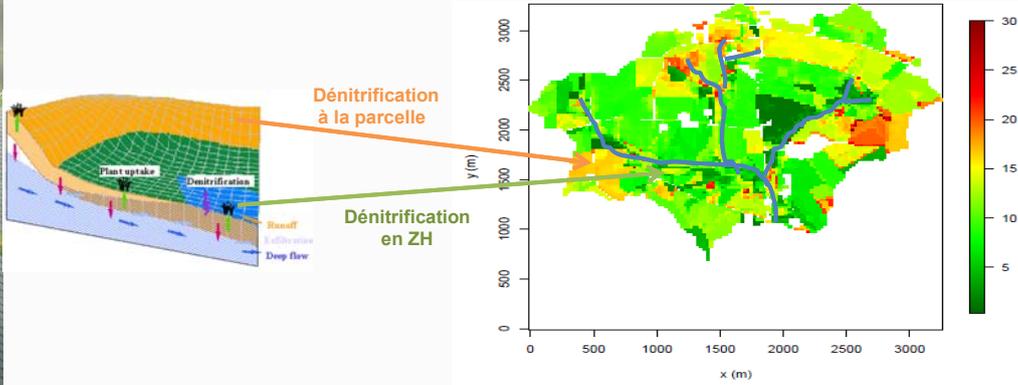
-Pics pendant les périodes d'apports **A** et de minéralisation **M**



# Emissions directes et indirectes de N<sub>2</sub>O



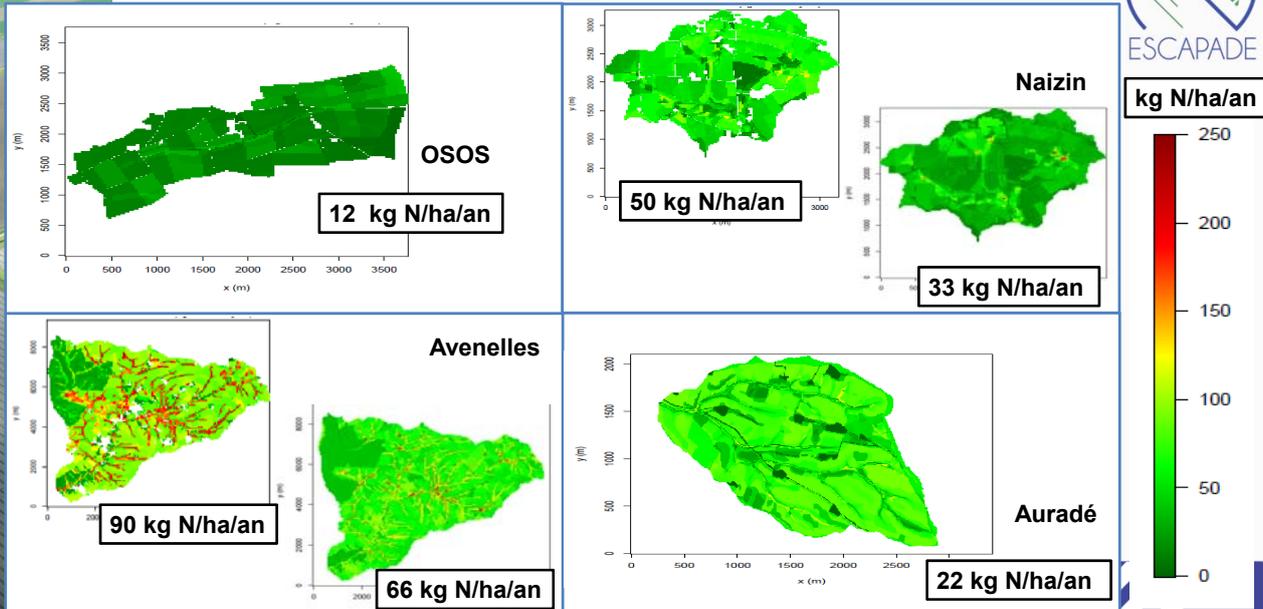
## Emissions cumulées de N<sub>2</sub>O (kg N/ha/an)

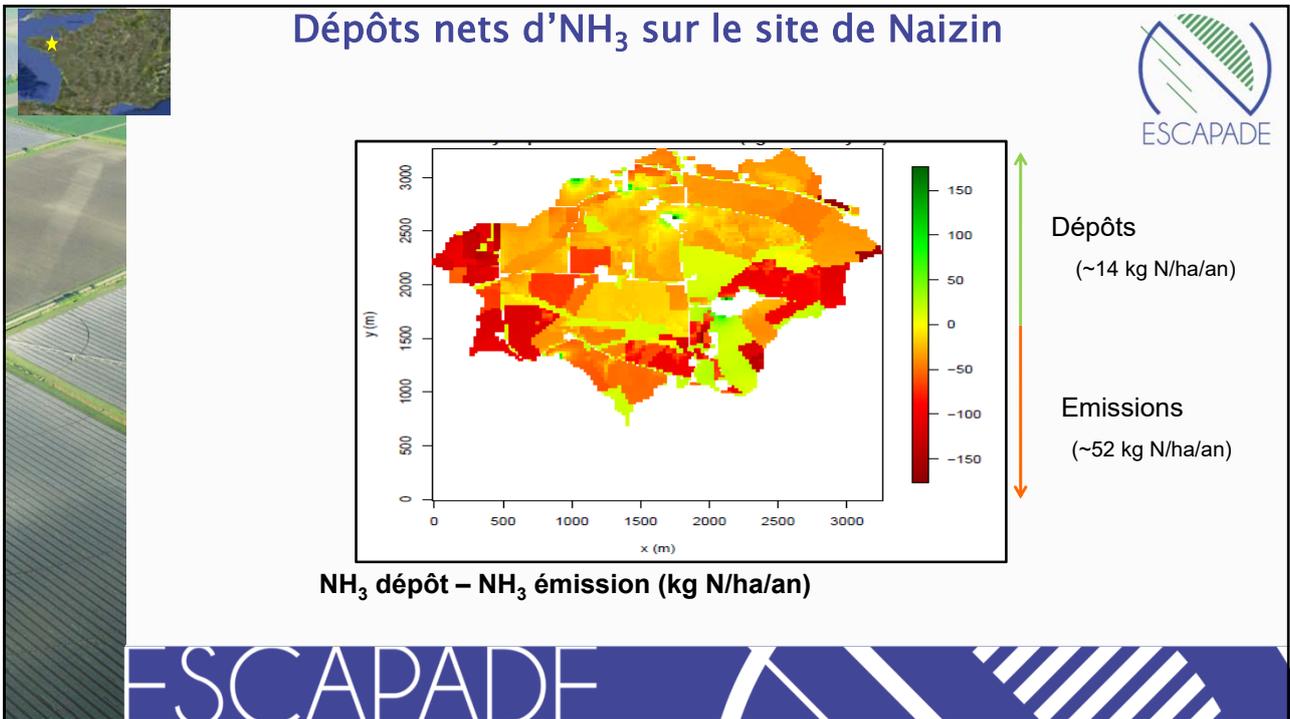
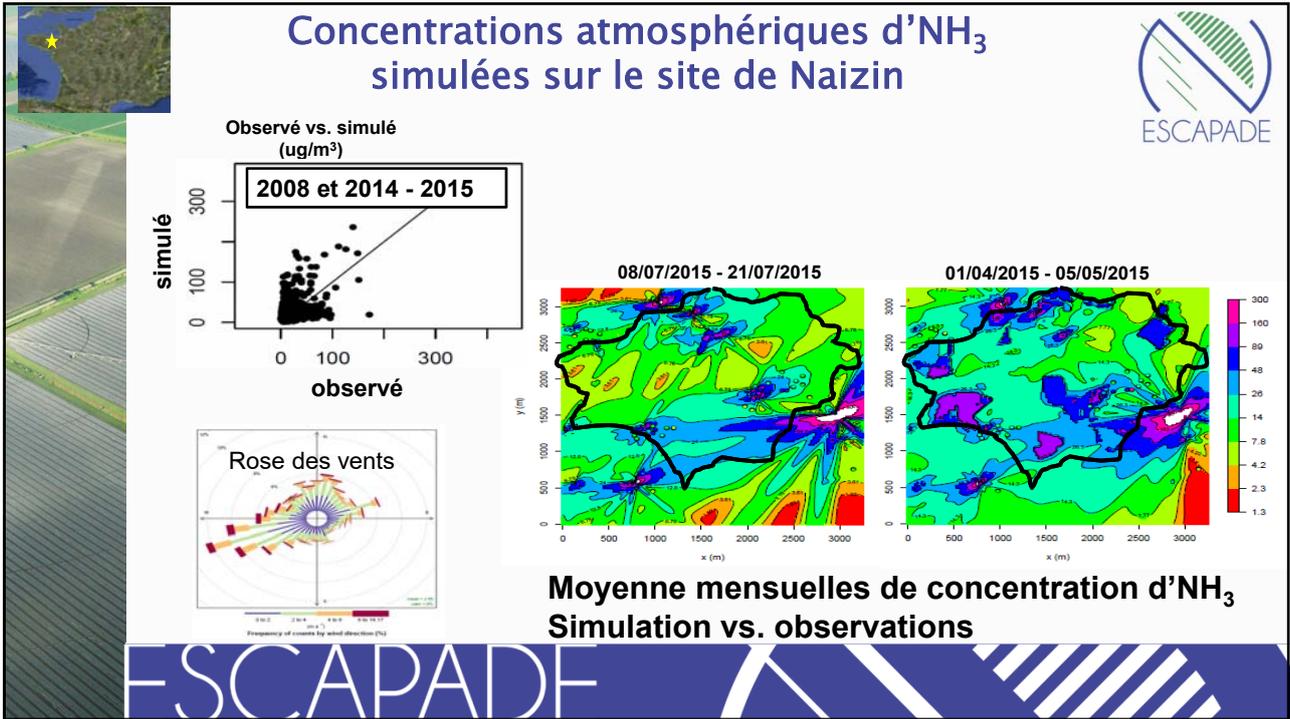


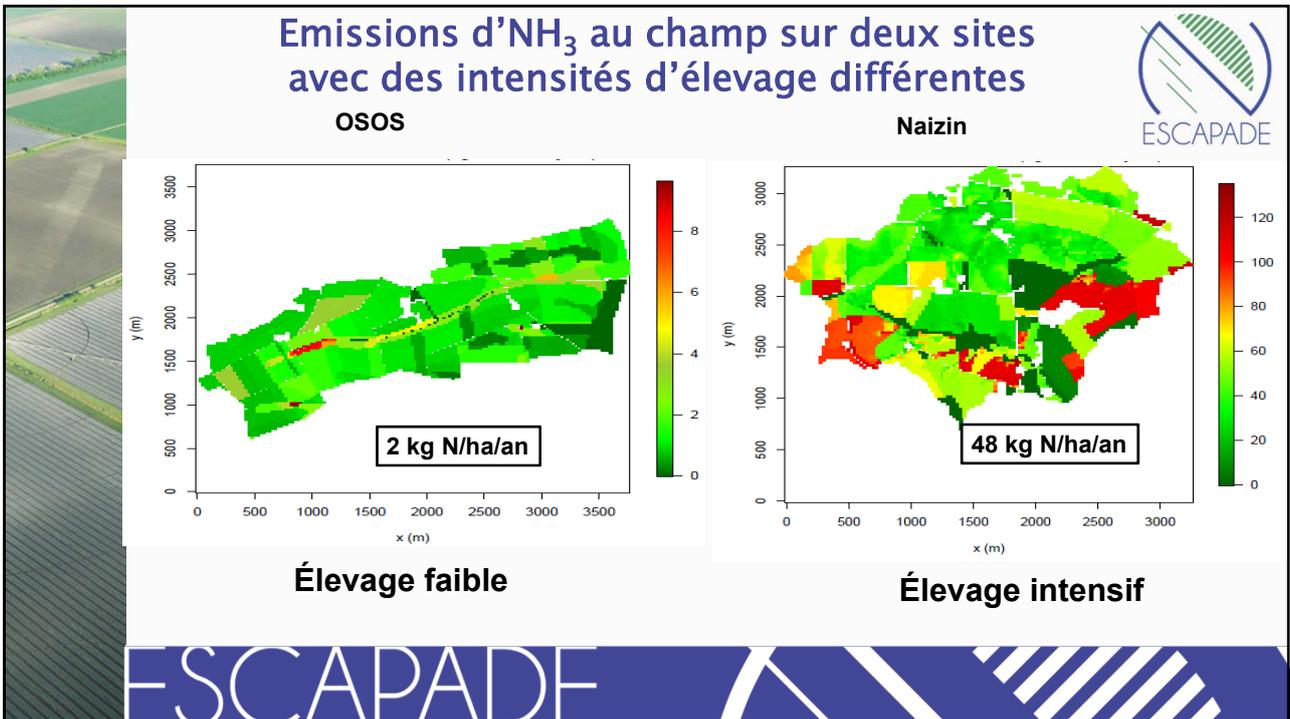
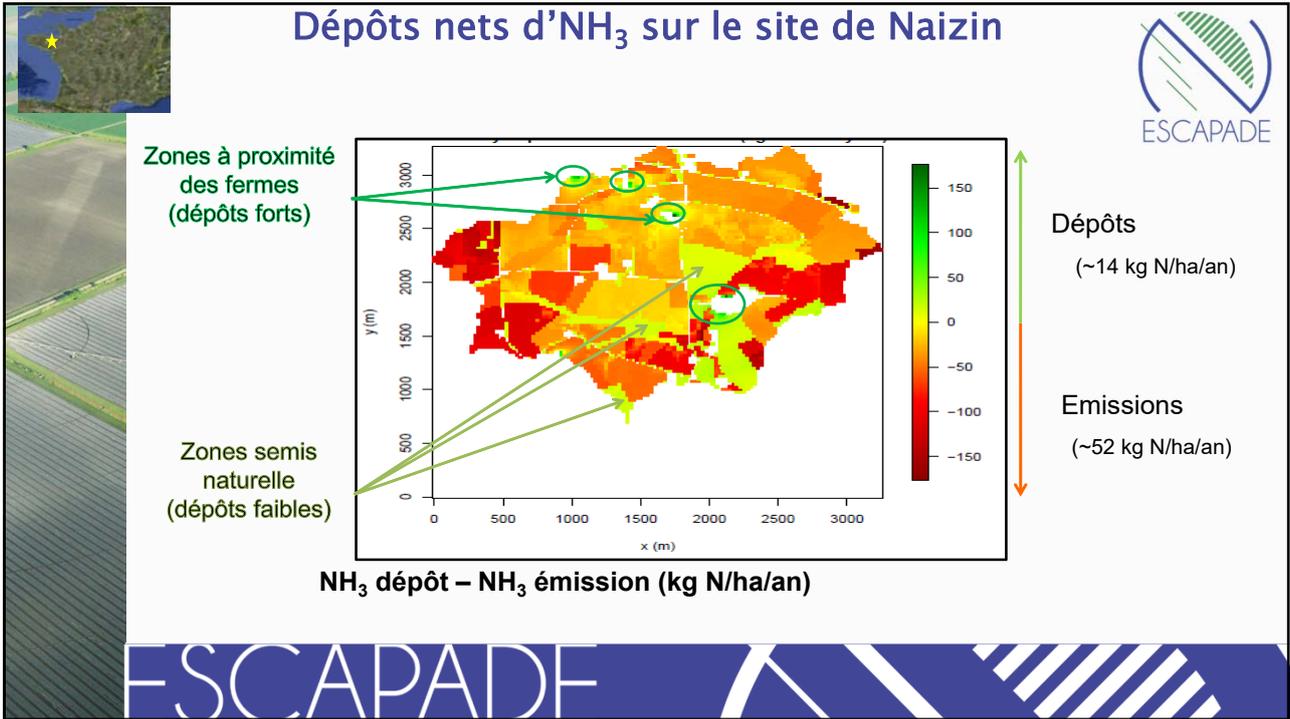
Zones fertilisées : N<sub>2</sub>O direct 12 kg N/ha (denitrification : 50)  
 Zones semi naturelles : N<sub>2</sub>O indirect 3 kg N/ha (denitrification : 17)

