

APCA, Paris

19 septembre 2019

---

# Colloque de clôture du RMT Fertilisation & Environnement



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE  
DE L'AGRICULTURE  
ET DE  
L'ALIMENTATION



# RMT Fertilisation & Environnement

## Introduction et historique du réseau

**Mathilde Heurtaux (Acta), Sylvie Recous (INRA)**



## Pour introduire cette journée...

- Historique du réseau
- Enjeux et thématiques prioritaires
- Programme du colloque

# Historique du RMT Fertilisation & Environnement



## Qu'est-ce qu'un RMT ?

Un réseau soutenu par le MAA depuis 2007

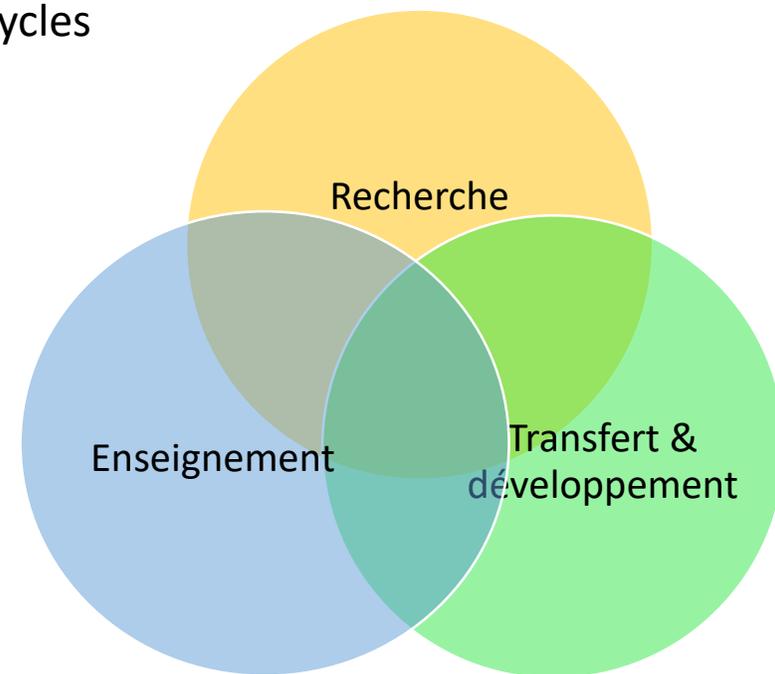
qui fédère des partenaires issus de la recherche fondamentale, finalisée et appliquée, du développement et de l'enseignement, qui

- **explorent** des nouvelles questions de recherche et modes de gestion des cycles biogéochimiques et de la fertilité des sols
- **partagent** des connaissances et références techniques et scientifiques
- **développent** des bases de données et outils en commun

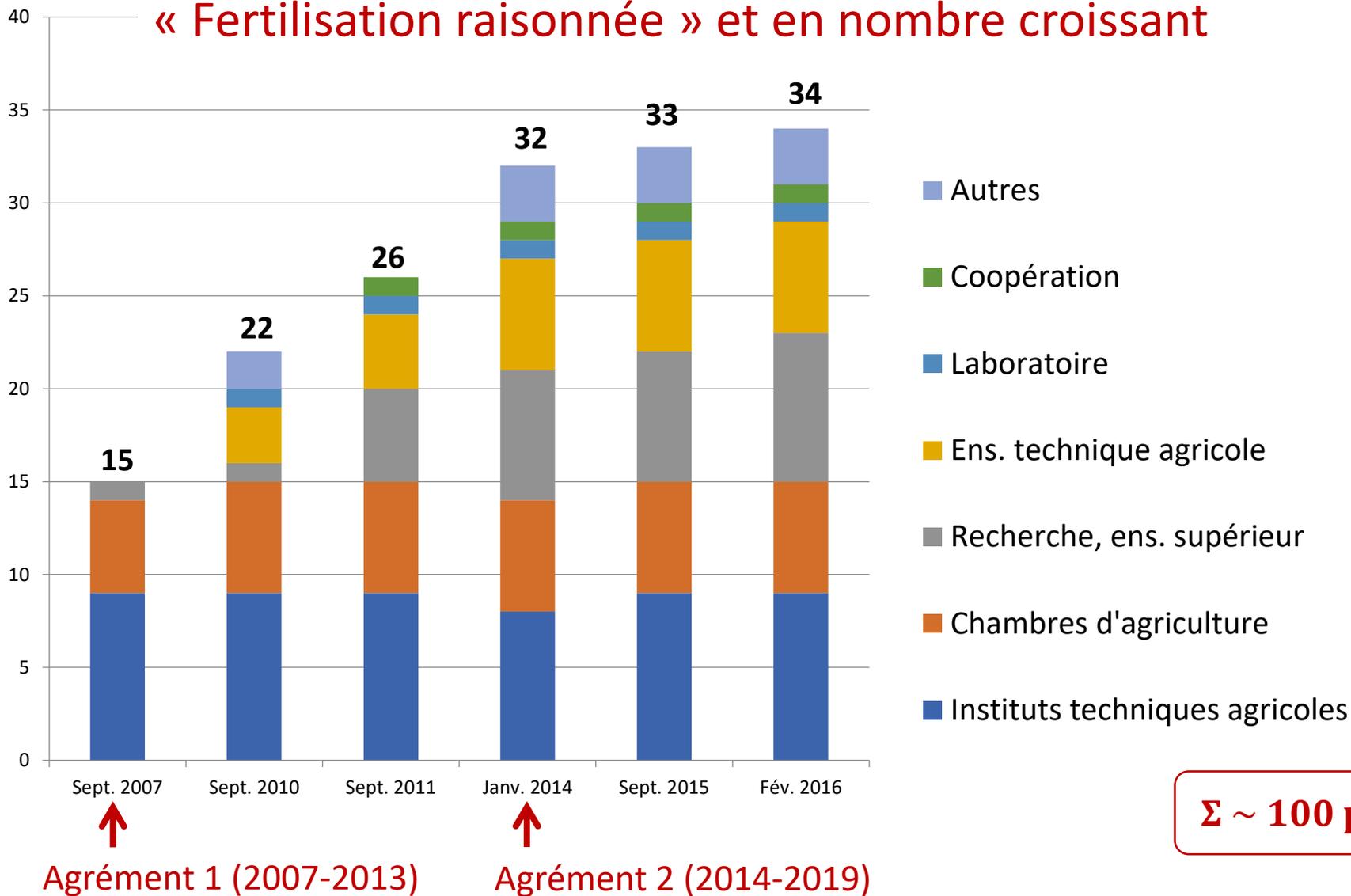
... pour répondre aux besoins des agriculteurs

**Le RMT F&E : des équipes, concepts, projets et outils mobilisés autour de la fertilisation et de la gestion des cycles biogéochimiques**

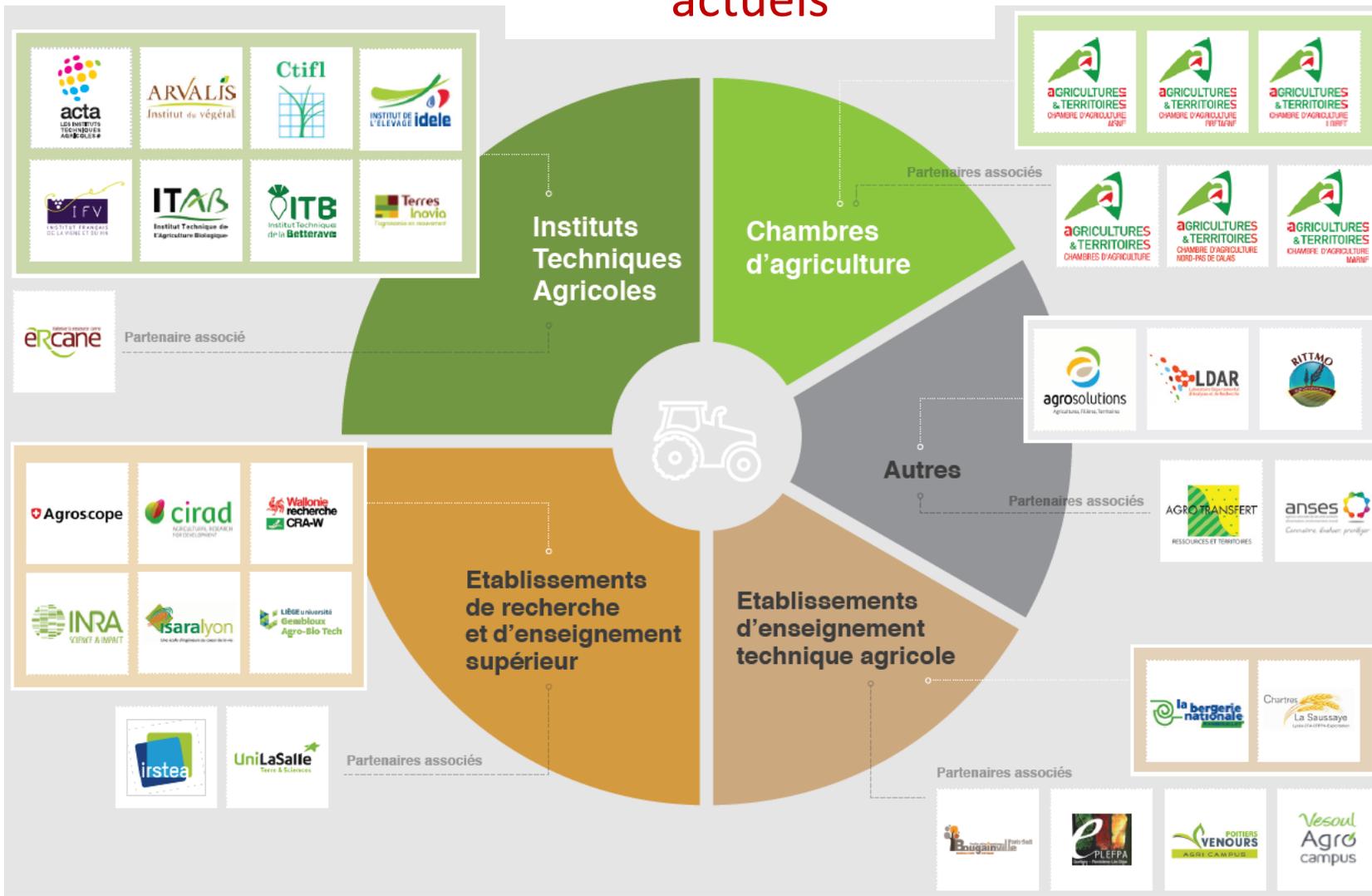
Un réseau qui favorise  
partage, consensus et vision commune