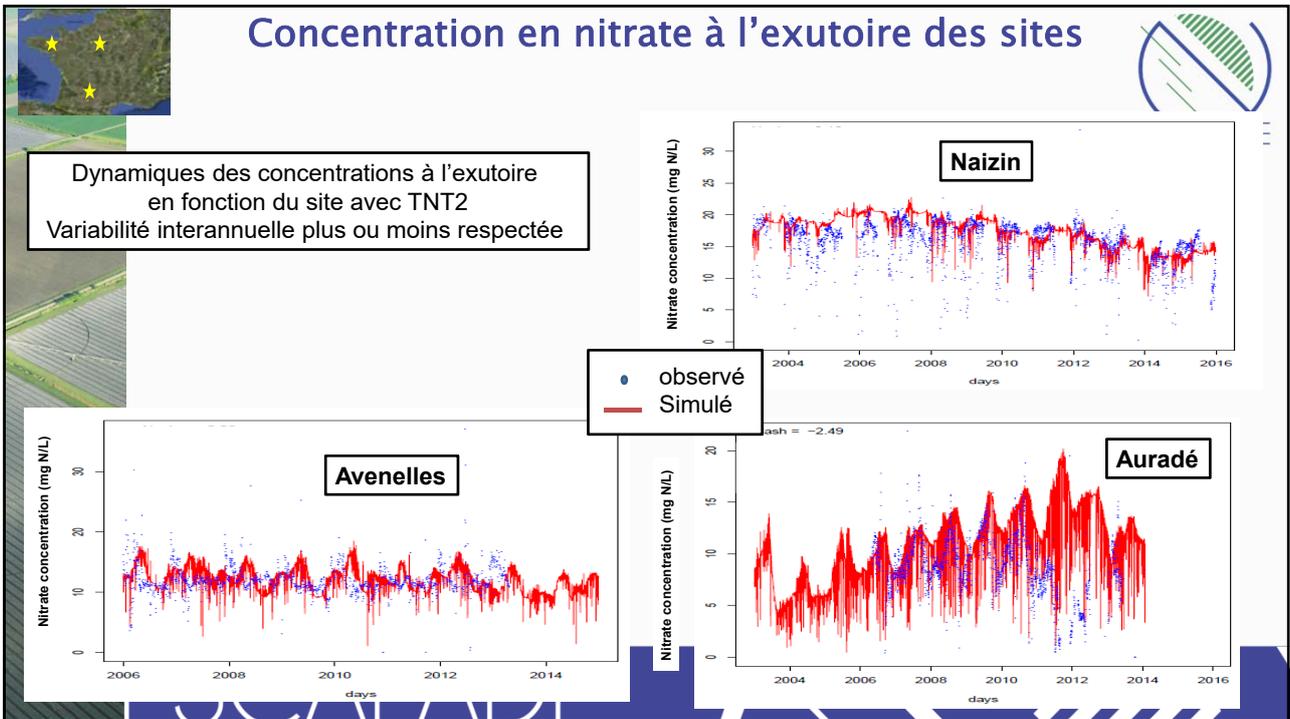
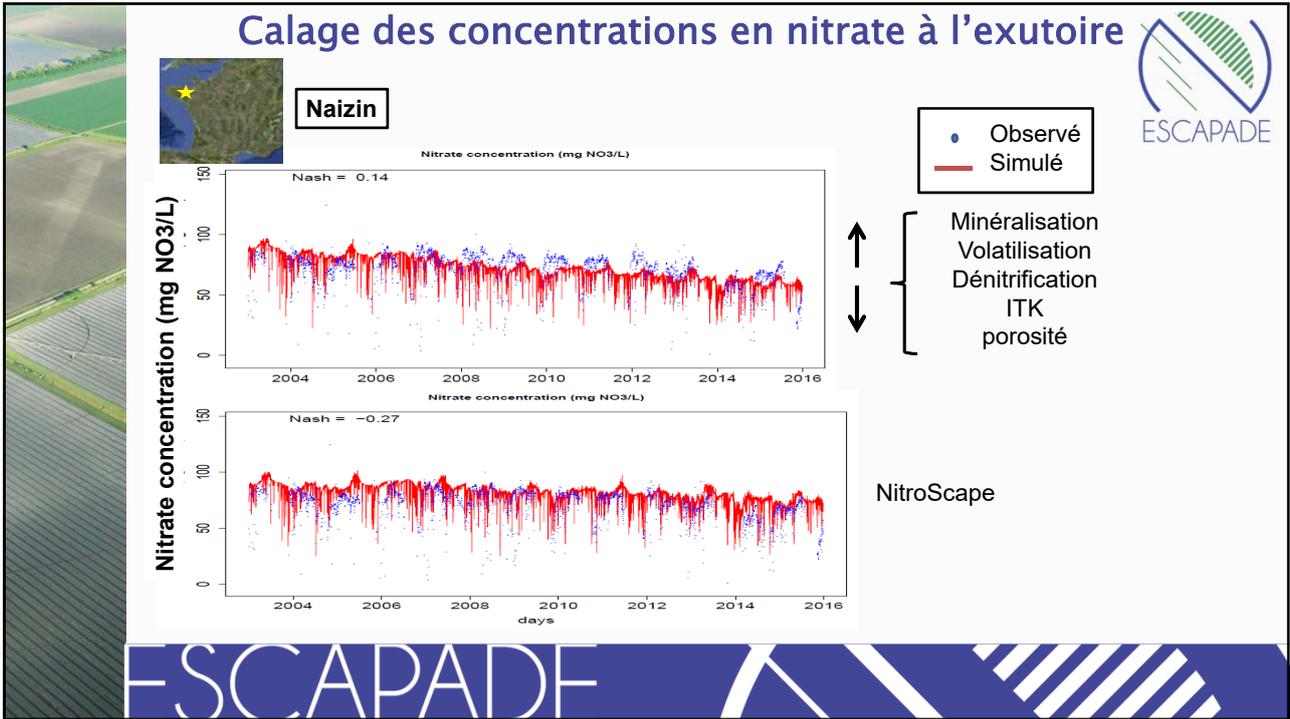


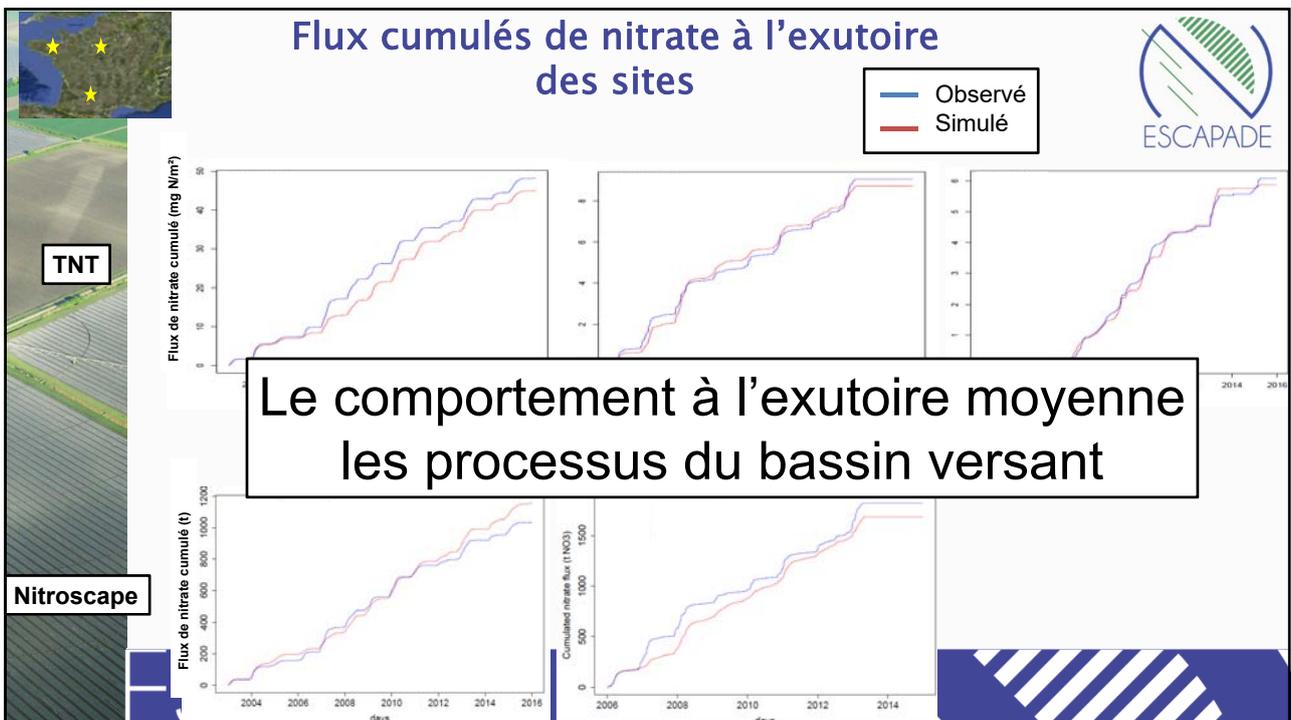
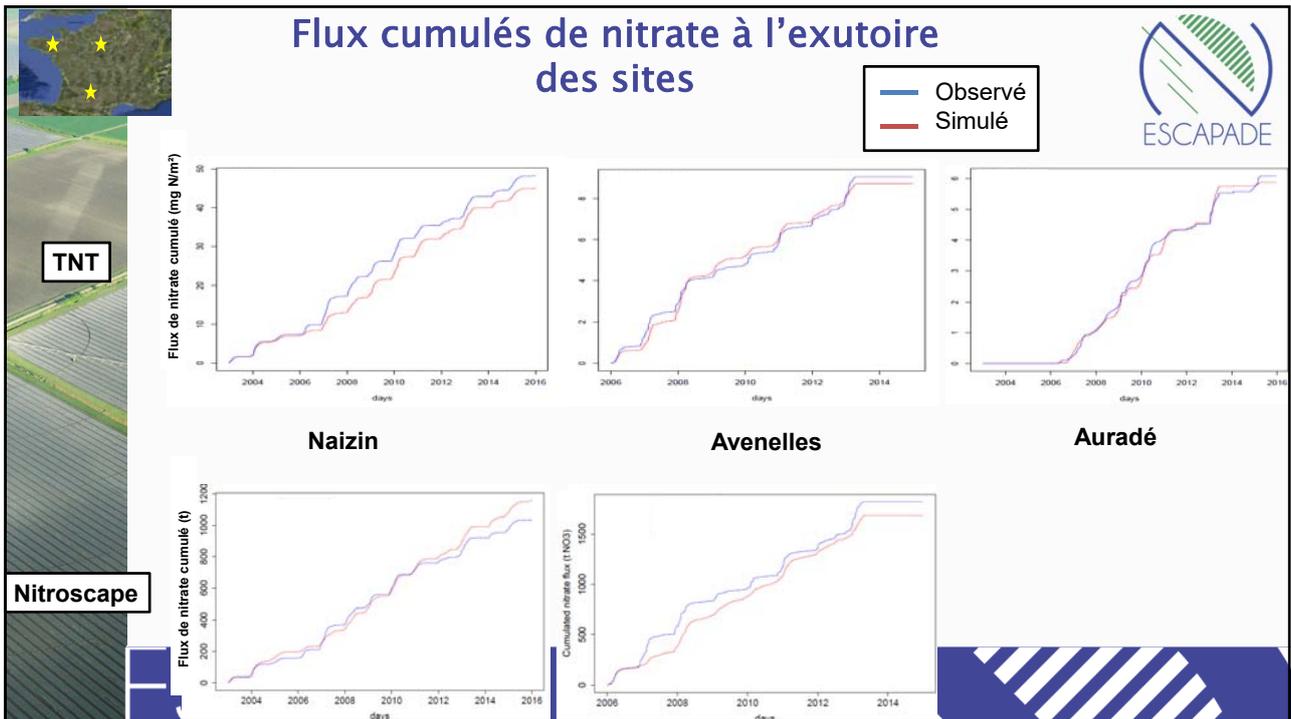
# Dénitrification sur les 4 sites











## Apports de la modélisation



- Modélisation des processus importants de la cascade de l’N
  - Emissions – dépôts d’ammoniac
  - Minéralisation
  - Dénitrification
  - Fuites hydrologiques et atmosphériques
- Représentation spatiale des processus
- Extrapolation des mesures locales à l’échelle du site
- Ordres de grandeur des flux cohérents
- Mise en avant de la sensibilité de ces processus en fonction de l’initialisation
  - Porosité
  - Résolution
  - ITK
  - Cultures
- Détermination des interactions entre les processus
- Comparaison de flux entre sites contrastés

ESCAPADE

## Limites



- Modèles gourmands en données
  - fertilisation
  - élevage
  - occupations des sols
  - rotations culturales
  - paramètres biophysiques
  - etc ...
- Certaines particularités des sites non prises en compte par les modèles
  - sols gonflants (argileux)
  - drainage
  - cultures non modélisées
- Sensibilité importante à :
  - initialisation
  - paramétrage des processus biogéochimiques
  - paramétrage de la structure physique du modèle

ESCAPADE

## Conclusions et perspectives



- Couplage des modèles et développements effectués donnent de bons résultats
- Résultats globalement satisfaisants sur OSOS et Naizin
- Adaptation des données et calibration à poursuivre sur les Avenelles et Auradé
- Importance des mesures et du paramétrage pour caler les modèles
  - Mesures directes ou indirectes
  - Campagne de données en fonction de la sensibilité des modèles
- Développements supplémentaires
  - Prise en compte du stockage profond d'azote en absence de module hydrologique dans NitroScape(OSOS)
  - Adapter le code de CERES à une plus grande diversité de cultures
  - Prise en compte du drainage et des sols gonflants
  - Correction du module  $\text{NH}_4$  dans TNT2

ESCAPADE

**Merci de votre attention!**

ESCAPADE

Le 23 juin 2017



## Modélisation de la cascade de l'azote dans les sites

L. Casal, P. Durand, C. Benhamou, S. Ferrant, J-L. Drouet, F. Vertès, F. Laurent

### Sites d'étude



**Naizin (Bretagne, France)**

5 km<sup>2</sup>

Humide et tempéré

Elevage intensif

N surplus élevé (>90 kg.ha<sup>-1</sup>)

≈ 17 mg N.L<sup>-1</sup> dans l'eau

Localisation

Surface

Climat

Agriculture type

Contexte azote

Concentration moyenne

**Auradé (Sud de la France)**

3,2 km<sup>2</sup>

Sec et tempéré

Polyculture

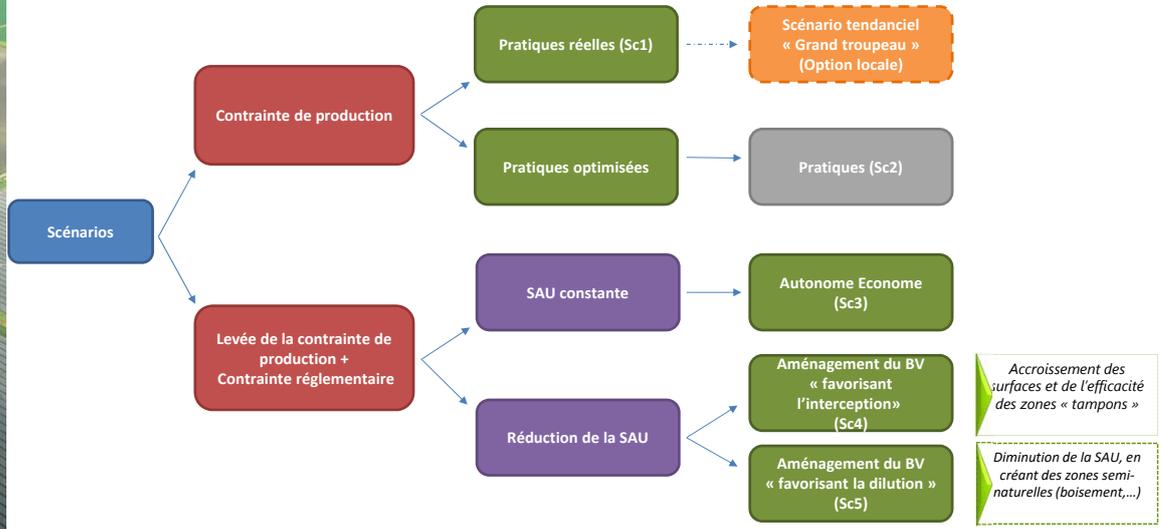
N surplus faible (≈ 36 kg.ha<sup>-1</sup>)

≈ 11 mg N.L<sup>-1</sup> dans l'eau

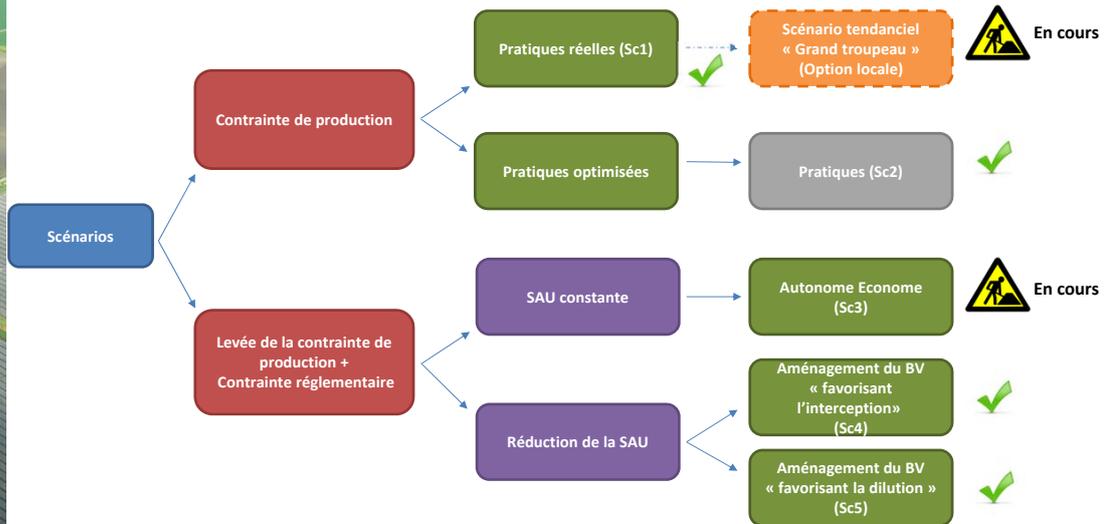
ESCAPADE

Suivi depuis > 20 ans des débits et des concentrations d'azote

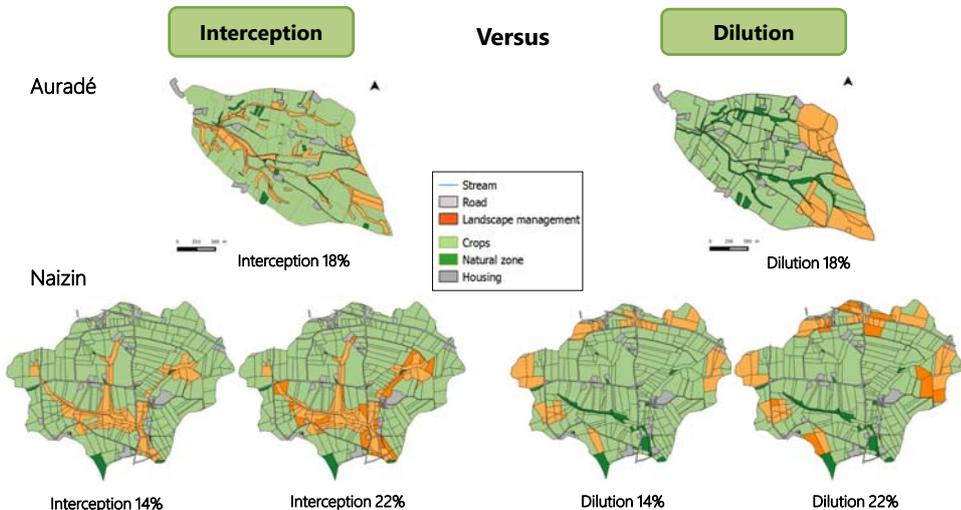
## Architecture du cahier de scénarios « sites »



## Architecture du cahier de scénarios « sites »



## Détails du jeu de scénarios

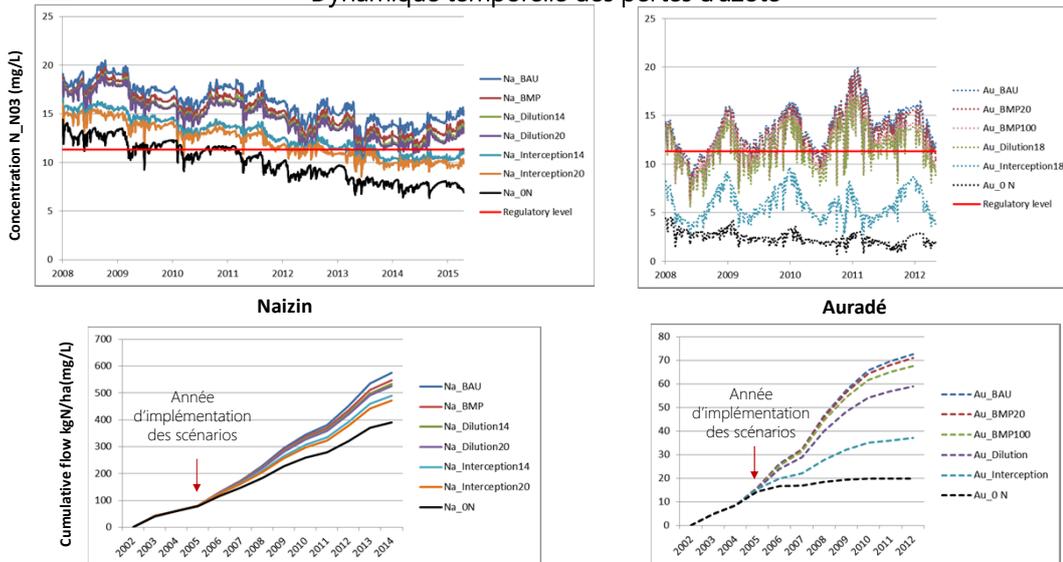


Dans les 2 scénarios, la même surface de Bassin est soustraite et convertie en prairie fauchée non fertilisée

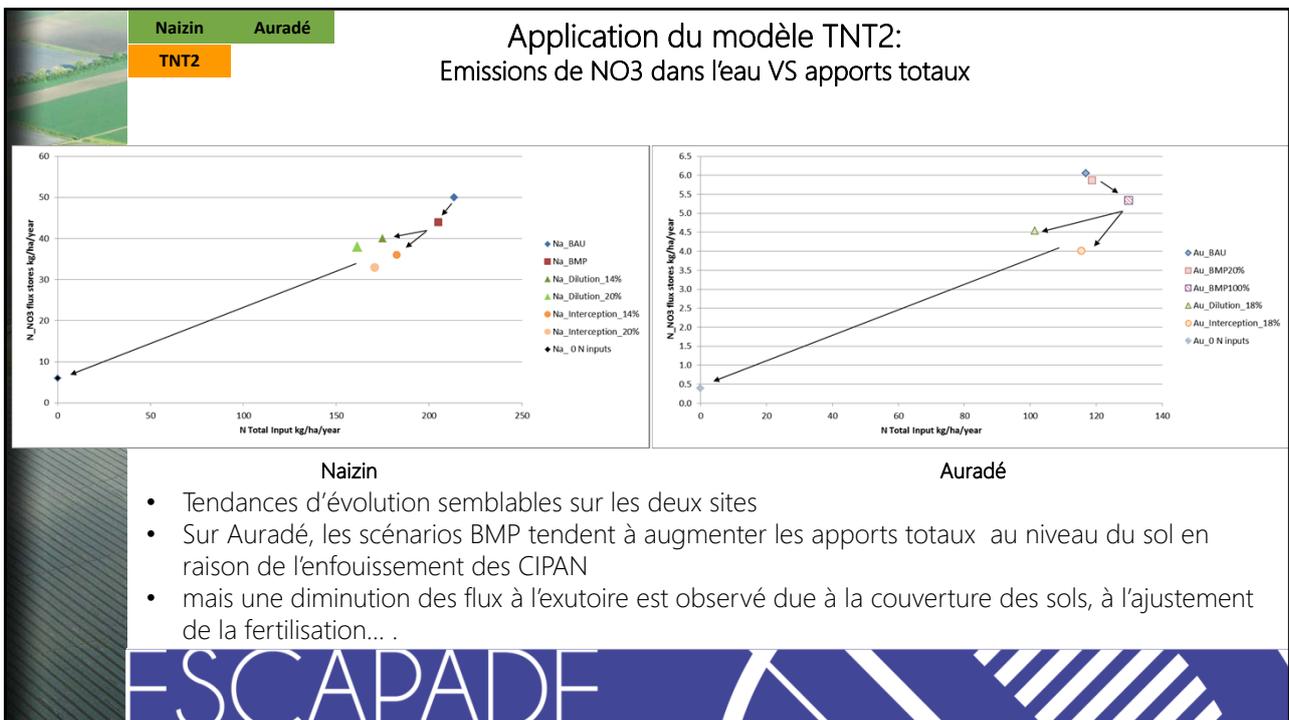
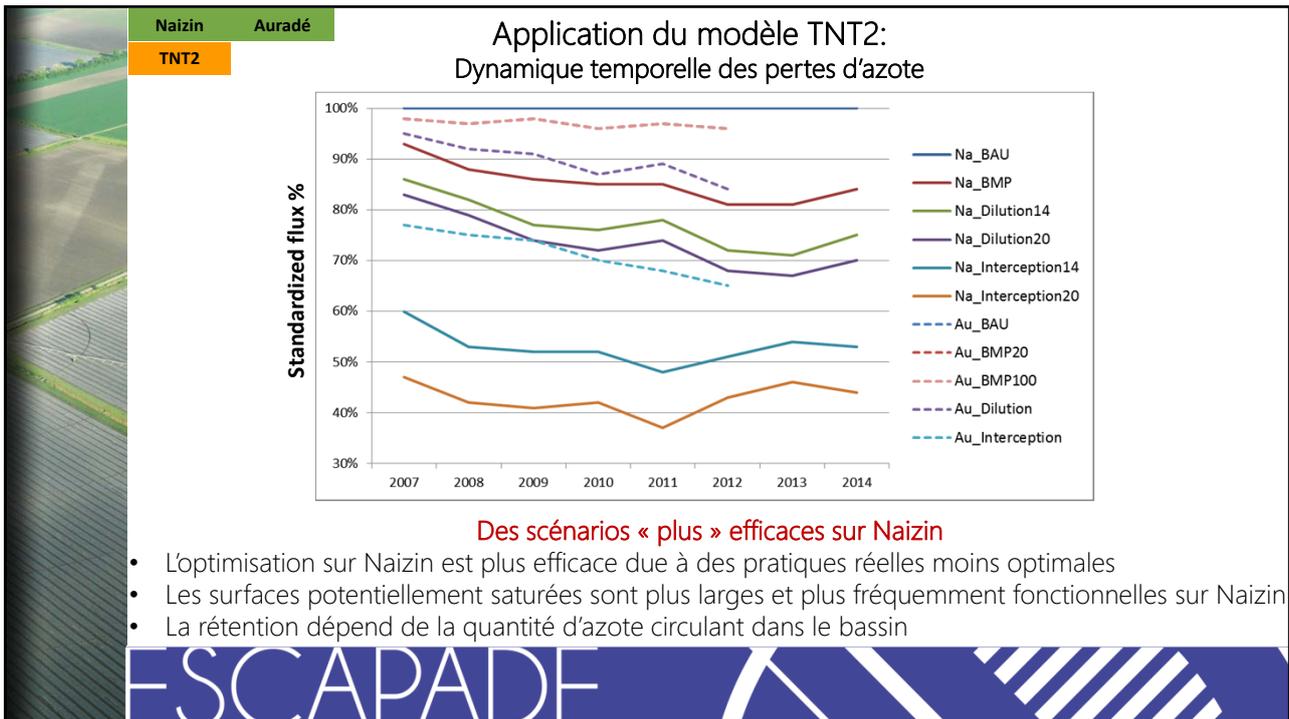
ESCAPADE

Naizin      Auradé  
**TNT2**

## Application du modèle TNT2: Dynamique temporelle des pertes d'azote



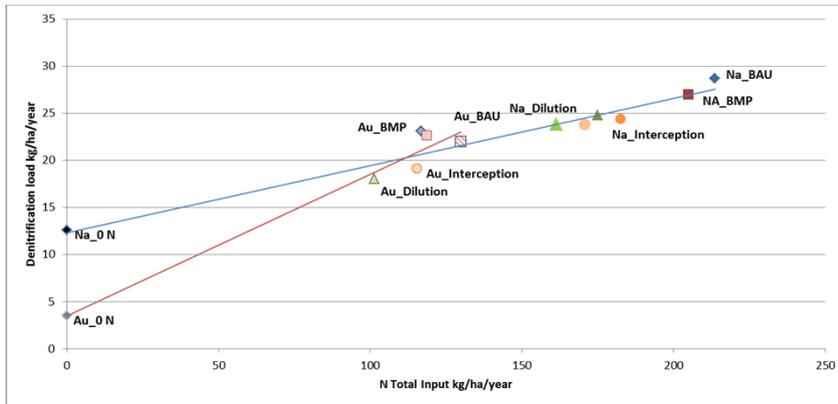
ESCAPADE



Naizin Auradé

TNT2

### Application du modèle TNT2: Dénitrification VS Apports totaux



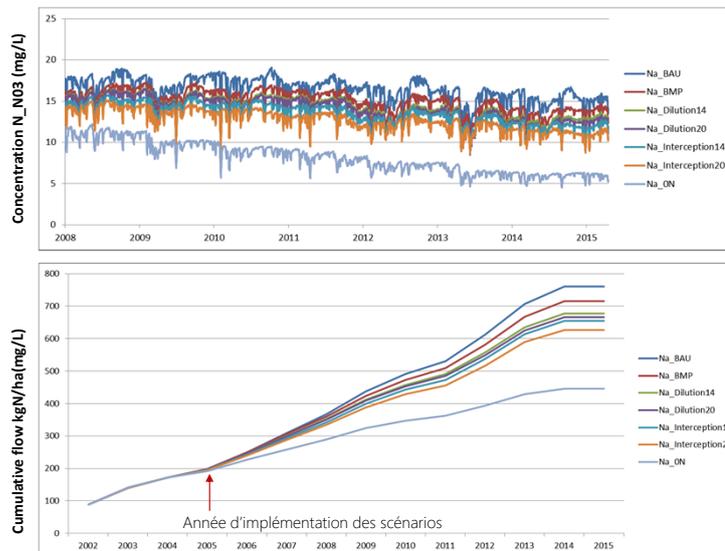
- La disponibilité de l'azote est le facteur limitant principal de la dénitrification
- La position des zones tampons vis à vis des sources est un facteur plus déterminant que la surface en zone naturelle
- Sur Auradé, la pente est plus forte car les conditions d'anoxie sont moins étendues (tps-espace)

ESCAPADE

Naizin

Nitro

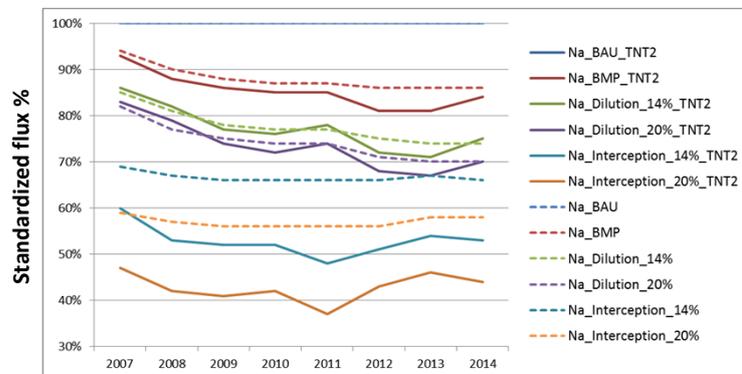
### Application du modèle Nitroscape: Dynamique temporelle des pertes d'azote



ESCAPADE

Naizin  
Nitro TNT2

## Dynamique temporelle des pertes d'azote

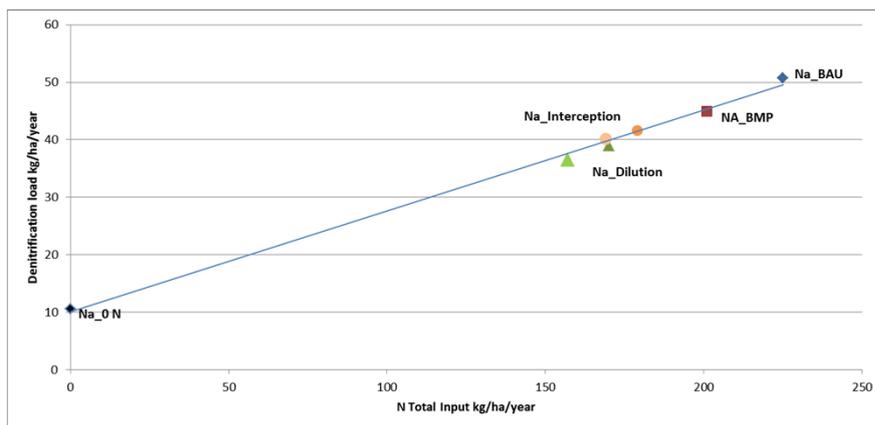


- Bonne concordance des cinétiques entre les flux standardisés obtenus avec Nitroscape et TNT2.
- Scénarios interception sur Naizin plus efficaces....mais sensibles au climat

ESCAPADE

Naizin  
Nitro

## Application du modèle Nitroscape: Dénitrification VS Apports totaux



Les mêmes hypothèses que sur TNT2 sont observées:

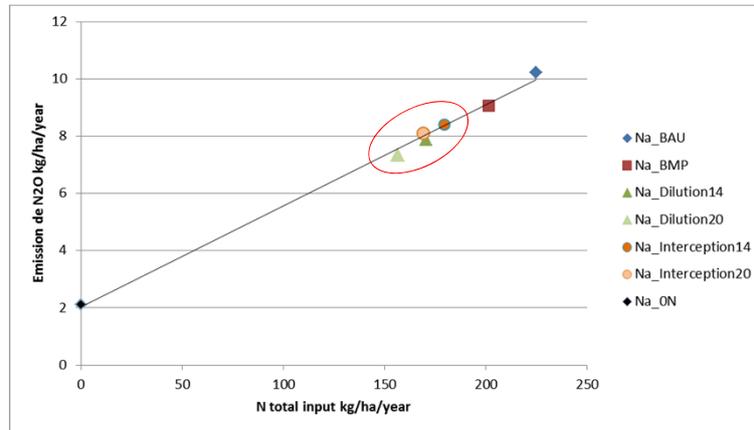
- La disponibilité de l'azote est le facteur limitant principal de la dénitrification
- La position des zones tampons vis à vis des sources est un facteur plus déterminant que la surface en zone naturelle

ESCAPADE

Naizin

Nitro

### Application du modèle Nitroscape: Emission N2O VS Apports totaux



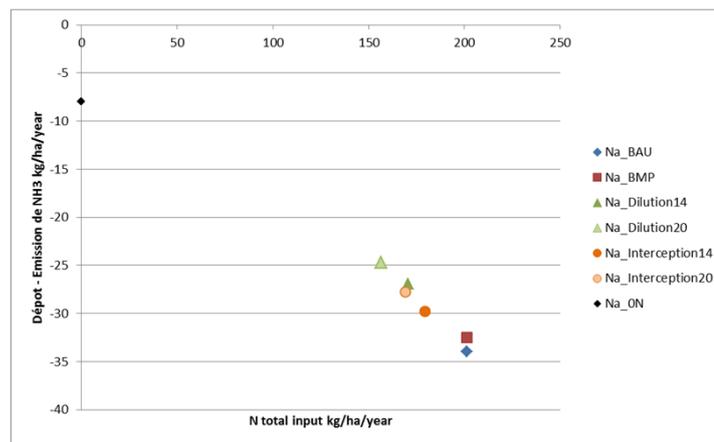
Les scénarios « interception » se traduisent par un léger transfert de pollution  $\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2\text{O}$

ESCAPADE

Naizin

Nitro

### Application du modèle Nitroscape: Dépôts-Emissions NH3 VS Apports totaux



ESCAPADE

## Conclusions et perspectives

### Conclusions

- Les difficultés rencontrés pour :
  - remplir les bases de données réelles d'une part
  - les développements des modèles d'autre partont entraîné des retards dans l'analyse et la valorisation des résultats
- Néanmoins les résultats sont très encourageants
- Bonne capacité des modèles à simuler différents scénarios de mitigation de l'azote dans deux sites contrastés