## Des partenaires variés, issus du groupement « Fertilisation raisonnée » et en nombre croissant



# Les 34 partenaires actuels



# Axes de travail et équipe d'animation

- **Animatrice générale :**  
Mathilde Heurtaux, Acta



- **Animatrice scientifique :**  
Sylvie Recous, INRA



**Axe 1 :**  
**Prospective,**  
**Veille scientifique,**  
**Stratégie européenne**

Jean-Marie Paillat, Cirad  
François Laurent, Arvalis  
Sylvie Recous, INRA



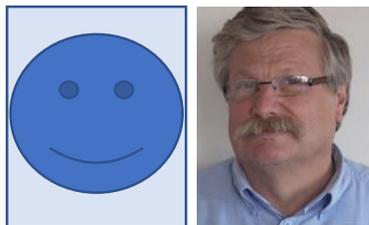
**Axe 2 :**  
**Coordination et**  
**mutualisation autour de**  
**l'acquisition de références**  
**scientifiques et techniques**

Nathalie Damay puis Fiona Obriot, LDAR  
Cécile Le Gall, Terres Inovia



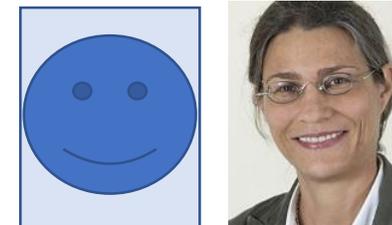
**Axe 3 :**  
**Développement et**  
**amélioration d'outils**  
**d'aide à la décision**  
**des acteurs**

Pascal Dubrulle, INRA  
Bernard Verbèque, CA Loiret



**Axe 4 :**  
**Transfert et formation**  
**vers l'enseignement et le**  
**développement,**  
**Appui aux politiques**  
**publiques**

Morgane Grimaud, EPL La Saussaye (1 an)  
Mathilde Heurtaux, Acta



## Enjeux et thématiques prioritaires



# Evolution des priorités

2007

Fertilisation des cultures, calcul de la dose N, outils (OAD, diagnostic impact environnemental)

- AzoFert®
- Régifert
- Syst'N®

2014

Fertilisation organique, recyclage des PRO

Gestion des cycles biogéochimiques et réduction des pertes vers l'envt

Elargissement des échelles (SdC, territoire)

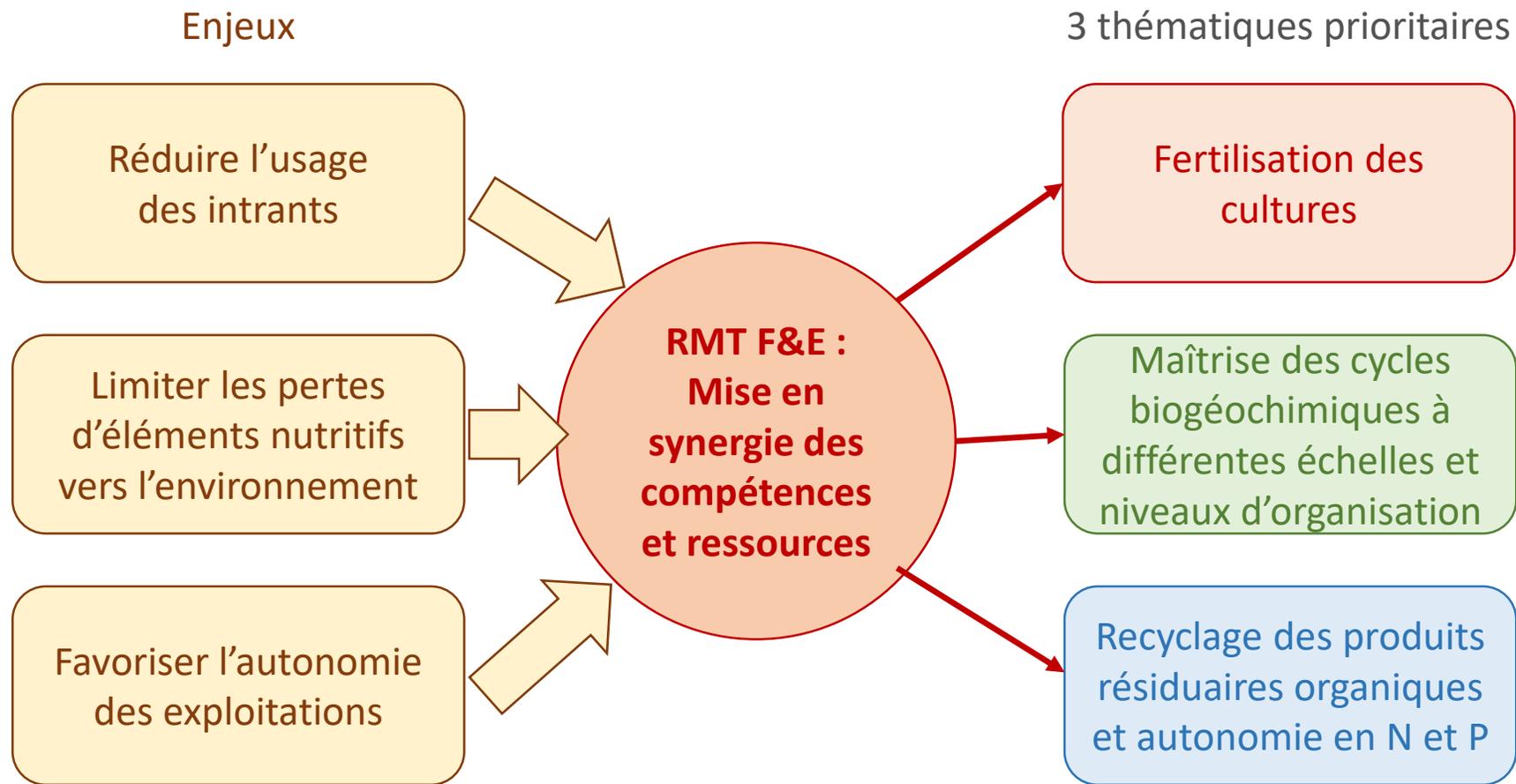
Appui aux politiques publiques (Dir. Nitrate)

2020

Nouveaux enjeux liés à l'économie circulaire

- Bioéconomie
- Préservation environnement : sols, eaux, air, biodiversité, CC
- Sécurité alimentaire
- Risques sanitaires (pacte de confiance)

# Des enjeux et des thématiques qui s'inscrivent dans la transition agroécologique



# Le programme de travail du RMT 2014-2019

**Fertilisation des cultures**  
(contexte de réduction de l'usage d'intrants et limitation des pertes d'éléments nutritifs dans l'environnement)

Efficacité de **recouvrement N et P**

Dégradation et minéralisation des **sources organiques**

Amélioration **OAD et appropriation** par les acteurs de terrain

**Maîtrise des cycles biogéochimiques**  
à différentes échelles et niveaux d'organisation

**Fertilité biologique des sols**

**Approche intégrée** des déterminants des pertes d'azote ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ )

**Approche territoriale** de la gestion des cycles des principaux éléments, à différentes échelles et par différents acteurs (PRO et gestion des sols)