### Perspectives

- Finalisation des scénarios alternatifs :
  - Implémentation du scénario « grand troupeau » sur Naizin
  - Implémentation du scénario « autonome économe » sur Naizin et Auradé et utilisation de Casimod'N sur Naizin pour ces deux scénarios
- Changement d'échelle, comparaison de scénarios similaires à une échelle plus large
- Nitroscape : Approfondir l'analyse des résultats (spatialisation des émissions/dépôts)

ESCAPADE





F. Vertès, N. Akkal-Corfini, V. Parnaudeau et C. Gascuel (INRA SAS), C Mignolet et EG Lazrak (INRA ASTER)



Production de typologies des systèmes de culture et des paysages pour la modélisation territoriale des scénarios

Effet des agencements à deux échelles



Séminaire final

Paris le 23 juin 2017



## Des sites aux territoires

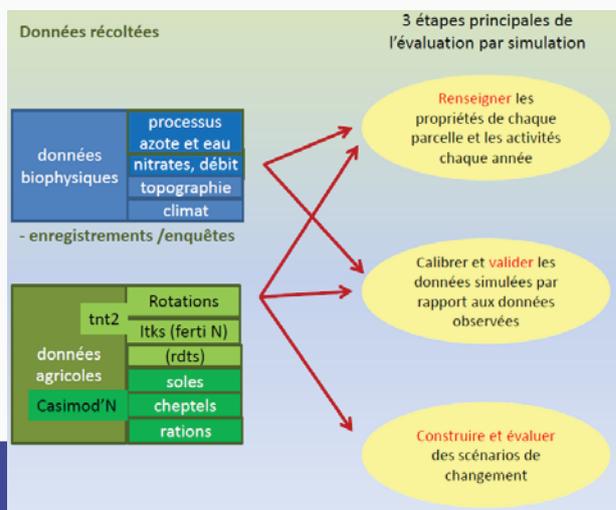
- À l'échelle des sites, avec les modèles Nitroscape et TNT2-Casimod'N

Les données physiques nécessaires sont mesurées/collectées

Les SdC à l'échelle de la parcelle sont reconstitués à partir d'enquêtes + RPG + télédétection + dires d'experts (TNT2, Nitroscape)

ou modélisés à partir de règles de décision des agriculteurs (Casimod'N, Moreau et al. 2013)

ESCAPADE





**A l'échelle des territoires** : nécessité d'une typologie des éléments du paysage agricole (parcelles et éléments interstitiels) pour la paramétrisation des modèles territoriaux (Swat ; Sénèque ; Nutting)



Pour caractériser et spatialiser les zones sources et puits d'azote dans les modèles à l'échelle des territoires

→ Typologies et cartes des systèmes de cultures et des zones de rétention sur les BV du Haut Loir (OS<sup>2</sup>), du Grand Morin (Avenelles), de la Save (Auradé) et du Blavet (Naizin) (El Ghali Lazrak, 2015)

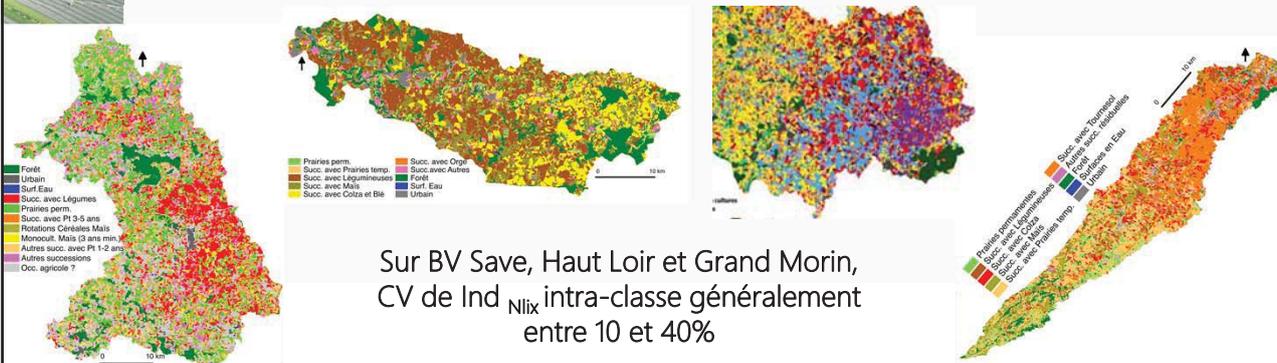


**Hypothèse sur les données agricoles :** les rotations sont indicatrices d'un risque Nitrates

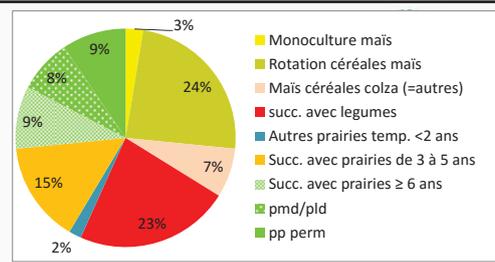
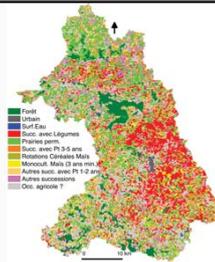


**Ind<sub>Nlix</sub> = solde N x indice lixiviation** (de 30% sous sol couvert à 100% en sol nu, METIS + SAS)

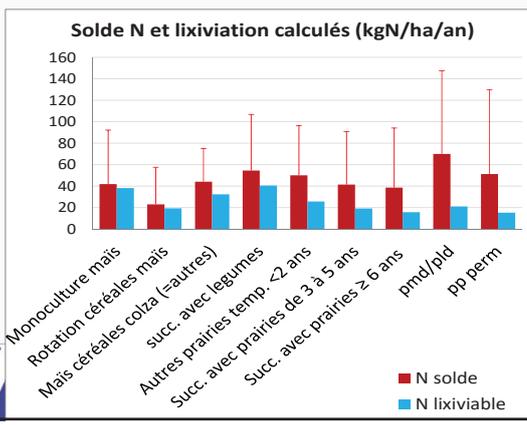
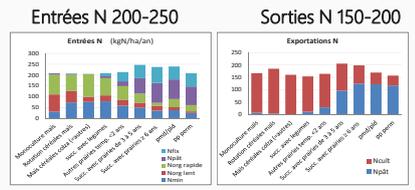
Données RPG + modèles de Markov + dire d'experts → typologie spatialisée (Lazrak, 2015)



# Pourquoi une autre typologie sur le BV Blavet ?



Répartition des « SdC ElGhali » dans la BD SdC Blavet (N,Akka)



La variabilité intra- des SdC ne permet pas d'y associer un risque de lixiviation spatialisé → nouvelle classification (ACP)



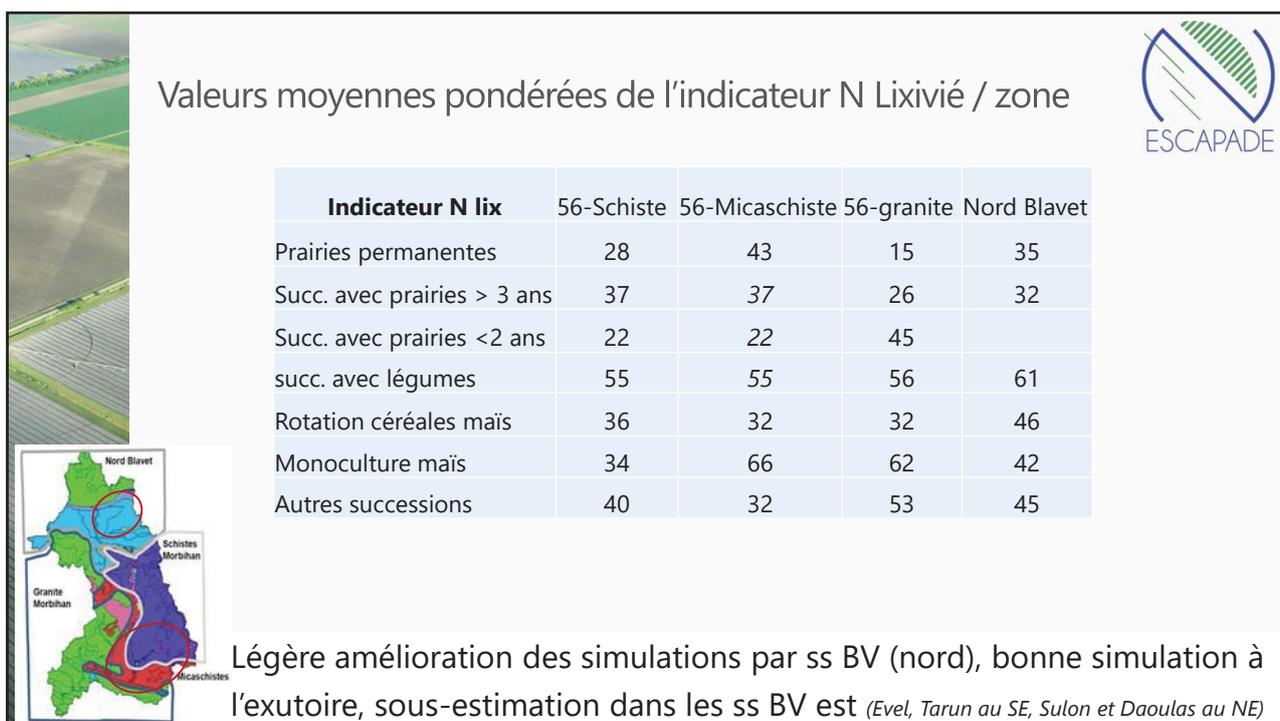
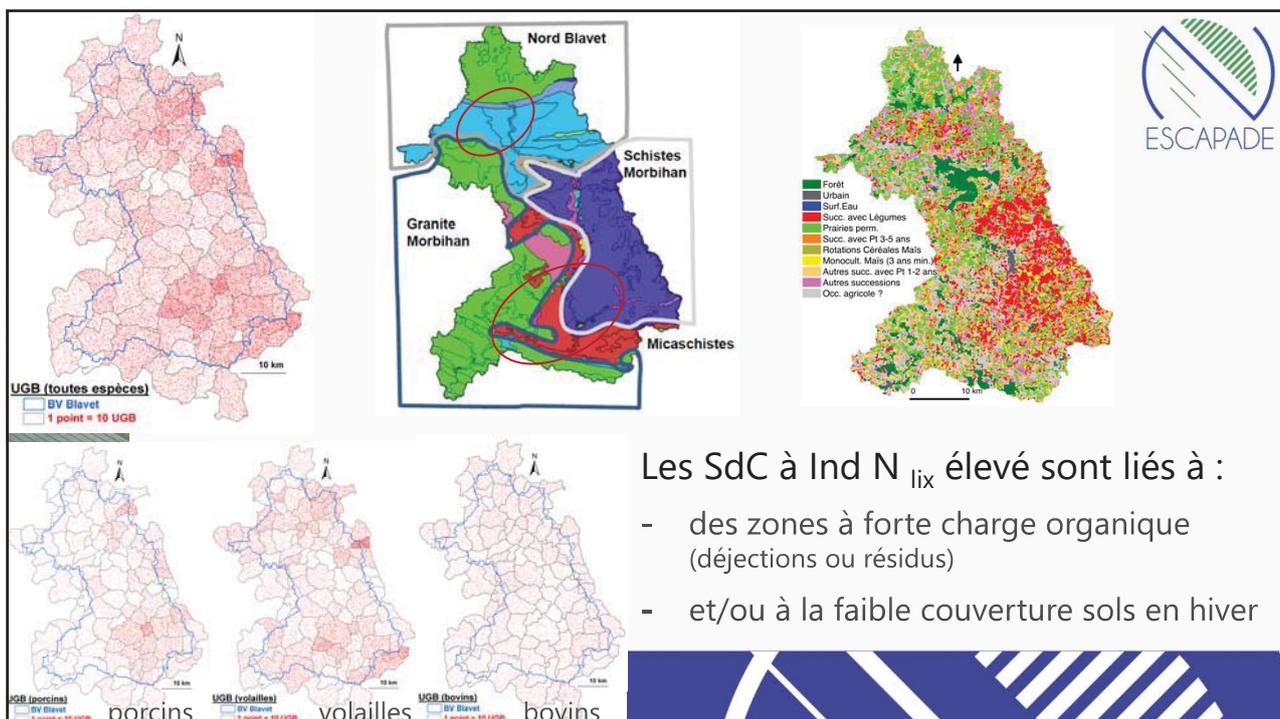
# Méthodologie et résultats



- Caractérisation et Evaluation des systèmes de culture
  - Compléments BD : Successions cultures + Itinéraires techniques
  - Calculs de bilans N (et P) pour chaque SdC
  - Typologie des SdC / risque nitrate (indicateur + Modélisation Syst'N)
- Une BD de 688 systèmes de cultures (50% enquêtes diagnostic agraire Blavet 56, 50% autres sources de données)
  - Typologie « succession » pour explorer la variabilité de Ind Nlix
  - Typologie intégrant les variables liées à N (ACP)



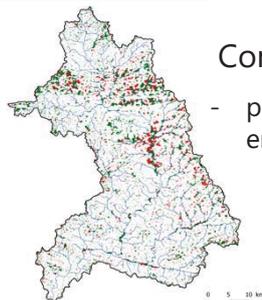




## Conclusion et perspectives (1)



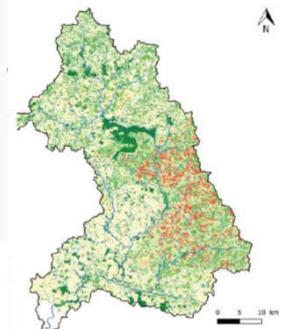
- Typologie paysagère = bonne base de travail
  - pour le scénario d'optimisation des pratiques
    - pour chaque succession type on remplace la moy des ss-clusters à fortes pertes (3-4-5) par la moy des ss-clusters 1-2
  - pour les scénarios paysagers (dilution et interception,  $\simeq$  SAU)



Conversion en PP fauchées des zones:

- potentiellement épuratrices actuellement en cultures (*interception S4*)

- avec SdC à risque élevé (*dilution S5*)



**Capacité de rétention des flux de nitrates**  
■ Capacité de rétention maximale : zones humides ripariennes actives  
■ Capacité de rétention activable : terres arables fortement et moyennement humides  
□ Capacité de rétention nulle  
▬ Réseau hydrographique

## Conclusion et perspectives (2)



- Des limites liées
  - à l'accès (et la fiabilité) aux données
    - Reste difficile pour les prairies (gestion, légumineuses)
    - Réticences / enquêtes ds les ss-bassins plus contributeurs
  - À l'évaluation du Nlix à cette échelle : Ind Nlix vs Syst'N
- Des compléments nécessaires
  - pour les scénarios agriculture à moindre intrants et émissions
    - perspectives via la spatialisation des Systèmes de Production (et SdC liés) (projet Creseb Blavet)
    - avec des scénarios alternatifs autonomes et économes (+ transition)



## Acquis d'Escapade



- Dans territoires dominés par les grandes cultures les successions culturales et des éléments du paysages sont de bons proxy des émissions d'azote vers l'eau,
- alors que dans les régions d'élevage, des données supplémentaires sur les systèmes de culture sont indispensable pour les prédire.