Développement de **modèles, outils et supports pédagogiques**

**Recyclage des produits résiduaux**  
(organiques) et **autonomie** des exploitations en N et P

**Combinaison du raisonnement** sur différents éléments : gestion  $\text{C}_{\text{org}}$ , N et P ; biodisponibilité N et P à long terme

**Typologie des PRO**  
/ valeur fertilisante N et P

**Pertes gazeuses**  
(volatilisation  $\text{NH}_3$ , pertes  $\text{N}_2\text{O}$  / nature, modalité d'épandage)

**Gestion territoriale** des ressources organiques

**Risques sanitaires**

# Le programme de travail du RMT 2014-2019

**Fertilisation des cultures**  
 (contexte de réduction de l'usage d'intrants et limitation des pertes d'éléments nutritifs dans l'environnement)

Efficacité de **recouvrement N et P**

Dégradation et minéralisation des **sources organiques**

Amélioration **OAD et appropriation** par les acteurs de terrain

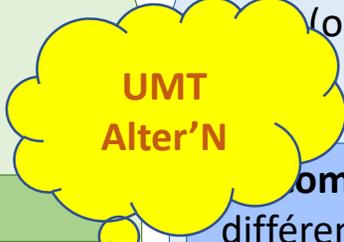
**Maîtrise des cycles biogéochimiques**  
 à différentes échelles et niveaux d'organisation

**Fertilité biologique des sols**

**Approche intégrée** des déterminants des pertes d'azote ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ )

**Approche territoriale** de la gestion des cycles des principaux éléments, à différentes échelles et par différents acteurs (PRO et gestion des sols)

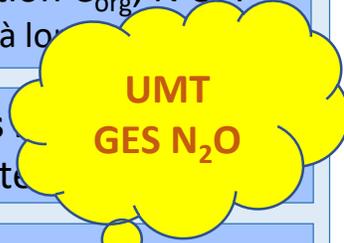
Développement de **modèles, outils et supports pédagogiques**


**UMT Alter'N**

**Recyclage des produits résiduaire**  
 (organiques) et **autonomie** des exploitations en N et P

**Combinaison du raisonnement** sur différents éléments : gestion  $\text{C}_{\text{org}}$ , N et P : biodisponibilité N et P à l'

**Typologie des** / valeur fertilisante


**UMT GES N<sub>2</sub>O**

**Pertes gazeuses**  
 (volatilisation  $\text{NH}_3$ , pertes  $\text{N}_2\text{O}$  / nature, modalité d'épandage)

**Gestion territoriale** des ressources organiques

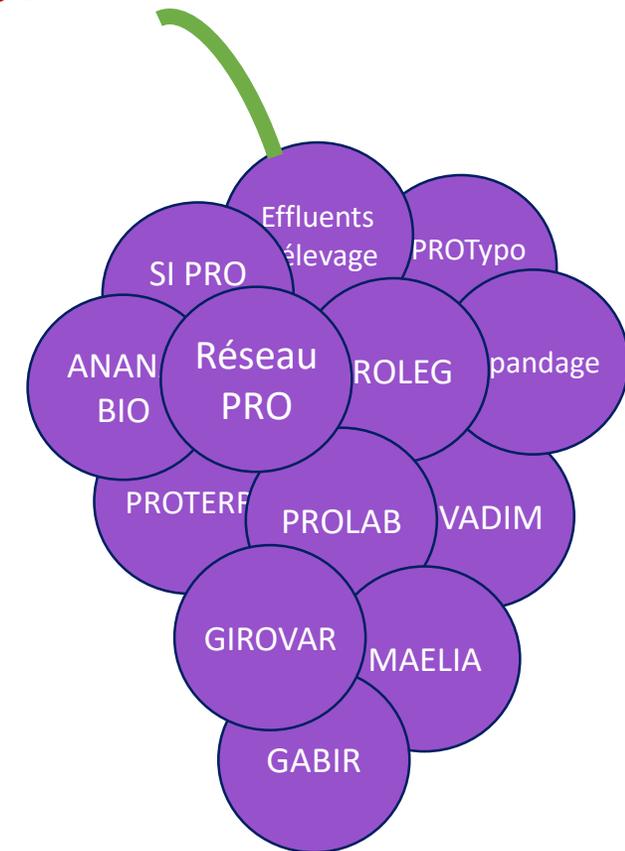
**Risques sanitaires**

## Le programme de la journée



# Matinée : Rétrospective-bilan 2007-2019

- **Évolution des réflexions et trajectoire des travaux de R&D par « grappes de projets »**  
(présentation non exhaustive des travaux du réseau)
  - ➔ Choix des « grappes de projets » issu des thématiques prioritaires :
    - **Innovations et outils d'aide à la décision pour la fertilisation azotée**  
Fiona Obriot, LDAR ; Jean-Yves Cahurel, IFV ; Julien Gaillard, CA de l'Aisne ;  
Christine Le Souder, Arvalis ; Sylvie Recous, INRA
    - **Nouvelles connaissances et références sur les produits résiduaux organiques**  
Sabine Houot, INRA ; Hélène Lagrange, Arvalis ; Caroline Le Roux, LDAR ;  
Florent Levavasseur, INRA ; Jean-Marie Paillat, Cirad
    - **Quantifier les fuites d'azote vers l'environnement pour mieux les réduire**  
Cécile Le Gall, Terres Inovia ; Virginie Parnaudeau, INRA ;  
Baptiste Soenen, Arvalis ; Sophie Générumont, INRA
- **Retour d'expérience et réflexion prospective**  
François Laurent, Arvalis ; Sylvie Recous, INRA
- **Pause déjeuner** : buffet dans les grand et petit salons, le long de l'Avenue Georges V



## Après-midi : Perspectives pour demain

### Reprise des travaux à 14h30

- **L'économie circulaire** : grands enjeux et éléments de cadrage politique
  - **Fabienne MULLER, ADEME**
- **Modélisation et évaluation intégrées à l'échelle du territoire** : de la gestion de l'eau à la gestion des produits résiduels organiques
  - **Olivier THEROND, INRA**
- **Une suite potentielle pour 2020-2024** : le RMT BOUCLAGE (Recyclage, Fertilisation et Impacts environnementaux)
  - **Mathilde HEURTAUX, Acta ; Sophie GENERMONT, INRA**

### Clôture de la journée à 16h30

# Bonne journée à tous

## RMT Fertilisation & Environnement

# Innovations et Outils d'Aide à la Décision pour la Fertilisation Azotée

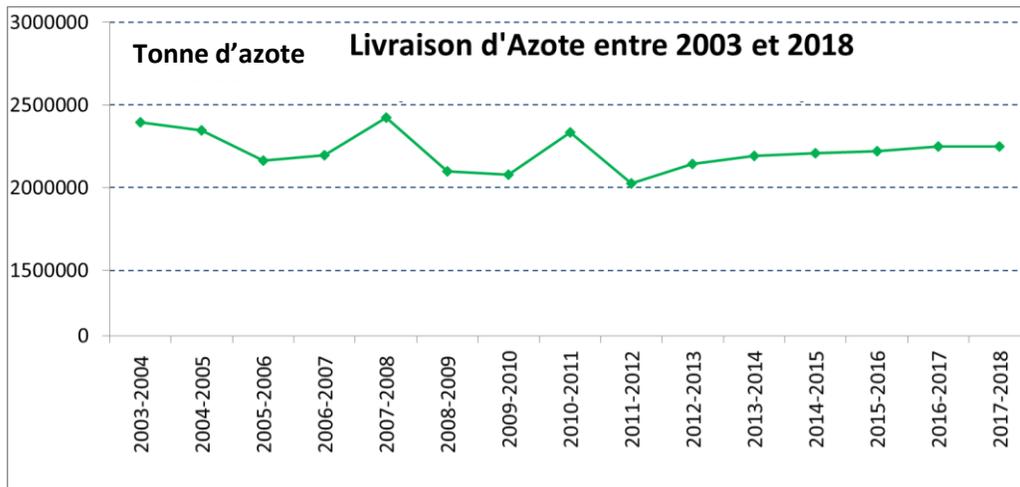
**Obriot F., Recous S., Cahurel J-Y., De Bandt M., Damay N., Dubrulle P., Gaillard J., Le Gall C., Le Roux C.,  
Le Souder C., Jeuffroy M-H., Machet J-M., Verbèq**



# Contexte et Historique

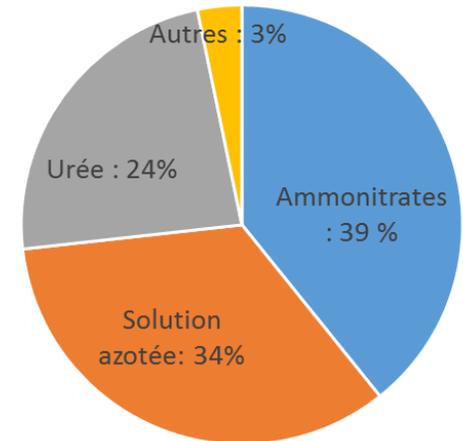
# Evolution consommation des engrais minéraux et usage des engrais organiques

Engrais minéraux azotés en France

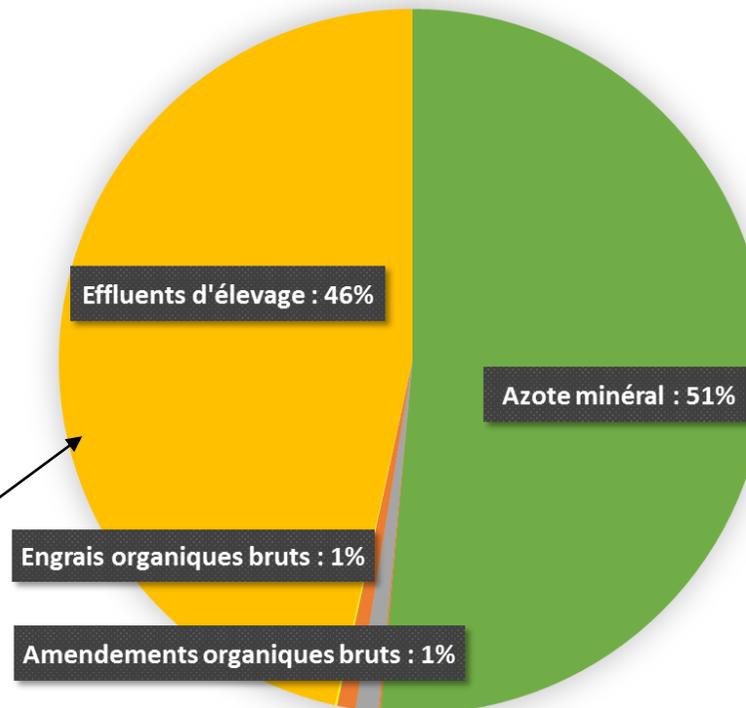


=> Stabilité de l'évolution de la proportion engrais organique vs. minéral utilisé en France mais diversité des formes organiques.

Formes d'engrais azotés livrés en France (2017/2018 en %)



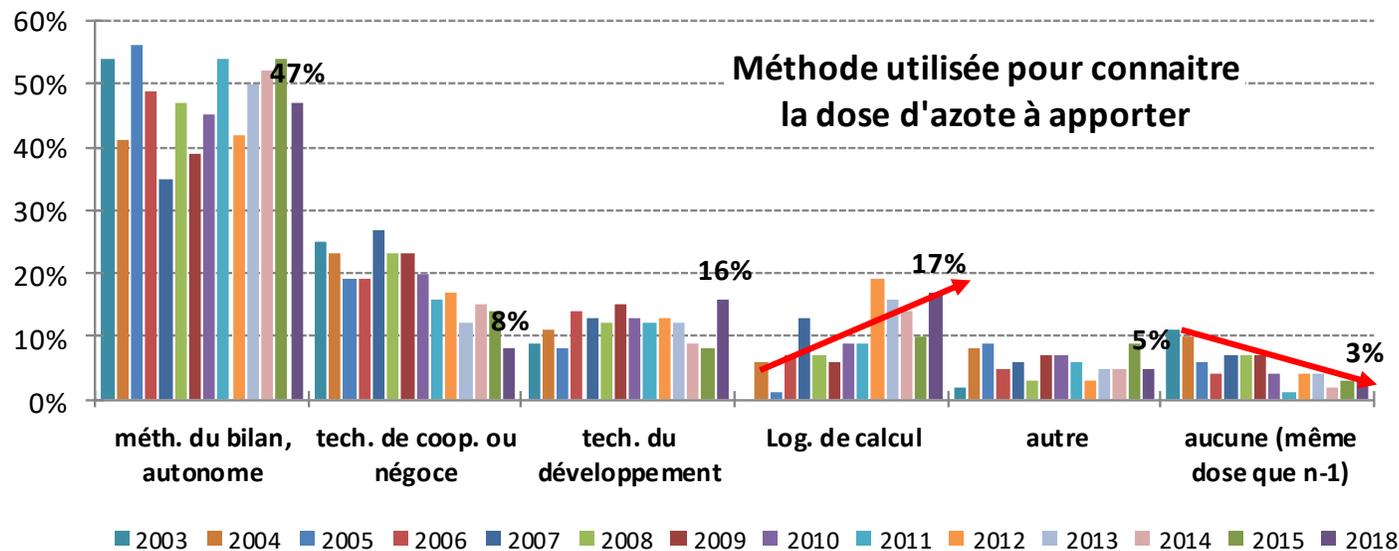
Fertilisants azotés commercialisés et effluents d'élevage non commercialisés % (en 2017)



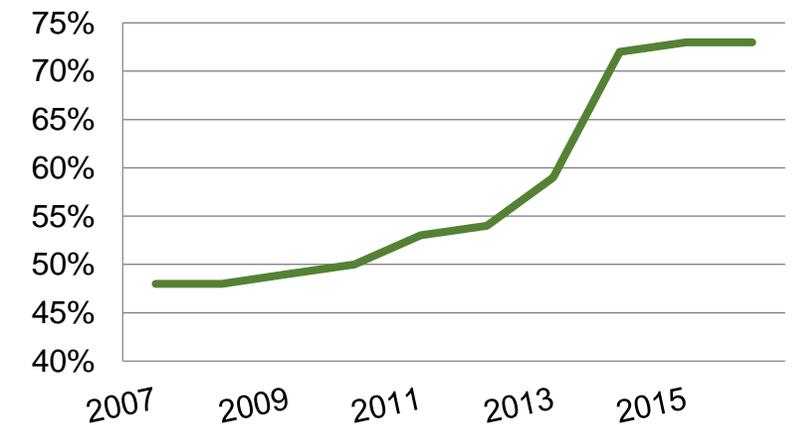
Non commercialisés

# Evolution des pratiques de fertilisation azotée du BLE TENDRE (enquête N annuelle Arvalis)

Evolution comparée 2001/2018- Nord Loire



Evolution mesure de reliquat azoté



Par ailleurs, reprise très forte de l'utilisation des OAD en cours de végétation entre 2013-14 et aujourd'hui: ↗15 %

Source : Enquête téléphonique auprès de 200 agriculteurs Nord-Loire, questions sur leur plus grande parcelle de blé - Tirage aléatoire au sein d'un fichier de contacts Arvalis.