ESCAPADE



George Abitbol

Merci de votre attention





ESCAPADE

Modélisation territoriale atmosphérique sur typologies et changement d'échelle

Niramson AZOUZ<sup>1</sup>, Jean-Louis DROUET<sup>1</sup>, Matthias BEEKMANN<sup>2</sup>, Pierre CELLIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INRA-AgroParisTech UMR ECOSYS, Thiverval-Grignon, France <sup>2</sup>UMR CNRS/UPEC/UPD LISA, Créteil, France

Paris 23/06/2017



## Plan



- Contexte et objectifs
- Méthodologie
  - Devenir atmosphérique des polluants azotés (dont  $\text{NH}_3$ )
  - Modèles de dispersion, transfert et dépôt atmosphérique
- Comparaison entre modèles sites et territoires
  - Effet de la résolution spatiale
  - Impacts sur les dépassements de charges critiques en  $\text{NH}_3$
- Utilisation des typologies paysagères
- Conclusion et perspectives



## Contexte et objectifs



- Evaluation des pertes d'azote (dépôts atmosphériques d' $\text{NH}_3$ ) à l'échelle d'un paysage agricole
- Adaptation des typologies paysagères et utilisation en données d'entrées des modèles atmosphériques
- Propositions d'amélioration de l'utilisation des typologies

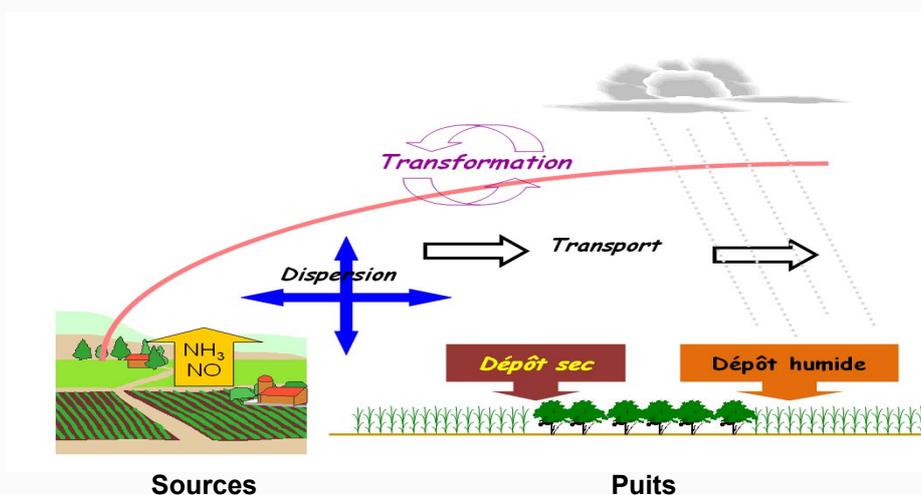


Sain affecté  
(lichen)

Modification de la biodiversité suite à un dépôt important de  $\text{NH}_3$  (ENA, 2011)

ESCAPADE

## Devenir atmosphérique des polluants azotés



ESCAPADE

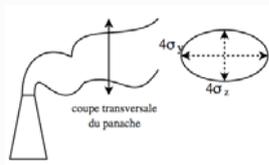
## Modèles de dispersion, transfert et dépôt atmosphérique



Panache gaussien

### OPS-ST

(Sauter et al., 2015)

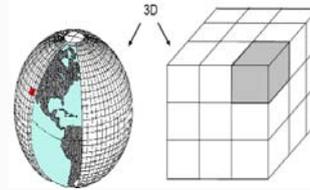


**Échelle locale (sites instrumentés)**  
(quelques dizaines de mètres)

- Turbulence homogène
- Diffusivité turbulente perpendiculaire à la direction du vent

### CHIMERE

(Menut et al., 2014)



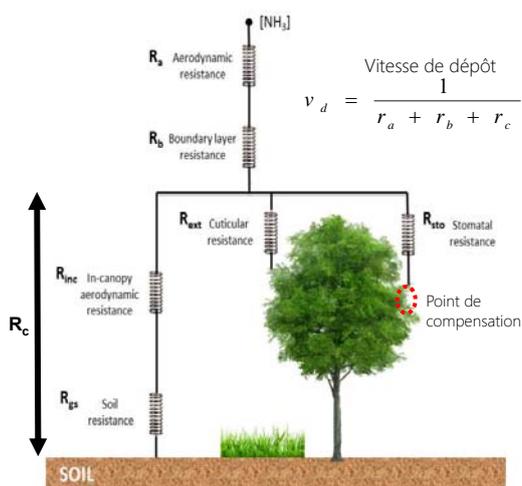
Boîtes eulériennes

**Échelle régionale (territoires englobants)**  
(quelques km à quelques dizaines de km)

- Équation turbulente d'advection-diffusion-réaction
- Equation de conservation de la masse

ESCAPADE

## Modélisation des dépôts secs



Dépôt de composés gazeux et de particules dû à :

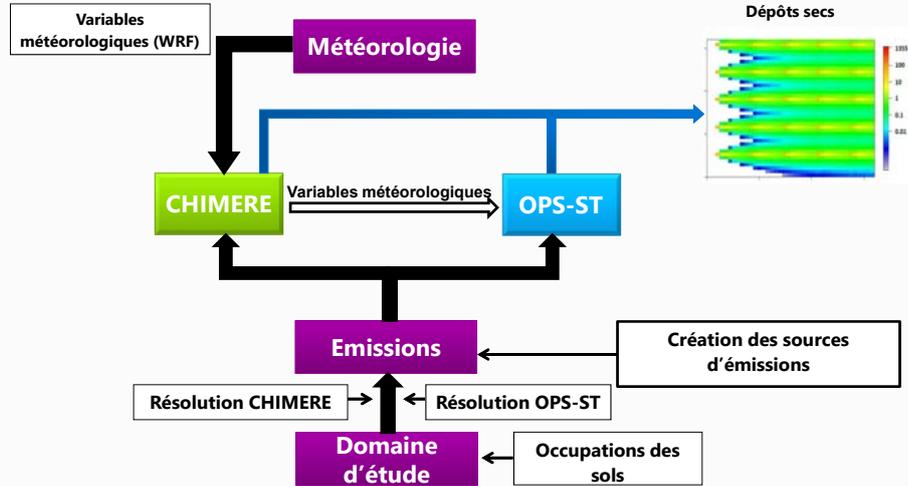
- Sédimentation sur les surfaces externes
- Absorption stomatique avec des interactions avec le métabolisme de la plante
- Adsorption par la cuticule des plantes

Dépôt dépend de :

- Structure du couvert végétal (hauteur, LAI, taille des feuilles...)
- Fonctionnement du couvert (état phénologique, conductance stomatique...)
- Conditions météorologiques

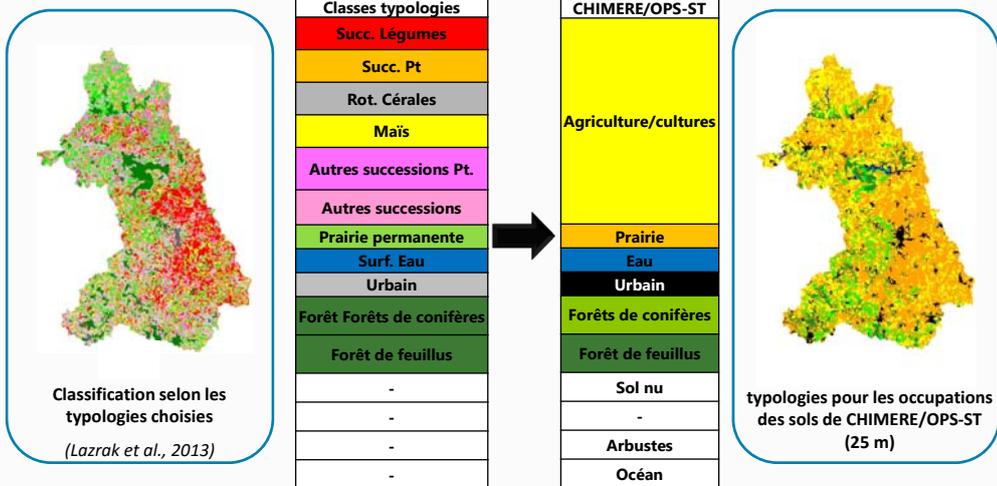
ESCAPADE

## Méthode de comparaison du comportement des modèles



ESCAPADE

## Adaptation des typologies paysagères au modèle de dépôt

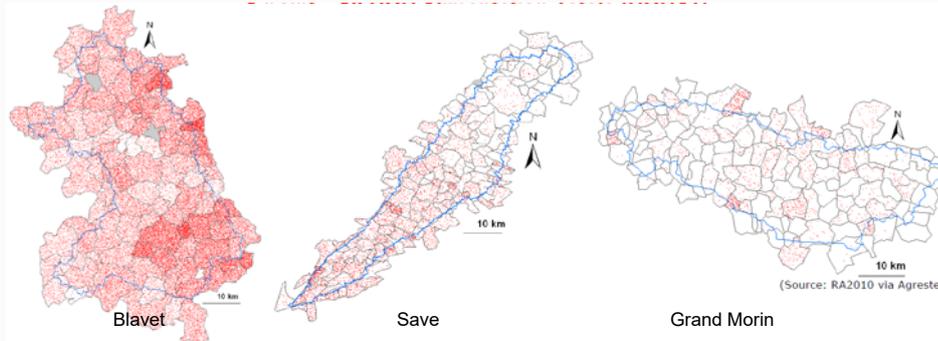


ESCAPADE

## Émissions ponctuelles par les bâtiments d'élevage



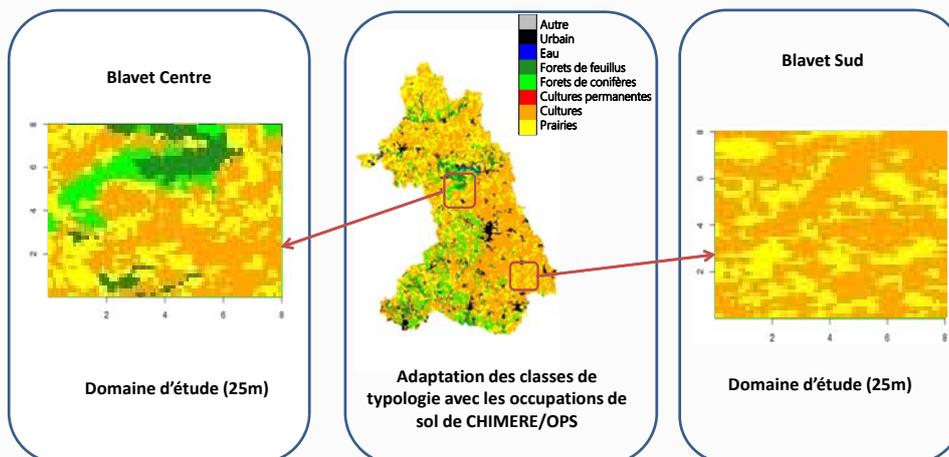
Distribution du cheptel en densité de points par ha de SAU par commune  
(1 point = 10 UGB Alimentation Totale (UGBAT))



- Carte spatialisée des sources d'émissions ponctuelles (bâtiments d'élevage)
- Position des sources (fermes)

ESCAPADE

## Adaptation des typologies paysagères



ESCAPADE

## Dépôts secs de NH<sub>3</sub> et résolution spatiale

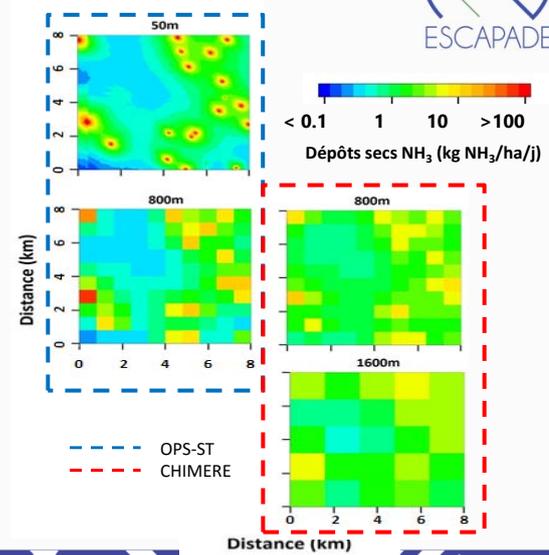


- Variations spatiales des dépôts secs de NH<sub>3</sub> en fonction de la résolution spatiale et du type de modèle
- Dilution des pics plus prononcée dans CHIMERE

Dépôt moyen sur le domaine

Résolution (m)	25	....	800	1600
OPS-ST	3.24	....	3.24	3.24
CHIMERE	-	....	3.22	3.15

g NH<sub>3</sub>/ha/j

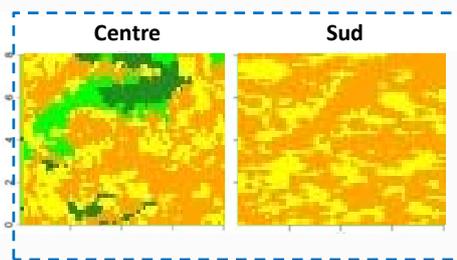


ESCAPADE

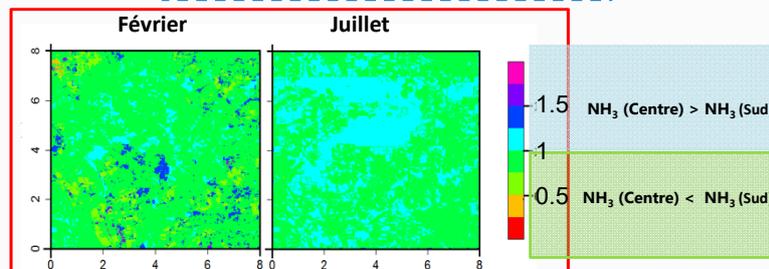
## Effet de l'occupation des sols sur les dépôts secs de NH<sub>3</sub> (1)



- Différences de dépôts entre les domaines Centre et Sud
- Différences de dépôts variables en fonction de la période de l'année



Rapport dépôts  
NH<sub>3</sub> (Centre) / NH<sub>3</sub> (Sud)

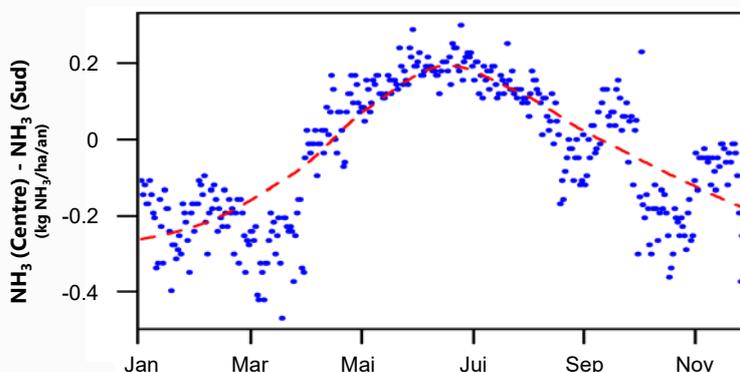


ESCAPADE

## Effet de l'occupation des sols sur les dépôts secs de $\text{NH}_3$ (2)



- Différence de dépôts faible entre les deux domaines (Centre et Sud)
- Différence de plus en plus faible en fonction des jours
- Effet du développement du couvert végétal



ESCAPADE

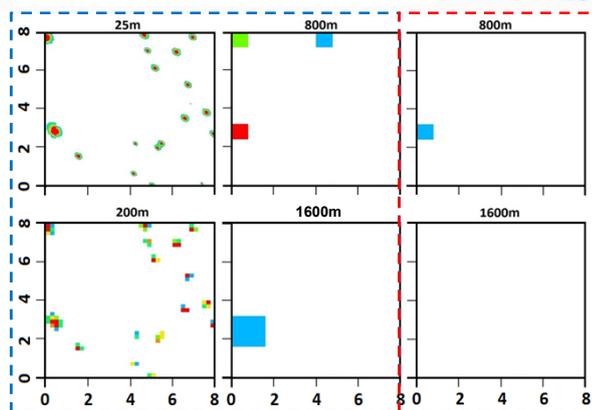
## Evaluation des dépassements de charges critiques en $\text{NH}_3$



- OPS-ST : différence faible entre les fortes résolutions spatiales
- CHIMERE :
  - sous-estime les pics de dépôts
  - ne détecte pas toutes les zones de dépassement des charges critiques pour des résolutions grossières

Un seuil plus élevé peut modifier les cartes selon le modèle utilisé

Charge critique 10 kg N ha/j



ESCAPADE

## Utilisation des typologies paysagères et de la modélisation pour l'évaluation des pertes de NH<sub>3</sub> et des dépassements de charges critiques



**Blavet**  
2029 km<sup>2</sup>

- Prairies temp. 20%
- Mais 16%
- Blé tendre 11%
- Forêt 7%
- Légumes 4% (8116 ha)
- Orge 3%
- Prairies perm. 2.5%
- Colza 1%
- Urbain 1%



**Grand-Morin**  
1200 km<sup>2</sup>

- Blé tendre 32%
- Forêt 16%
- Mais 7%
- Colza 7%
- Orge 7%
- Protéagineux 6%
- Urbain 4%
- Prairies perm. 2%
- Betterave 1%
- Prairies temp. 1%



**Save**  
1115 km<sup>2</sup>

- Prairies temp. 17%
- Tournesol 14%
- Blé tendre 13%
- Forêt 7%
- Mais 6%
- Prairies perm. 6%
- Orge 3%
- Colza 2%
- Vergers 2%
- Urbain 2%

**Support de dépôt (classes d'occupations du sol)**  
**Sources des émissions (sources diffuses et pratiques agricoles)**

ESCAPADE

## Conclusions et perspectives



- Effet de la résolution spatiale des données d'entrées  
(e.g. agrégation des occupations du sol)
- Impact sur les dépassements de charges critiques en NH<sub>3</sub>
- Finalités de l'utilisation des typologies
  - Grandes tendances (échelles annuelles)
  - Échelle locale (variations horaire à journalière)
- Les typologies peuvent-elles fournir des informations sur les sources et puits de NH<sub>3</sub> pour chaque type de modèle ?
- Nouvelles paramétrisations des surfaces (résistances...) ?