# Historique et panorama des OAD

**1969:**  
Publication de la méthode du bilan (INRA)

**1978:** Diffusion de la méthode du bilan grille papier (ITCF...)

**1995...** Développement outils pilotage basés sur des indicateurs plante

**1990...** Paramétrages régionaux de la méthode (Chambres d'agriculture...)

**Brochure COMIFER** Calcul méthode du bilan toutes cultures, 1983, 1996, 2013

**Azobil**  
(INRA, LDAR)

**Réglette Colza**  
(ITerresInovia)

**AzoFert®**  
(INRA, LDAR, ITB)

**N-Pérennes**  
(IFV, LDAR)

**N'EDU**  
(CA02, LDAR)

**Méthode INN**  
(INRA, Arvalis)

**FERTIWeb dynamic®**  
(Arvalis, Auréa)

**2016** Rapport ministériel outils de pilotage

1970

1980

1990

2000

2010

2020

Création COMIFER

**1980:** Rapport Hénin (Impact agricole sur la pollution de l'eau)

2003 – GIS Fertilisation Raisonnée

2007, 2010, 2013 RMT F&E

2011- Groupe RMT-COMIFER appui à la directive Nitrates

**2012:** Intégration de la méthode du bilan dans la réglementation / Référentiels GREN

**1991:** Adoption de la directive « Nitrates »

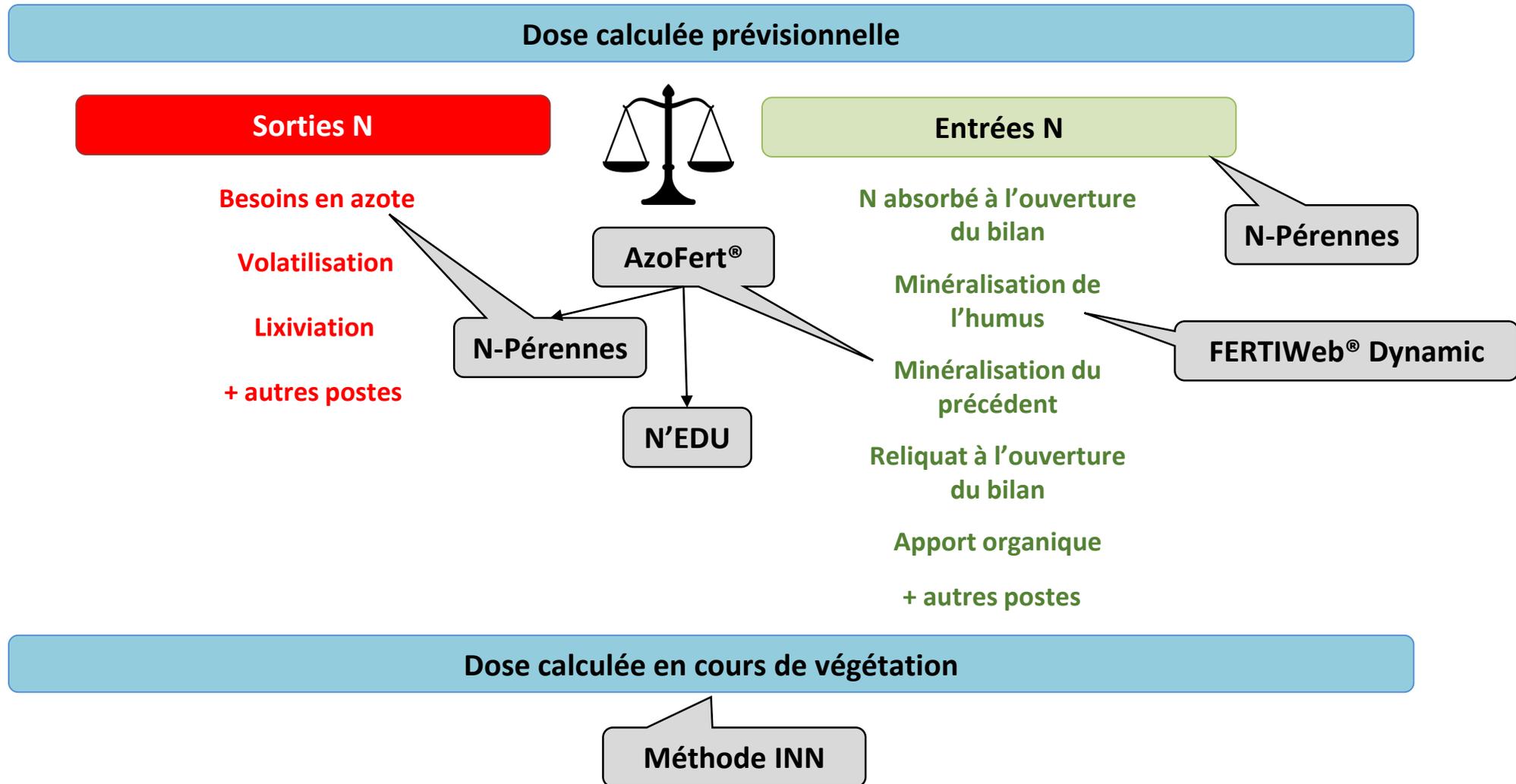
**2016 - :** 6<sup>e</sup> prog. d'actions directive Nitrates

**1990:** 1<sup>er</sup> rapport du GIEC

**2011-2016:** Contentieux UE / France directive Nitrates

Source: Adapté de Meynard J-M. 2018. Colloque sur l'azote (AFA, Paris).

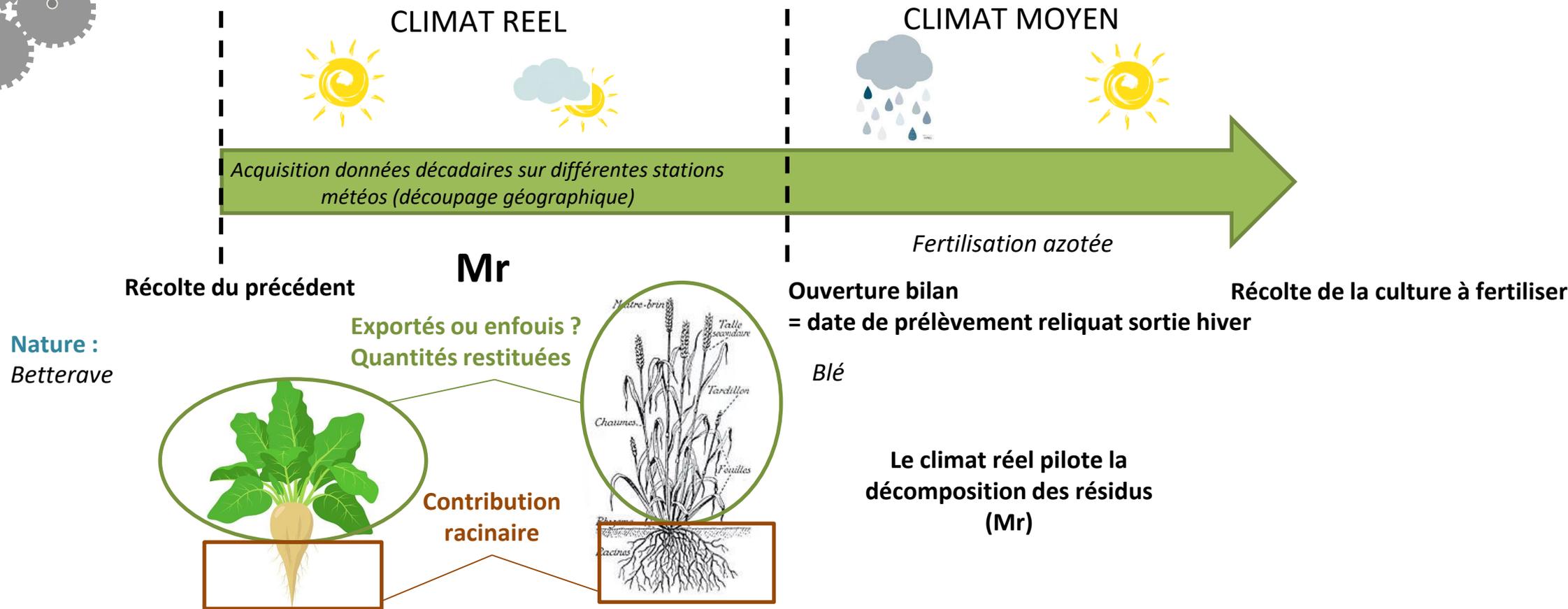
# Exemples d'innovation des outils et diffusion des concepts