ESCAPADE



23 juin 2017



**Modélisation de la cascade de l'azote à l'échelle des territoires:  
Evaluation des pertes, des transferts et des rétentions d'azote;  
Exploration de scénarios de modifications paysagères**

Gilles Billen, Antsiva Ramarson, Josette Garnier, Sabine Sauvage, Françoise Vertes

ESCAPADE

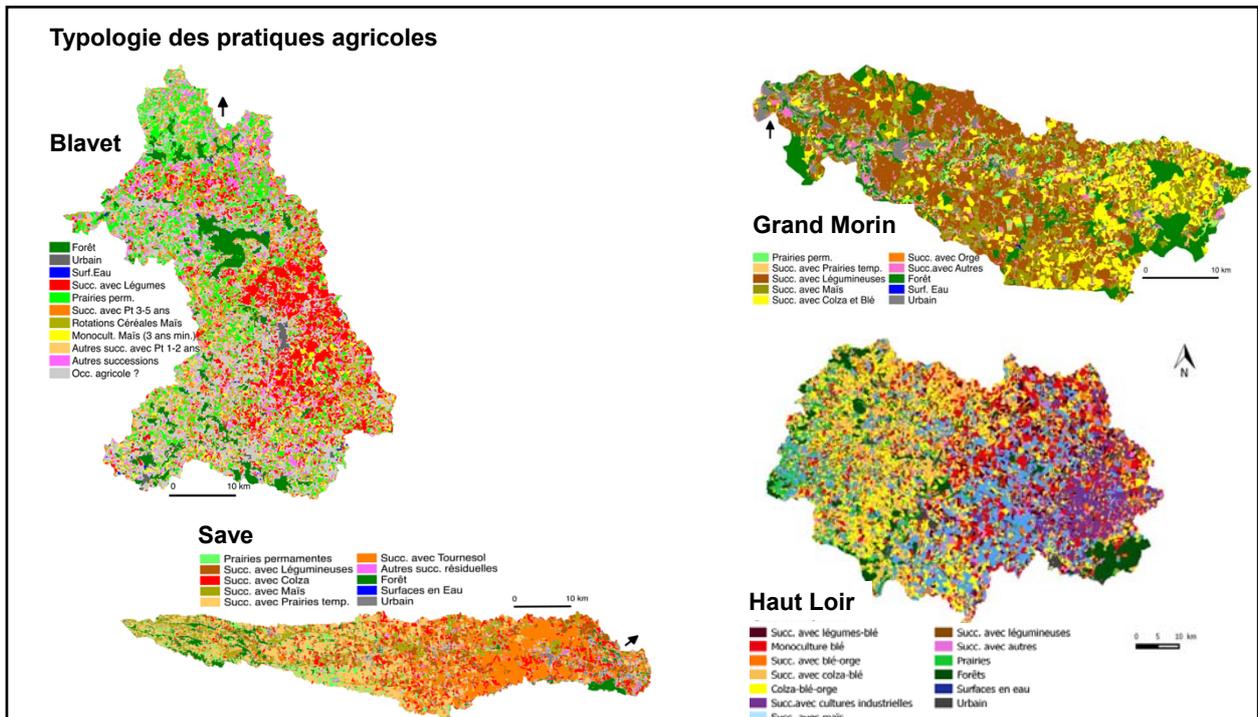
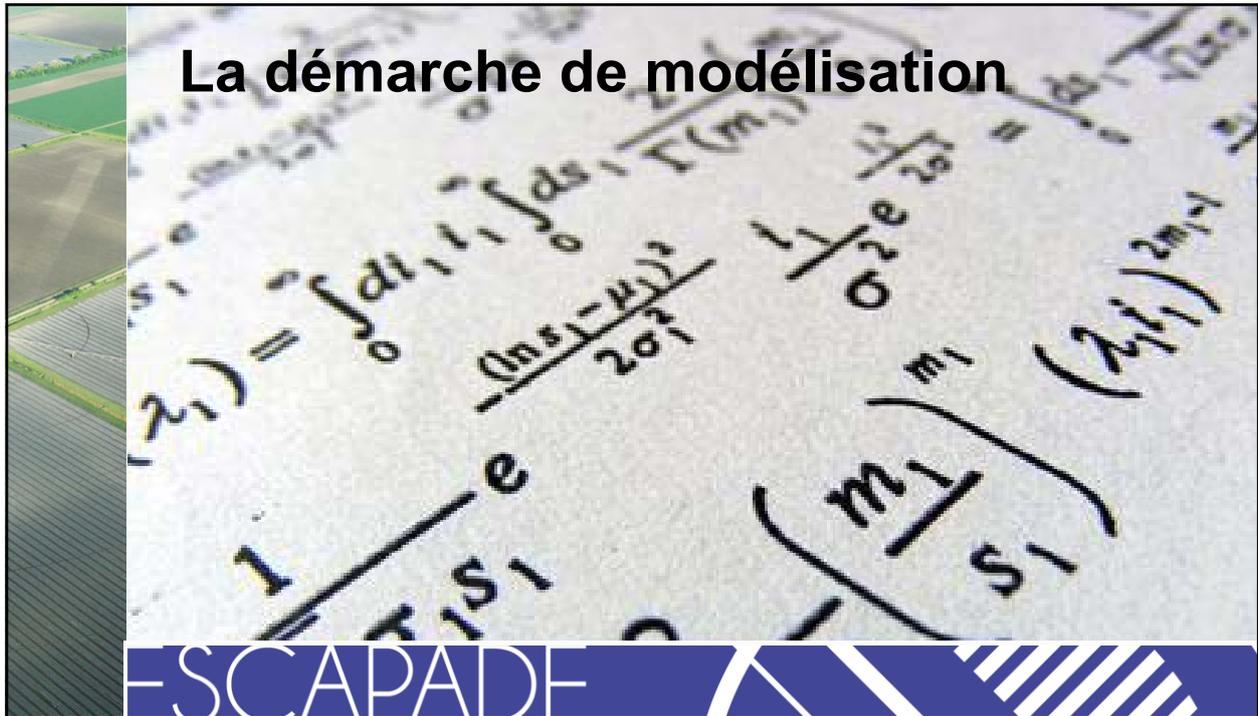
**La question d'ESCAPADE:**

Que peut-on attendre de la gestion paysagère comme stratégie territoriale pour le contrôle de la cascade de l'azote initiée par les pertes environnementales de l'agriculture?

L'apport de la démarche de modélisation à cette question:

1. Les modèles à l'échelle territoriale, après validation, permettent d'évaluer les émissions et les 'rétentions' d'azote tout au long du continuum champ-rivière.
2. L'exploration de scénarios permet de comparer l'effet des leviers mobilisables sur les pratiques agricoles et sur le paysage.

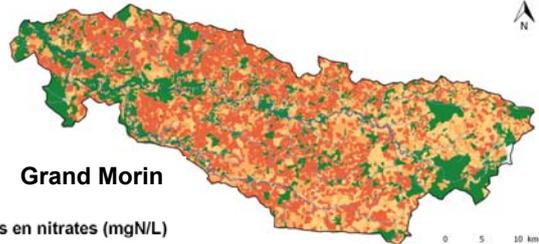
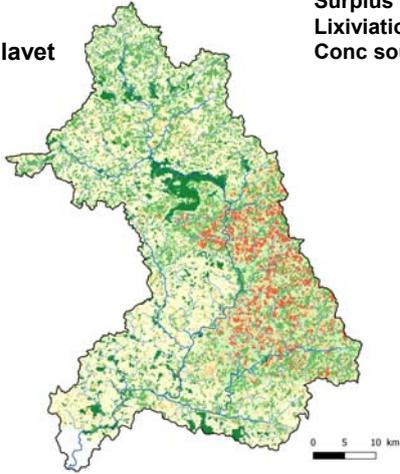
ESCAPADE



## Des pratiques agricoles aux concentrations sous-racinaires

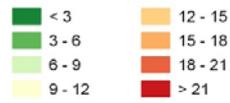
**Bilan N sol** (à partir des ITK et des rendements)  
**Surplus** (intégré sur le cycle de la rotation)  
**Lixiviation** (compte tenu des intercultures)  
**Conc sous-racinaire** (compte tenu de la lame d'eau moyenne infiltrée)

Blavet

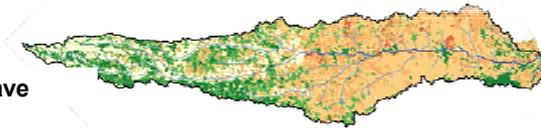


Grand Morin

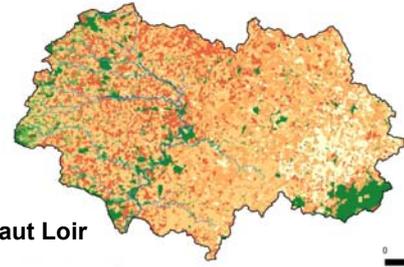
Concentrations sous-racinaires en nitrates (mgN/L)



Save

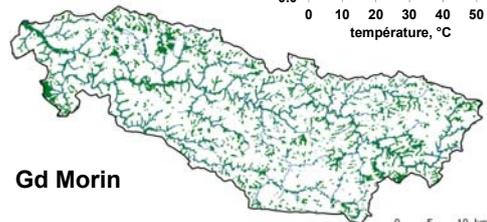
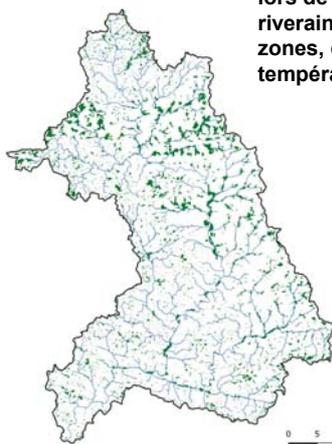
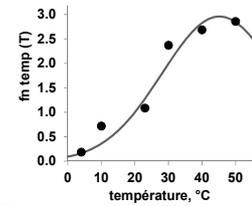


Haut Loir



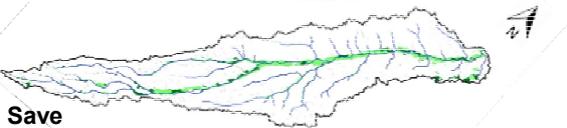
## Transfert à l'interface bassin versant-rivière: la rétention riparienne

Les flux de nitrates issus du bassin versant sont éliminés lors de leur passage à travers les zones humides riveraines à hauteur du potentiel de dénitrification de ces zones, dépendant de leur extension spatiale et de la température

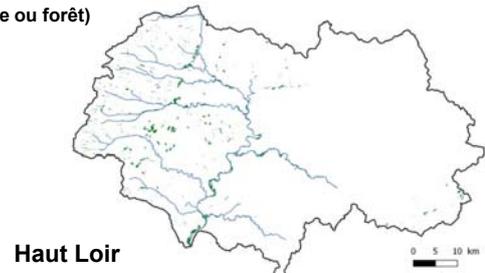


Gd Morin

■ Zones riparienne actives  
(MPH++/+++ occupée par prairie ou forêt)

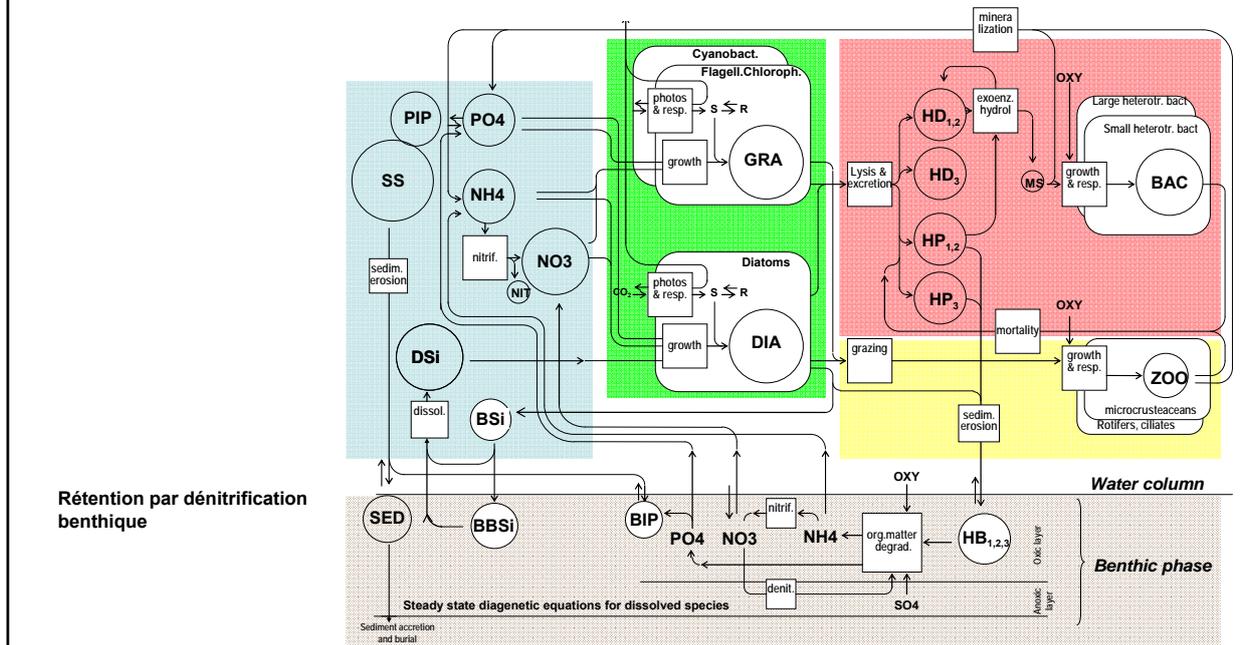


Save



Haut Loir

## Transfert dans le réseau hydrographique: la rétention in-stream



Rétention par dénitrification benthique

Steady state diagenetic equations for dissolved species

Sediment accretion and burial

## 1. Vérification des modèles et évaluation des flux d'émission, de rétention et de transfert

APPROVED  
OK  
APPROVED

ESCAPADE

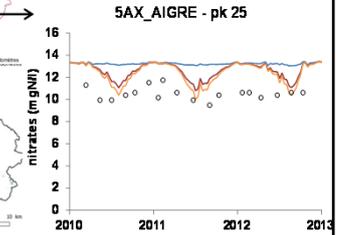
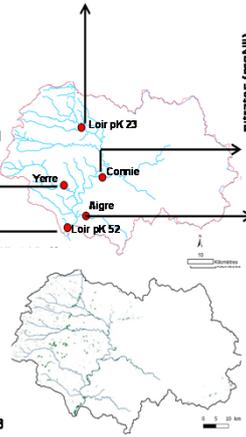
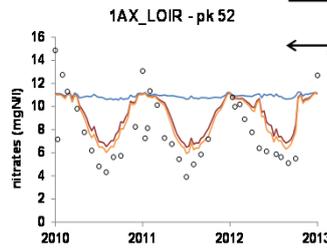
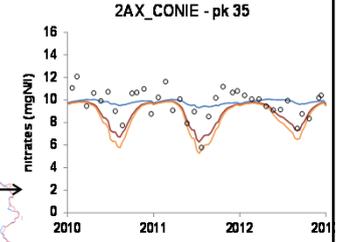
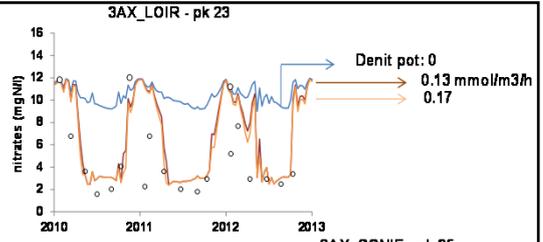
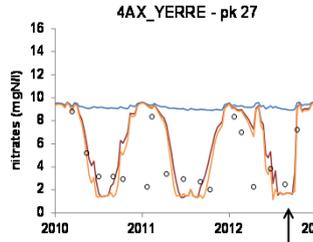
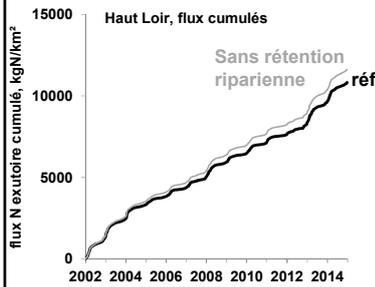
## Vérification sur les chroniques de concentration

### Cas du Haut Loir (3590 km<sup>2</sup>)

Fort contraste entre les parties Est et Ouest du bassin bien rendu par le modèle



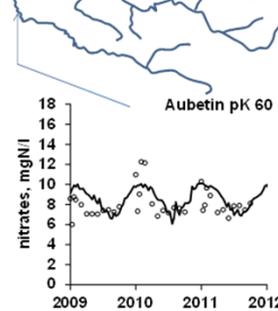
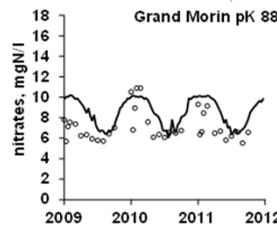
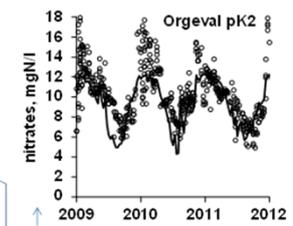
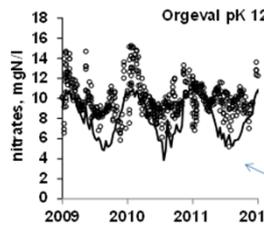
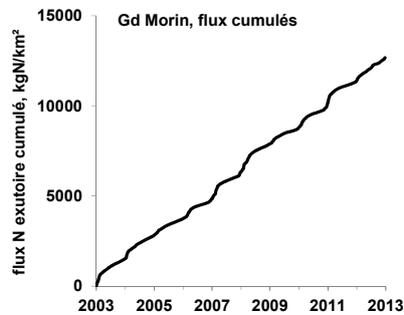
Référence: 30 kgN/haSAU/an