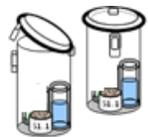
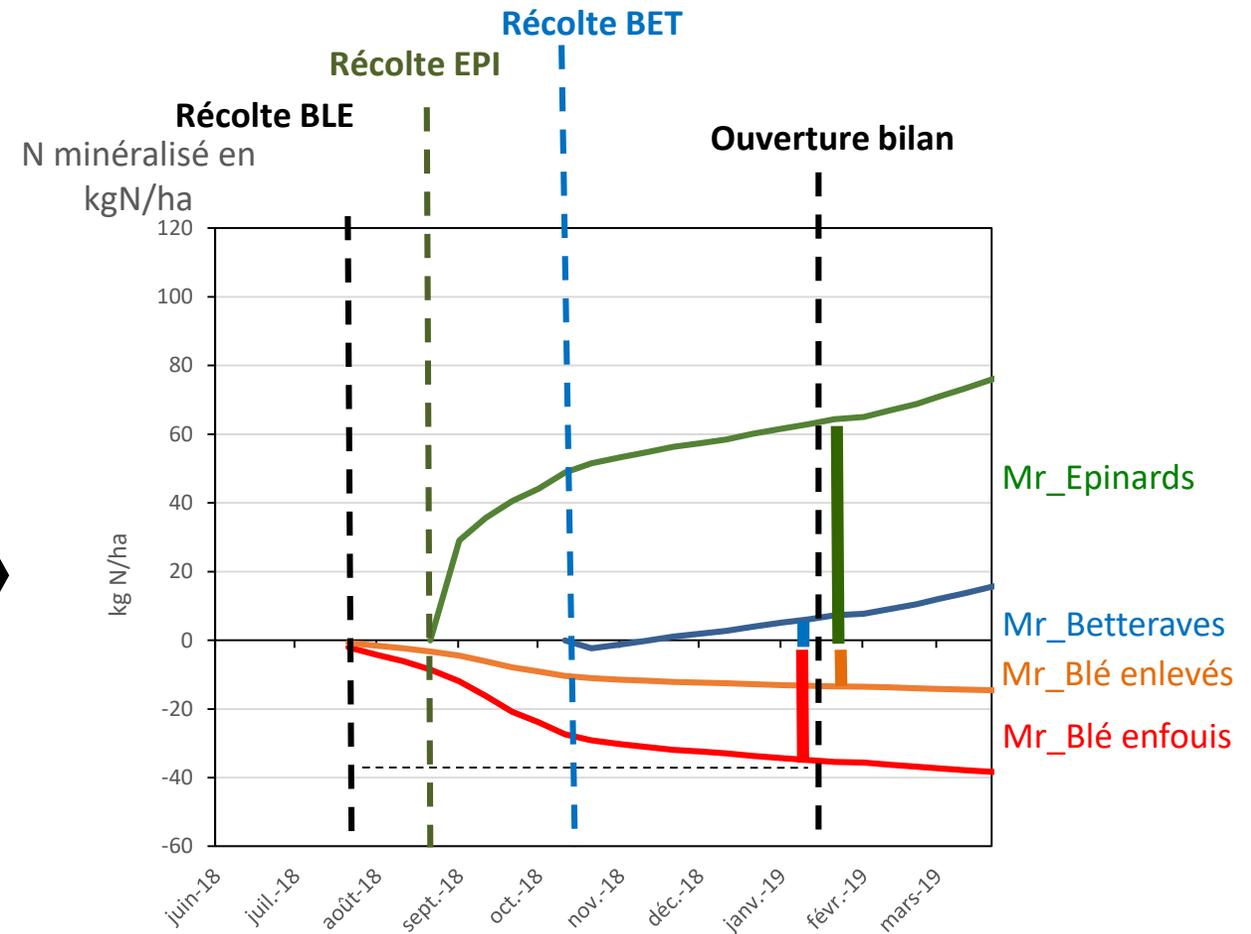
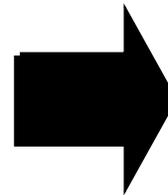
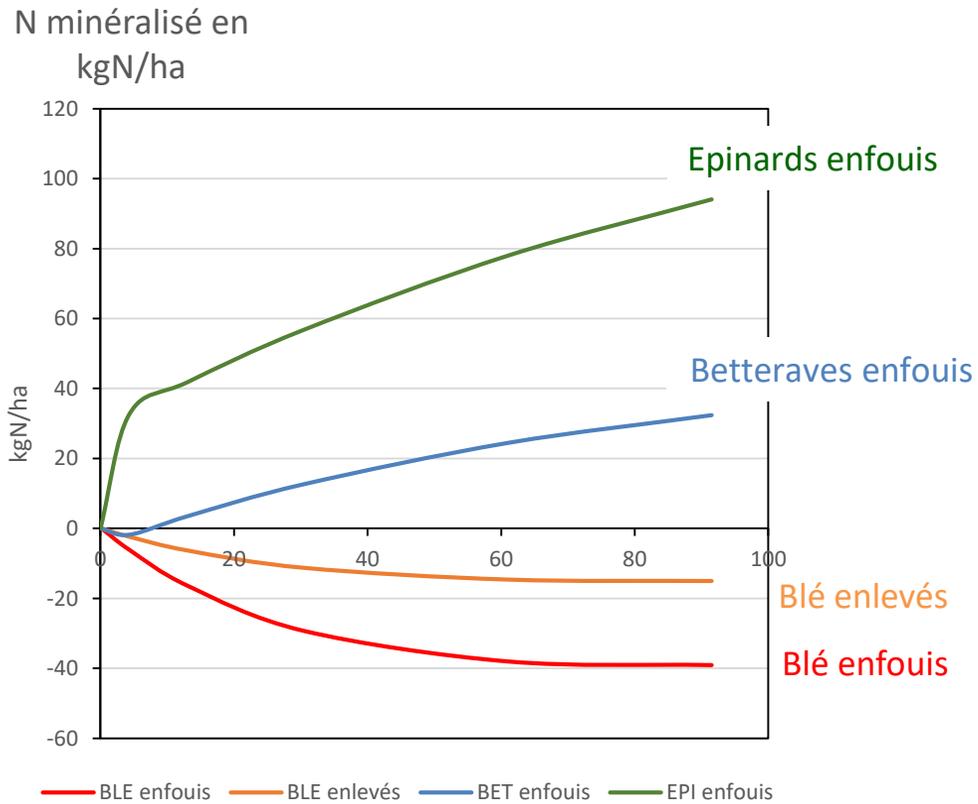
# Nouveautés développées dans les OAD pour la fertilisation azotée

# Dynamique de décomposition des résidus du précédent (Mr) par AzoFert®

AzoFert® = OAD dynamique → Utilisation des données météo acquises et/ou moyennes  
→ Paramétrage régional en évolution constante



# Dynamique de décomposition des résidus du précédent (Mr) par AzoFert®



Jours « normalisés »



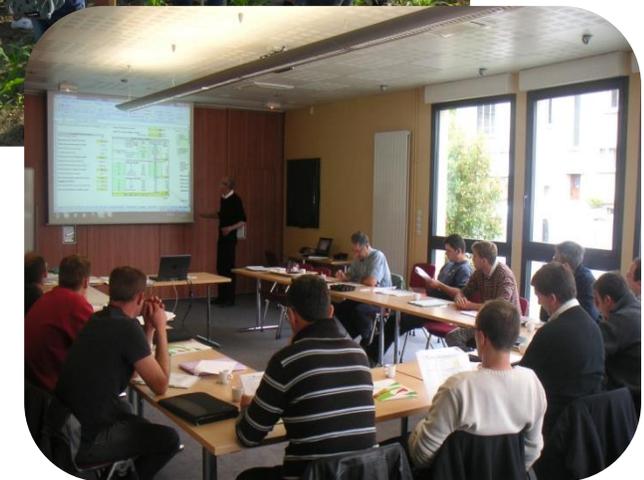
Temps calendaire

CLIMAT REEL

# Un logiciel pédagogique: N'EDU



- Des OAD de plus en plus performants
- Des concepts de plus en plus complexes
  - **Besoin de supports pédagogiques**
- Projet N'EDU (2012-2015) : logiciel pédagogique basé sur AzoFert®
- N'EDU, un logiciel novateur :
  - créé par des enseignants, des chercheurs et conseillers agricoles pour des formateurs et apprenants de différents niveaux
  - basé sur un logiciel professionnel (moteur AzoFert® hébergé par le LDAR de l'Aisne)
  - interface optimisée pour la formation



# Un logiciel pédagogique: N'EDU

- Gestion de classes d'apprenants ; interface adaptée

Situation Culture Précédent et CIPAN Sol Pratiques habituelles Apports Résultats

Précédent et CIPAN

Sauvegarder

Précédent\*

Rendement du précédent (t/ha)\*

Fertilisation azotée du précédent (kg N/ha)\*

Date de récolte du précédent\*

Devenir résidu du précédent

Culture intermédiaire\*  Oui  Non

Indiquer la quantité d'azote minéral (y compris la partie d'azote disponible en cas d'apport organique) apporté sur le précédent.

La quantité d'azote minéral apporté sur le précédent permet d'estimer un rapport C/N des résidus qui est pris en compte dans le poste minéralisation des résidus du précédent

Niveau Découverte

Suite

# Un logiciel pédagogique: N'EDU

- Comprendre l'impact des données d'entrée sur la dose conseillée : comparaison de scénarios

| Poste du bilan d'azote                                 | Blé de betterave<br>Contexte céréalier / élevage<br>(facteur système ; teneur en Norg<br>du sol ; RSH) | Exercice 3<br>kg N/ha | Exercice 1<br>kg N/ha |
|--|--|-----------------------|-----------------------|
| Besoin en azote de la culture                          |  | 270                   | 270                   |
| Azote restant dans le sol après la culture             |  | 26                    | 26                    |
| Azote déjà absorbé pendant l'automne-hiver             |  | 14                    | 14                    |
| Reliquat d'azote minéral dans le sol en sortie d'hiver |  | 39                    | 30                    |
| Minéralisation de l'humus                              |  | 57                    | 38                    |
| Arrière effet prairie                                  |  |                       |                       |
| Effet culture intermédiaire                            |  |                       |                       |
| Minéralisation des résidus du précédent                |  | 2                     | 2                     |
| Effet direct des amendements organiques                |  |                       |                       |
| Apports pluviométriques                                |  | 4                     | 4                     |
| Apports par l'irrigation                               |  | 0                     | 0                     |
| Fixation symbiotique                                   |  | 0                     | 0                     |
| Lixiviation de l'azote du sol                          |  | 3                     | 2                     |
| Organisation microbienne de l'azote de l'engrais       |  | 1                     | 1                     |
| Volatilisation de l'azote de l'engrais                 |  | 12                    | 14                    |
| Apport prévisionnel en engrais minéral                 |  | 196                   | 225                   |

# Déterminations des besoins en azote : adaptation aux cultures pérennes. Exemple de la vigne dans N-Pérennes.

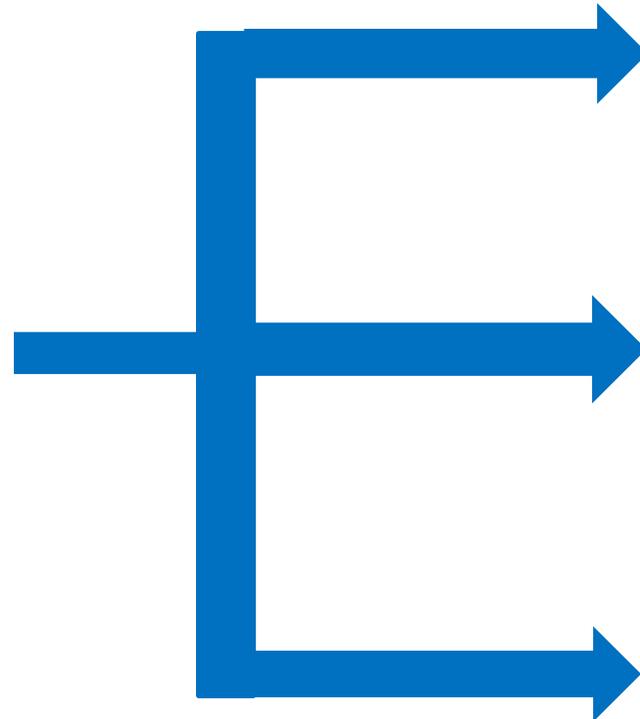


viticulteur



donnée  
d'entrée

Rendement



Grappes

% N



+

Sarments

% N



+

Feuilles

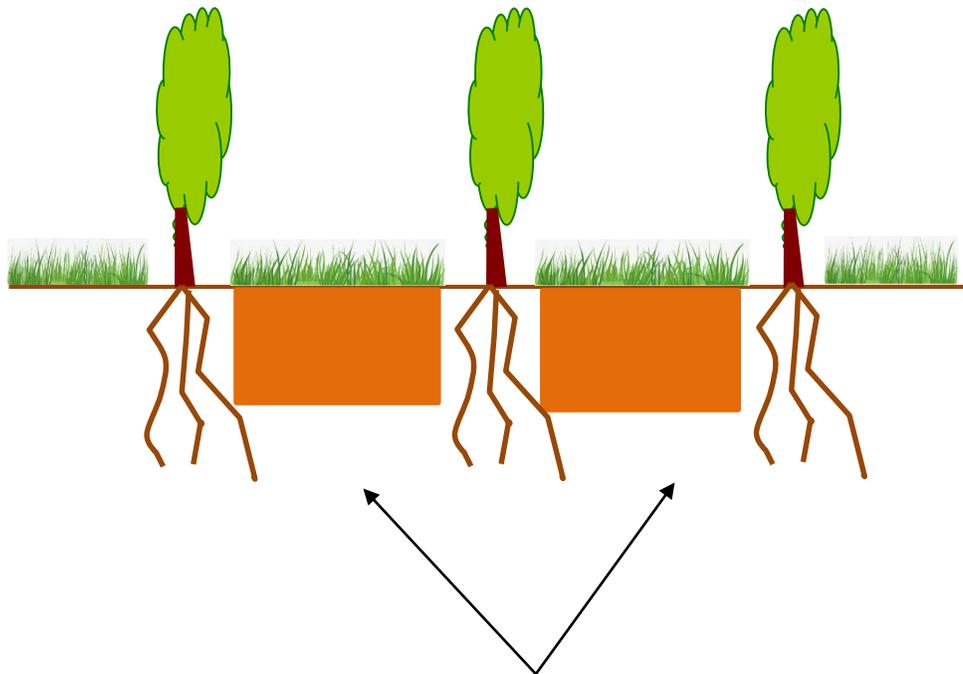
% N



Répartition de la Matière Sèche entre  
débourement et récolte (biblio)

= BESOINS

# Fourniture par le sol : prise en compte de l'enherbement chez les plantes pérennes



Hypothèse : volume de terre ne fournissant pas d'azote à la vigne



à valider dans un plus grand nombre de situations

# Amélioration du terme minéralisation de l'humus (Mh) : FERTIWeb® Dynamic

- FERTIWeb®, gamme de 3 outils de plan de fumure différenciés par leur moteur Azote

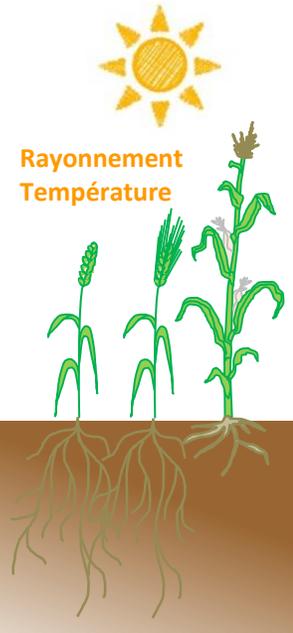


## Moteur N dynamique,

- lien vers le modèle interne CHN d'ARVALIS : flux de carbone, d'eau et d'azote, sol-plante-atmosphère, en lien direct avec les BDD météo.
- opérationnel sur blé et maïs



Modèle CHN  
ARVALIS - Institut du végétal



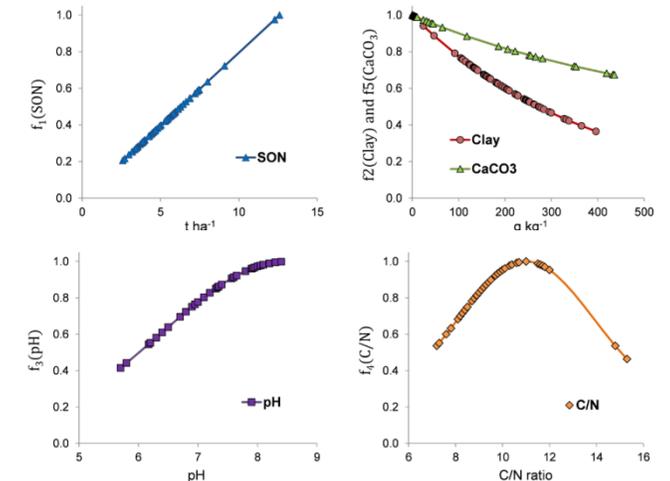
Le modèle simule des  
stocks et des flux

Par jours  
Par tranches de 1cm

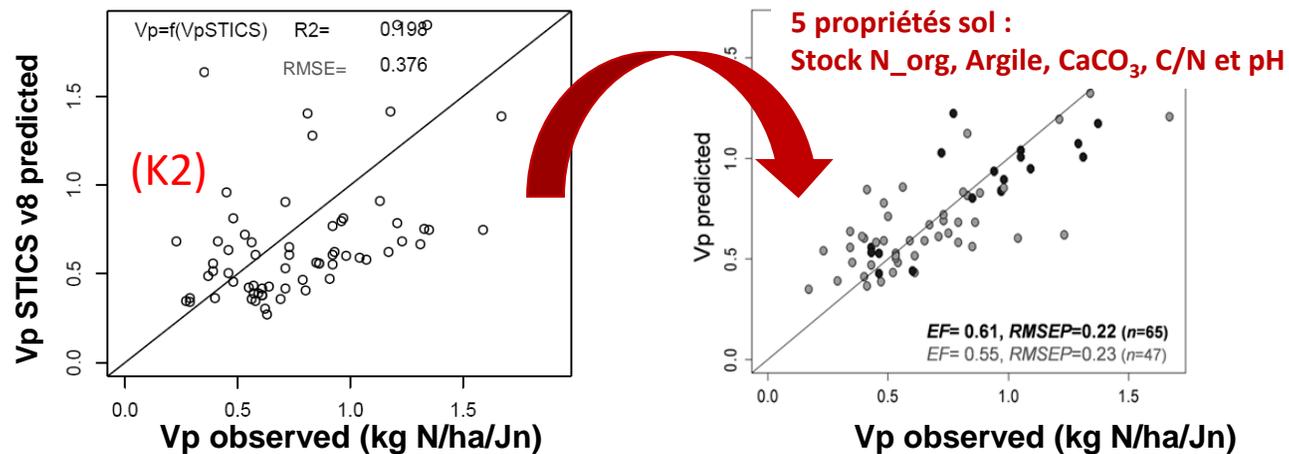
# Nouveau modèle de minéralisation de l'humus (Mh)

**Nouveau :**  
modèle de minéralisation Mh:  
Utilisation des derniers acquis,  
avec le modèle Vp  
(Clivot et al., 2018)

| Modeling step     | Dataset | Introduced variable    | Generic model  | EF   | Bias | RMSEP                                    |
|-------------------|---------|------------------------|--|------|------|--|
| $i$               | $n$     | $V_i$                  | $\hat{V}_p(i) = f_1(V_1) \cdot f_2(V_2) \cdots f_i(V_i)$ |      |      | kg N ha <sup>-1</sup> nday <sup>-1</sup> |
| <b>Soil model</b> |         |                        |  |      |      |  |
| 1                 | 65      | SON                    | $\hat{V}_p(1) = f_1(SON)$                                | 0.18 | 0.03 | 0.29                                     |
| 2                 | 65      | Clay                   | $\hat{V}_p(2) = \hat{V}_p(1) \cdot f_2(Clay)$            | 0.22 | 0.03 | 0.29                                     |
| 3                 | 65      | pH                     | $\hat{V}_p(3) = \hat{V}_p(2) \cdot f_3(pH)$              | 0.43 | 0.00 | 0.26                                     |
| 4                 | 65      | C/N                    | $\hat{V}_p(4) = \hat{V}_p(3) \cdot f_4(C/N)$             | 0.56 | 0.00 | 0.23                                     |
| 5                 | 65      | CaCO <sub>3</sub> (Ca) | $\hat{V}_p(5) = \hat{V}_p(4) \cdot f_5(Ca)$              | 0.61 | 0.00 | 0.22                                     |