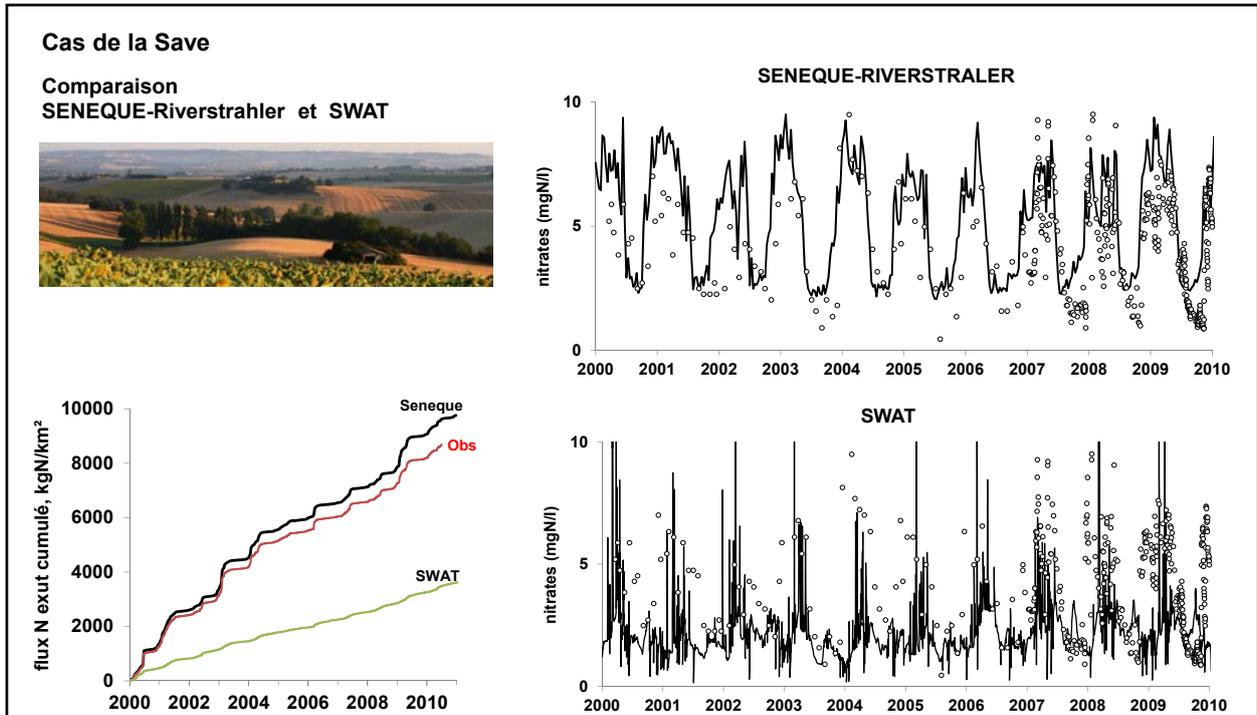
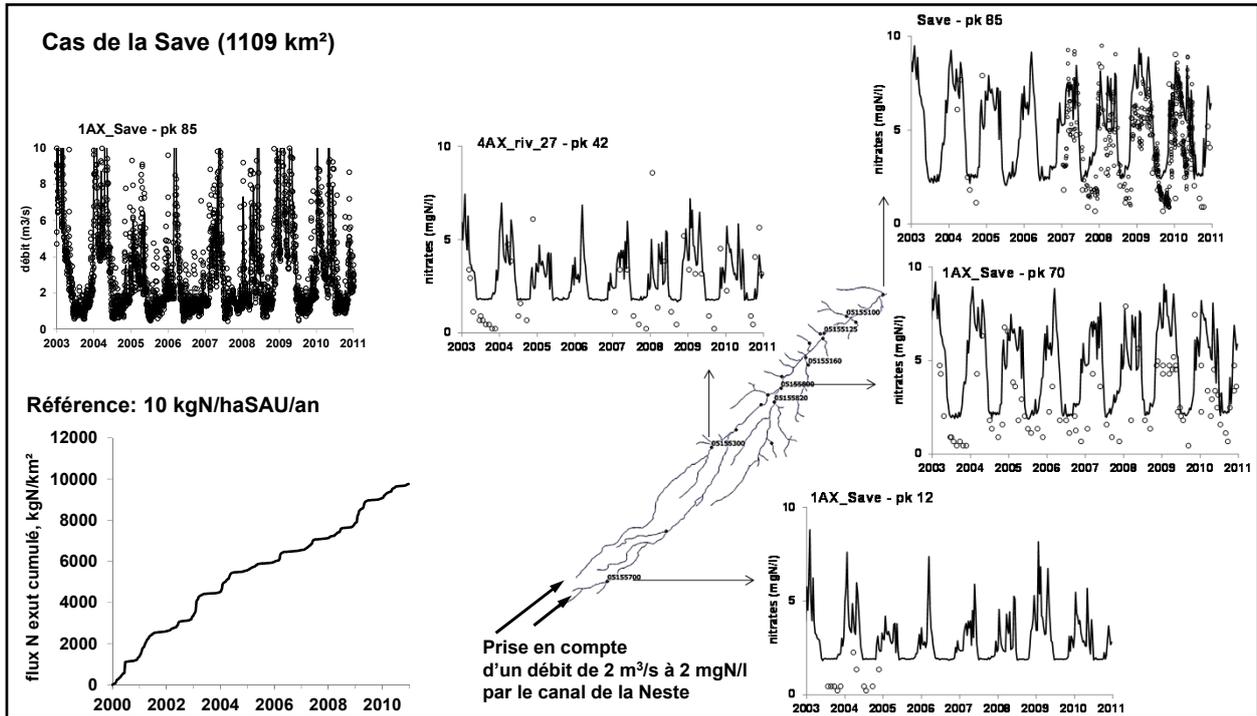


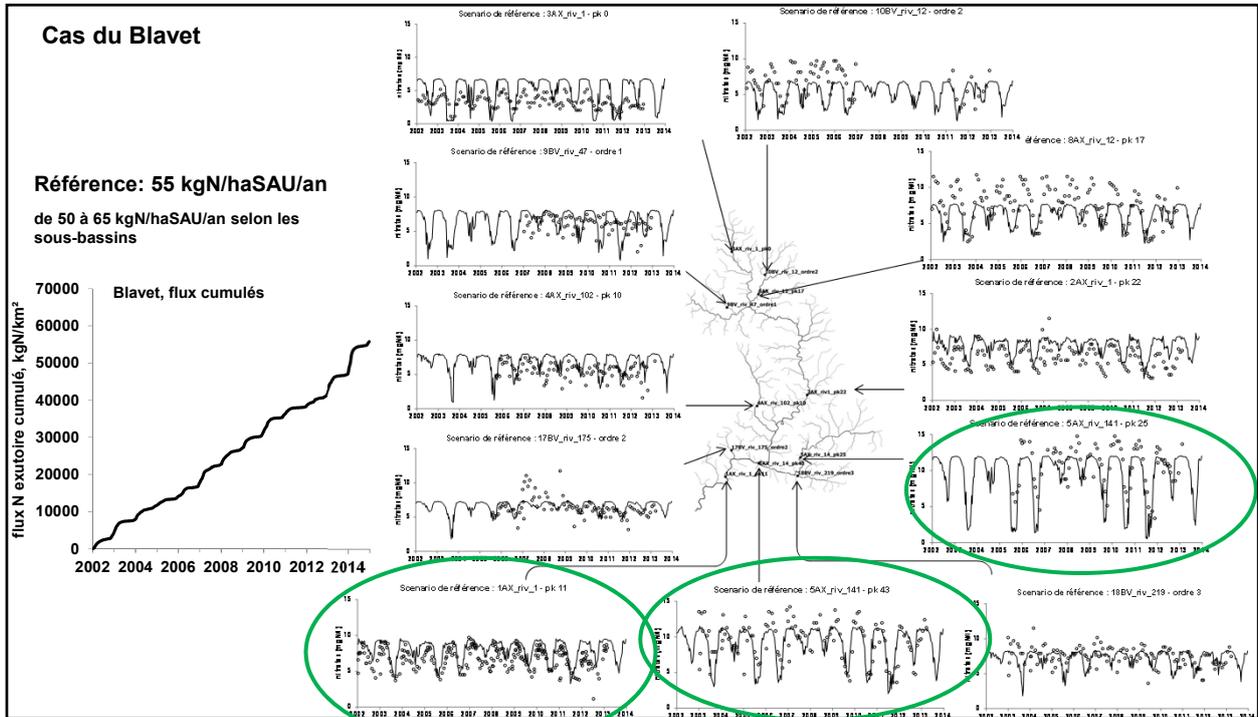
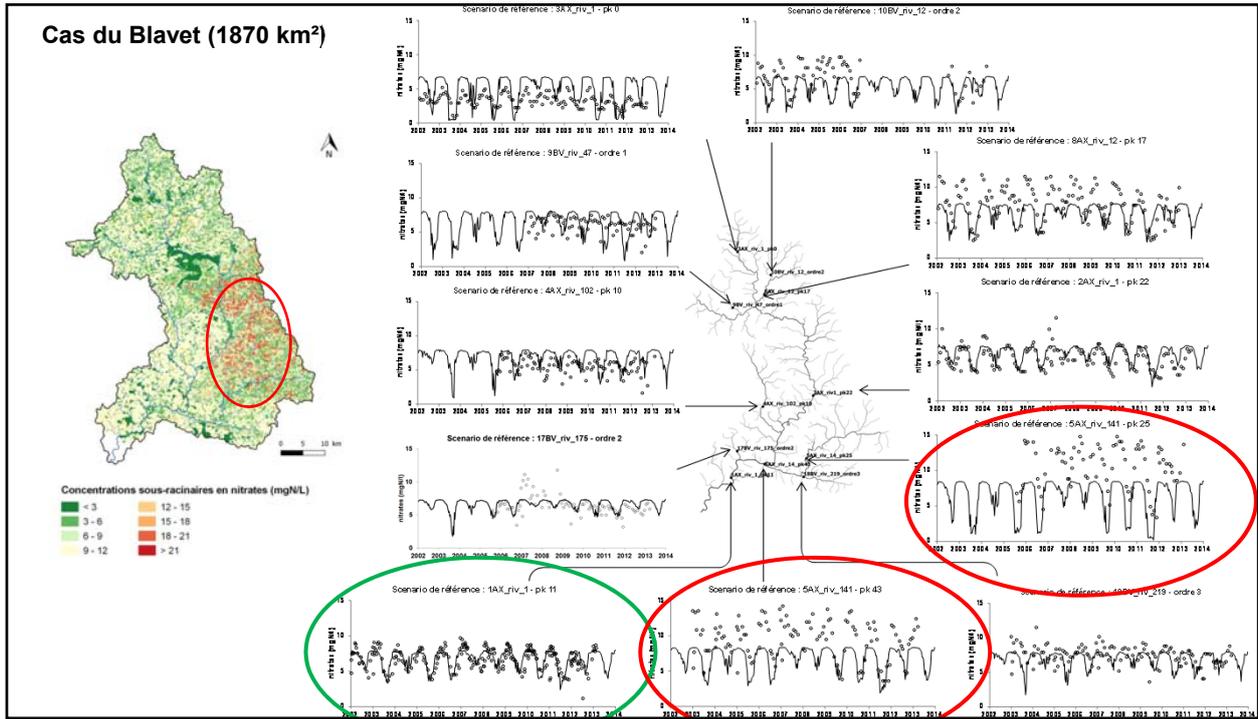
### Cas du Grand Morin (1203 km<sup>2</sup>)



Référence: 17 kgN/haSAU/an







## 2. Exploration de scénarios



ESCAPADE

### 1. Scénario 'zéro agriculture'

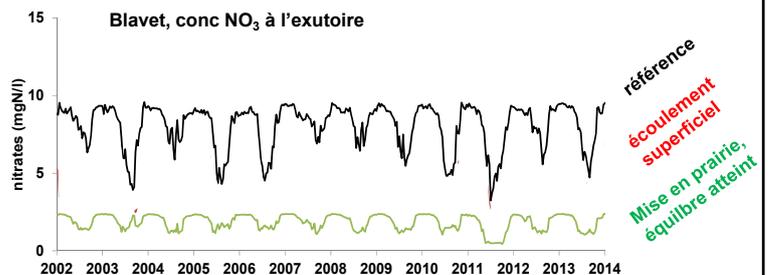
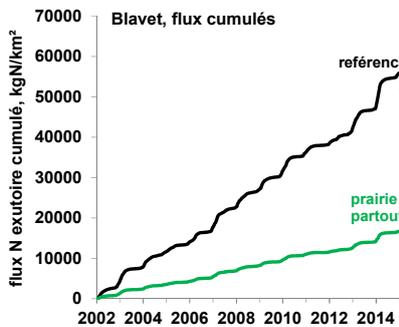
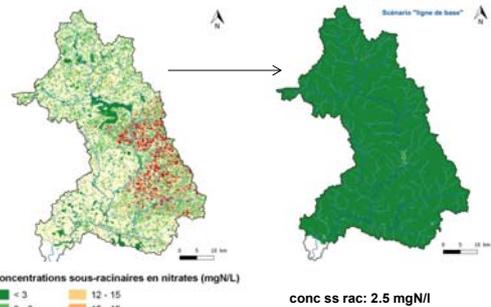
(prairies fauchées non fertilisées sur toute la SAU)

Cas du Blavet

Référence: 50 kgN/haSAU/an

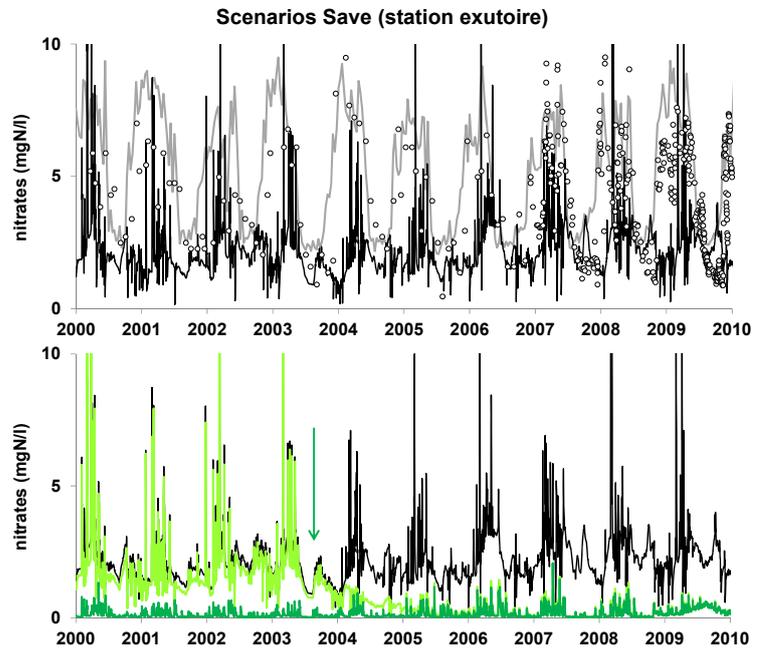
Ligne de base: 15

Export SAU exutoire: 35



**Le Modèle SWAT permet le calcul de la transition vers le nouvel équilibre**

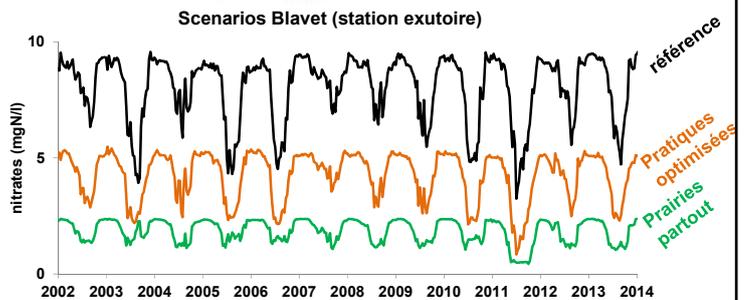
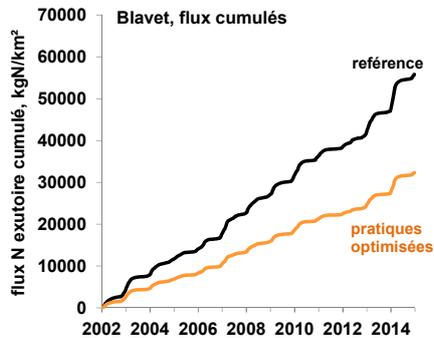
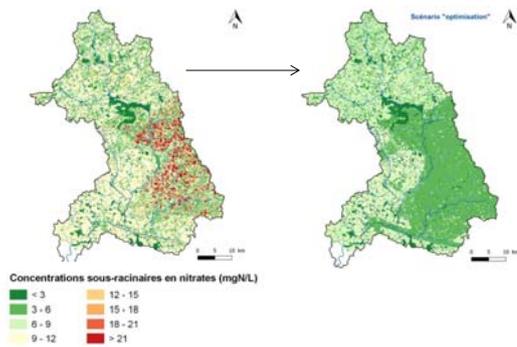
**Cas de la Save**



**2. Scénario 'pratiques optimisées'**

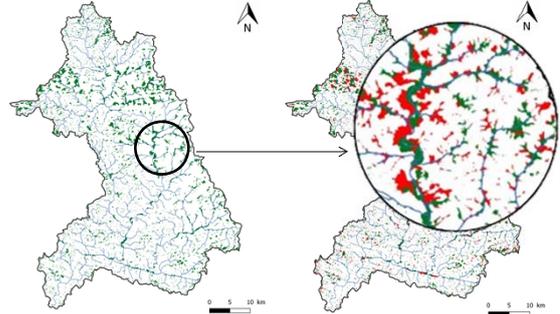
Cas du Blavet: Pour les différentes rotations, on généralise les performances moyennes des 50% meilleurs itinéraires observés

Référence: 50.1 kgN/haSAU/an  
 Pratiques optimisées: 29.6  
 Optimisation : 20.5 kgN/haSAU/an



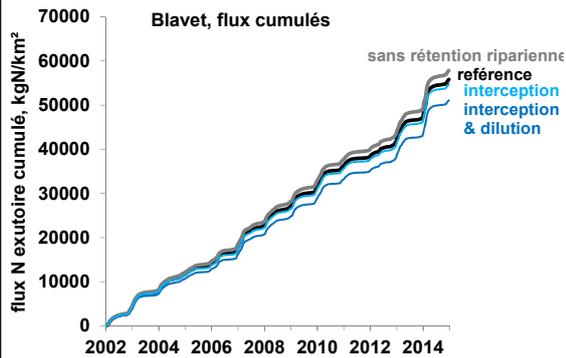
### 3. Scénario 'interception' par les zones humides riveraines

Cas du Blavet (1870 km<sup>2</sup>): Les terres arables en zones humides (MPH++/+++) sont soustraites à l'agriculture

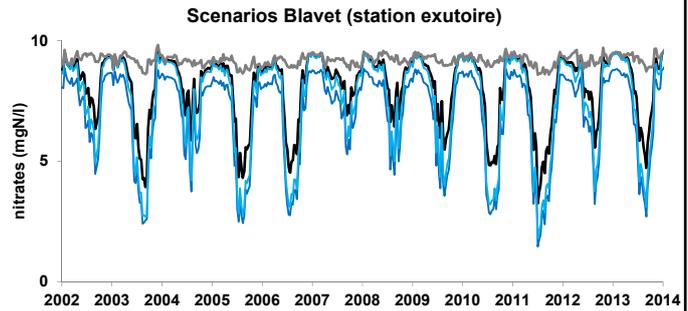


Rétention 12 kgN/ha zhr/an

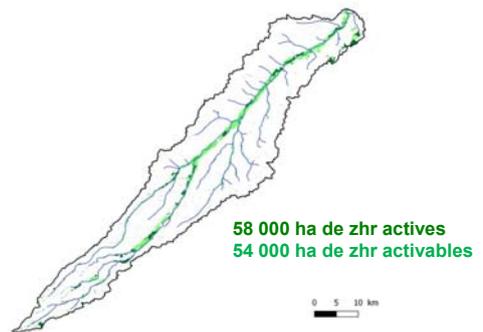
de 11 à 16 kgN/haSAU/an selon les sous-bassins



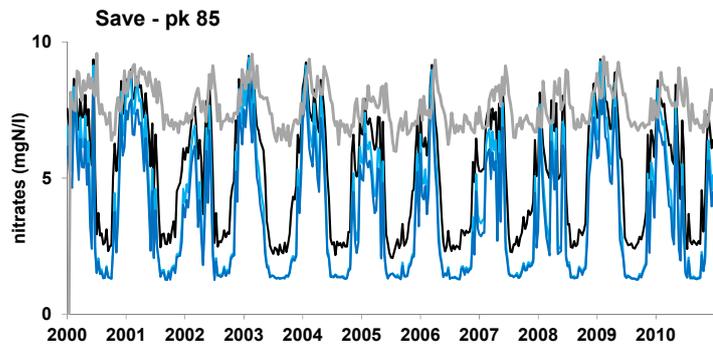
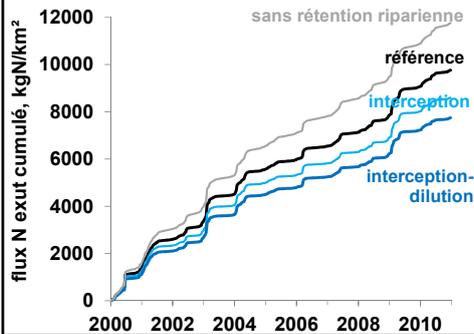
26 500 ha de zhr + 15 000 ha de zhr



#### Cas de la Save

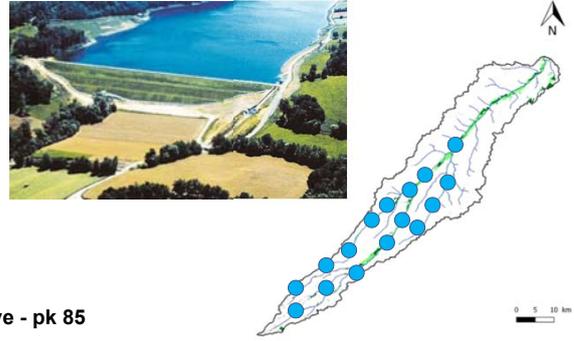


Rétention de 21 kgN/ha zhr/an

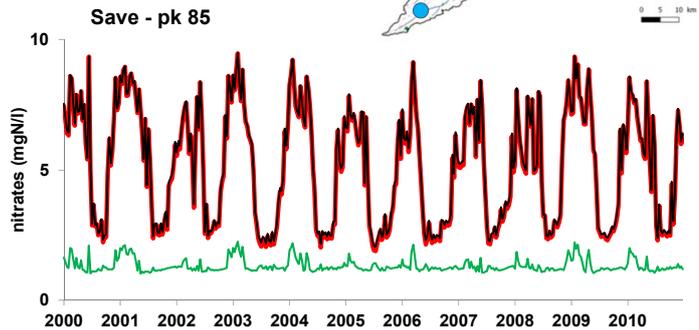
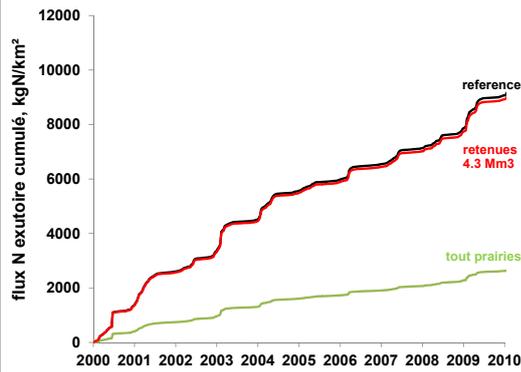


## 4. Scénario 'interception' par les retenues collinaires

Cas de la Save: création de 16 retenues collinaires sur les cours d'eau d'ordre 2, totalisant une surface de 144 ha et un volume de 4.3 Mm<sup>3</sup> (cf barrage de Sivens).

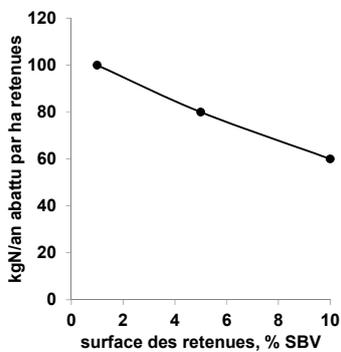
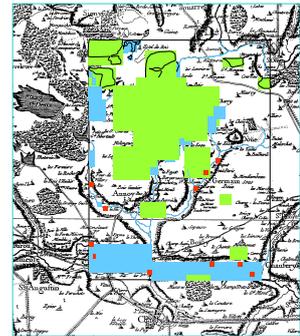


Retention: 108 kgN/ ha retenue / an



Cas du Grand Morin:  
Mares tampons à l'exutoire des collecteurs de drains  
Recréation d'étangs anciens

Retention: 60 à 100 kgN/ ha retenue / an



Garnier et al, 2014 (JEMA)



Aulnay (77), bassin tampon alimenté par un collecteur de drain agricole.

# Conclusion



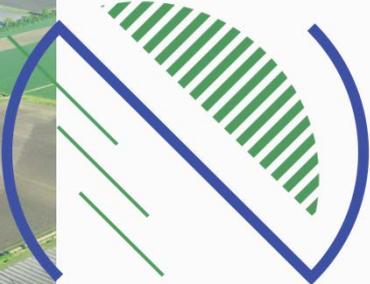
ESCAPADE

## Quantification comparée de l'effet des éléments paysagers en kgN/ha/an

		Blavet	Ht Loir	Gd Morin	Save
<b>Export net référence</b>	kgN/ha <sub>SAU</sub> /an	<b>50-65</b>	<b>30</b>	<b>17</b>	<b>10</b>
Export de base (prairie sans fertil)	kgN/ha <sub>SAU</sub> /an	15	3		2.8
<b>Optimisation des pratiques</b>	kgN/ha <sub>SAU</sub> /an	<b>20</b>	-	<b>8</b>	-
<b>Interception zone humide riveraine</b>	kgN/ha <sub>zhr</sub> /an	<b>11-16</b>	<b>33</b>		<b>21</b>
<b>Retenues collinaires</b>	kgN/ha <sub>en-eau</sub> /an	-	-	<b>60-100</b>	<b>108</b>

La réduction à la source par optimisation des pratiques est de loin le levier le plus efficace lorsqu'il peut s'exercer sur de grandes surfaces !

Mais la mise hors agriculture des surfaces cultivées en bordure de rivière (typiquement 10% de la SAU) offre, par ha de surface concernée, non seulement un effet de diminution des émissions, mais aussi un potentiel d'atténuation d'un ordre de grandeur au moins équivalent.



**ESCAPADE**  
<http://www.n-escapade.fr/>

**Partenaires**

- ECOSYS, INRA-AgroParisTech, Grignon
- SAS, INRA-AgroCampus, Rennes
- ASTER, INRA, Mirecourt
- SOLS, INRA, Orléans
- MalAGE, INRA, Jouy-en Josas
- PEGASE, INRA-AgroCampus, Rennes
- FIRE : METIS, UPMC-CNRS, Paris
- IRSTEA, Antony
- MinesParisTech, Fontainebleau
- ECOLAB, CNRS-UPS-INPT, Toulouse
- ARVALIS-Institut du Végétal, Boigneville
- TERRENA, Angers
- TRISKALIA, Landerneau

**Sous-contractants**

- INRA-Transfert, Paris
- CERFACS, Toulouse
- LISIC, Calais
- BEF, INRA, Nancy
- BIA, INRA, Toulouse
- CESBIO, Toulouse
- LISA, CNRS-UP7-UP12, Créteil
- Terres Inovia, Grignon

Discussion générale

ANR  
ANR-12-AGRO-0003

Séminaire de clôture – 23 juin 2017 – Paris




**Discussion générale : de nombreux apports...**

➤ **Apports**

- ✓ **Avancées conceptuelles, scientifiques et méthodologiques**
  - co-construction de **scénarios** (réels / alternatifs)
  - échantillonnage des **données**, base de données « paysage »
  - formalisation des processus, **modélisation** intégrée, analyse de sensibilité
  - connaissance de la **cascade N, interactions spatiales, émissions indirectes**
  - **quantification des flux d’N** en conditions agro-pédo-climatiques contrastées (réelles et alternatives)
  - **changement d’échelle** sites ↔ territoires
- ✓ **Synergies interdisciplinaires et inter-instituts** sur la cascade N dans les paysages

➤ **Ruptures**

- ✓ **Paysage** : objet intégrateur - interdisciplinaire - pluripartenaires pour mieux gérer l’N dans les territoires
- ✓ **Interactions spatiales** entre éléments paysagers → sensibilisation des acteurs du développement et coopératives
- ✓ **Emissions indirectes** de GES (N<sub>2</sub>O) et de polluants (NO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>) dans des zones peu anthropisées après émissions directes par les bâtiments d’élevage et les parcelles cultivées puis transferts par voie hydrologique et/ou atmosphérique
- ✓ **Changement d’échelle** sites ↔ territoires

**ESCAPADE**

## ... qui soulèvent de nouvelles questions



### ➤ **Verrous, questions émergentes, perspectives pour mieux gérer l'N et les paysages**

- ✓ Définir des **échelles spatiales** (et temporelles) pertinentes ? **Indicateurs** de performance ?
- ✓ Hiérarchiser les **leviers d'action** ?
- ✓ Améliorer les **outils développés** :
  - **scénarios** : construction / évaluation
  - **modèles** : développement / initialisation / paramétrisation / évaluation
  - **données** : collecte / échantillonnage spatio-temporel (analyse de sensibilité des modèles)
- ✓ Identifier les **processus pertinents** et combler les trous de connaissances
- ✓ Mieux évaluer les **émissions indirectes aval**
- ✓ Intégrer plus fortement les **cycles biogéochimiques** (air, eaux, sols, plantes, anthropie)
- ✓ Poursuivre le **changement d'échelle** site ↔ territoire (scénarios, données, modèles)
- ✓ Coupler les approches agro-environnementales (Escapade) aux **approches socio-économiques**
- ✓ Quantifier l'impact du **changement climatique**
- ✓ **Transférer les résultats** de recherche (et outils ?) vers acteurs du développement et économiques, agriculteurs

} Analyser les **incertitudes**

### ➤ **Impacts scientifique et sociétal**

- ✓ Aider à construire les futures **politiques d'atténuation et d'adaptation**
- ✓ Fournir des **évaluations objectives**, à partir d'outils complexes fiables, de l'impact des pratiques et des paysages
- ✓ Repenser les **aménagement paysagers** et les **organisations des activités agricoles dans les territoires**

# ESCAPADE

**Partenaires**

- ECOSYS, INRA-AgroParisTech, Grignon
- SAS, INRA-AgroCampus, Rennes
- ASTER, INRA, Mirecourt
- SOLS, INRA, Orléans
- MalAGE, INRA, Jouy-en Josas
- PEGASE, INRA-AgroCampus, Rennes
- FIRE : METIS, UPMC-CNRS, Paris
- IRSTEA, Antony
- MinesParisTech, Fontainebleau
- ECOLAB, CNRS-UPS-INPT, Toulouse
- ARVALIS-Institut du Végétal, Boigneville
- TERRENA, Angers
- TRISKALIA, Landerneau

**Sous-contractants**

- INRA-Transfert, Paris
- CERFACS, Toulouse
- LISIC, Calais
- BEF, INRA, Nancy
- BIA, INRA, Toulouse
- CESBIO, Toulouse
- LISA, CNRS-UP7-UP12, Créteil
- Terres Inovia, Grignon

**ESCAPADE**  
<http://www.n-escapade.fr/>

Clôture du projet et du séminaire



ANR-12-AGRO-0003

Séminaire de clôture – 23 juin 2017 – Paris



## Clôture du projet



### ➤ Rapport ANR

- Résumés
- Mémoire : synthèse de 5 pages
- Livrables
- Publications, valorisations
- Impacts du projet
- Echancier :
  - ✓ 1<sup>ère</sup> version envoyée au CoPil : 16 juin → Relecture par le **CoPil → 3 juillet 2017**
  - ✓ 2<sup>ème</sup> version au Copil → 6 juillet → Relecture par le **CoPil → 13 juillet**
  - ✓ Soumission à l'ANR → 17 juillet

### ➤ Relevés de dépenses à fournir par chaque partenaire

- ✓ Retour de **tous les partenaires → 3 juillet 2017**
- ✓ Finalisation → 13 juillet

### ➤ Perspectives...

- Poursuite de la valorisation : publications (soumises, en préparation, en projet), communications...
- Quelle(s) suite(s) au projet...

... vers de nouvelles **ESCAPADES ?**

# ESCAPADE

MERCI A TOUS !!



Contributeurs actifs  
(sur données, scénarios, modèles)  
Financeur (ANR) et soutien (GIS)

Responsables de tâches  
(F. Laurent, P. Durand, G. Billen, P. Cellier)  
Responsables de sites  
(C. Fléchar, C. Hénault, A. Probst, G. Tallec)  
Comité de suivi  
(G. Bellocchi, A. Chanzy, T. Eglin, D. Serça)  
Comité de pilotage

### Partenaires

ECOSYS, INRA-AgroParisTech, Grignon  
SAS, INRA-AgroCampus, Rennes  
ASTER, INRA, Mirecourt  
SOLS, INRA, Orléans  
MalAGE, INRA, Jouy-en Josas  
PEGASE, INRA-AgroCampus, Rennes  
FIRE : METIS, UPMC-CNRS, Paris  
IRSTEA, Antony  
MinesParisTech, Fontainebleau  
ECOLAB, CNRS-UPS-INPT, Toulouse  
ARVALIS-Institut du Végétal, Boigneville  
TERRENA, Angers  
TRISKALIA, Landerneau

### Sous-contractants

INRA-Transfert, Paris  
CERFACS, Toulouse  
LISIC, Calais  
BEF, INRA, Nancy  
BIA, INRA, Toulouse  
CESBIO, Toulouse  
LISA, CNRS-UP7-UP12, Créteil  
Terres Inovia, Grignon





## Liste des partenaires et des sous-contractants

### Partenaires

**ECOSYS**, INRA-AgroParisTech, Grignon

**SAS**, INRA-AgroCampus, Rennes

**ASTER**, INRA, Mirecourt

**SOLS**, INRA, Orléans

**MaIAGE**, INRA, Jouy-en Josas

**PEGASE**, INRA-AgroCampus, Rennes

**FIRE** : **METIS**, UPMC-CNRS, Paris ; **IRSTEA**, Antony ; **MinesParisTech**, Fontainebleau

**ECOLAB**, CNRS-UPS-INPT, Toulouse

**ARVALIS-Institut du Végétal**, Boigneville

**TERRENA**, Angers

**TRISKALIA**, Landerneau

### Sous-contractants

**INRA-Transfert**, Paris

**CERFACS**, Toulouse

**LISIC**, Calais

**BEF**, INRA, Nancy

**BIA**, INRA, Toulouse

**CESBIO**, Toulouse

**LISA**, CNRS-UP7-UP12, Créteil

**Terres Inovia**, Grignon





## Projet Escapade

Séminaire de clôture - 23 juin 2017

### Participants

Nom	Prénom	Organisme de rattachement
Akkal-Corfini	Nouraya	INRA SAS
Azouz	Niramson	INRA ECOSYS
Bedos	Carole	INRA ECOSYS
Benhamou	Cyril	INRA ECOSYS
Benoit	Marie	Unilasalle
Berrodier	Marc	ARVALIS
Berthou	Julie	CNRS
Billen	Gilles	CNRS/UPMC METIS
Bonaudo	Thierry	AgroParisTech
Buchheit	Pauline	Ministère de l'agriculture
Casal	Laurène	INRA SAS
Cellier	Pierre	INRA ECOSYS
Clement	Marie	Syndicat de la Vallée du Blavet
Dron	Christian	DRAAF île-de-France
Drouet	Jean-Louis	INRA ECOSYS
Dufossé	Karine	INRA ECOSYS
Durand	Patrick	INRA SAS
El akkari	Monia	INRA ECOSYS
Esnault	Baptiste	INRA ECOSYS
Eveillard	Philippe	UNIFA
Félix	Irène	ARVALIS
Flecharde	Chris	INRA SAS
Fourmond	Sébastien	TERRENA
Franqueville	Damien	INRA ECOSYS
Gagnaire	Nathalie	INRA ECOSYS
Garnier	Josette	CNRS METIS

Laurent	François	ARVALIS
Leconte	Laetitia	COMIFER
Loubet	Benjamin	INRA ECOSYS
Pasquier	Catherine	INRA SOLS
Payre Suc	Virginie	ECOLAB
Probst	Anne	CNRS ECOLAB
Ramarson	Antsiva	METIS
Schneider	Anne	Terres Inovia
Serça	Dominique	CNRS Laboratoire d'Aérodologie
Tallec	Tiphaine	CESBIO
Théry	Sylvain	FIRE
Thibault	Claire	INRA ECO-INNOV
Tournebize	Julien	IRSTEA
Trannoy	Laure	INRA TRANSFERT
Tuzet	Andrée	INRA ECOSYS
Ursache	Ovidiu	INRA SAS
Vertès	Françoise	INRA SAS