➤ Meilleure prédiction (plus précise et plus robuste) avec le nouveau modèle (fonction)



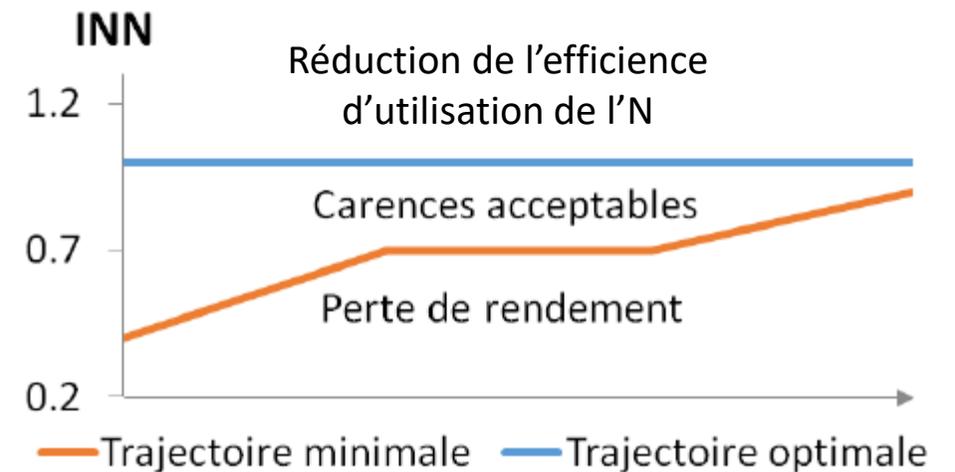
(Clivot et al., 2018)

# Un nouveau mode de raisonnement de la fertilisation azotée du blé

# Un changement de paradigme pour raisonner la fertilisation azotée du blé : le principe

⇒ Renouveler la gestion de la fertilisation azotée du blé tendre, en répondant à des difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan (*Ravier et al., 2016*)

- **Pas de dose calculée a priori** : sans objectif de rendement et sans Reliquat Sortie Hiver
- **Carences acceptées**, et même recommandées
- **Indicateur plante au service de la décision**, compatible avec les nouvelles technologies émergentes (capteurs)

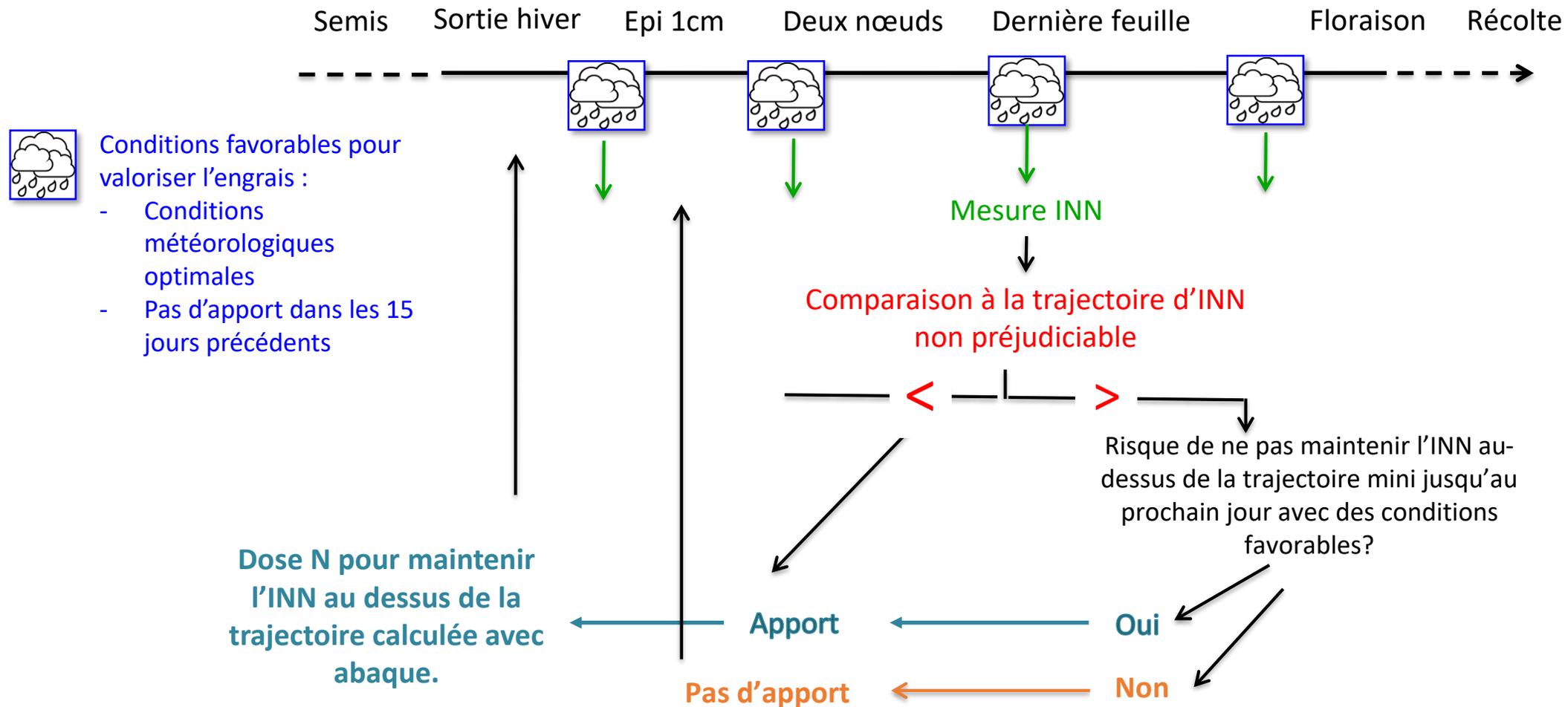


L'indice de nutrition azotée :

$$\text{INN} = \frac{\text{Teneur en N des parties aériennes}}{\text{Teneur en N critique}}$$

pour un niveau de biomasse donné

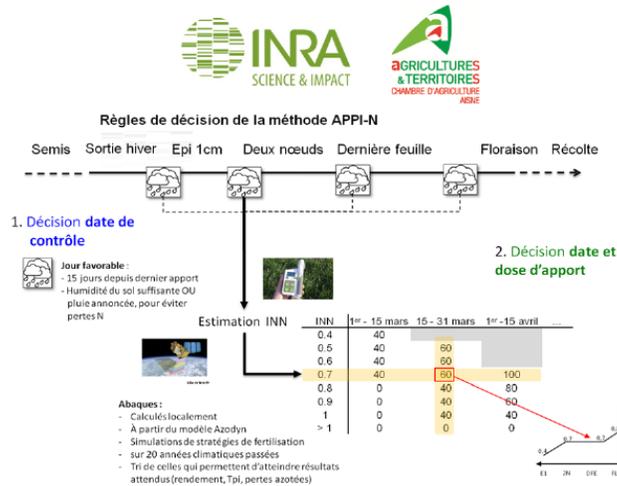
# Un changement de paradigme pour raisonner la fertilisation azotée du blé : la mise en œuvre



# Un changement de paradigme pour raisonner la fertilisation azotée du blé : prototype en cours de développement

## 2 approches en cours de développement et de test

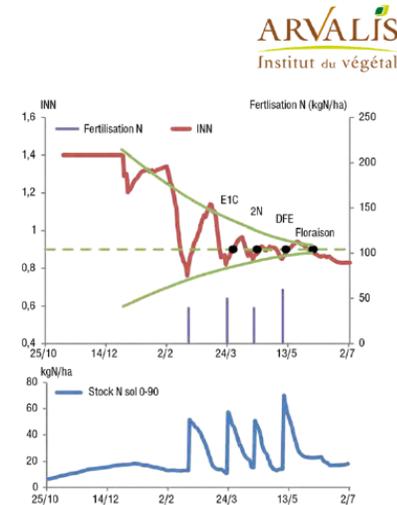
### Basée sur des mesures : APPI-N



#### Travaux en cours :

- Mise au point d'abaques locales
- Comparaison de moyens de mesure de l'INN

### Basée sur la modélisation CHN - Conduite



CHN modélise les flux d'eau, d'azote et de carbone. Il permet de simuler la croissance du blé et son INN

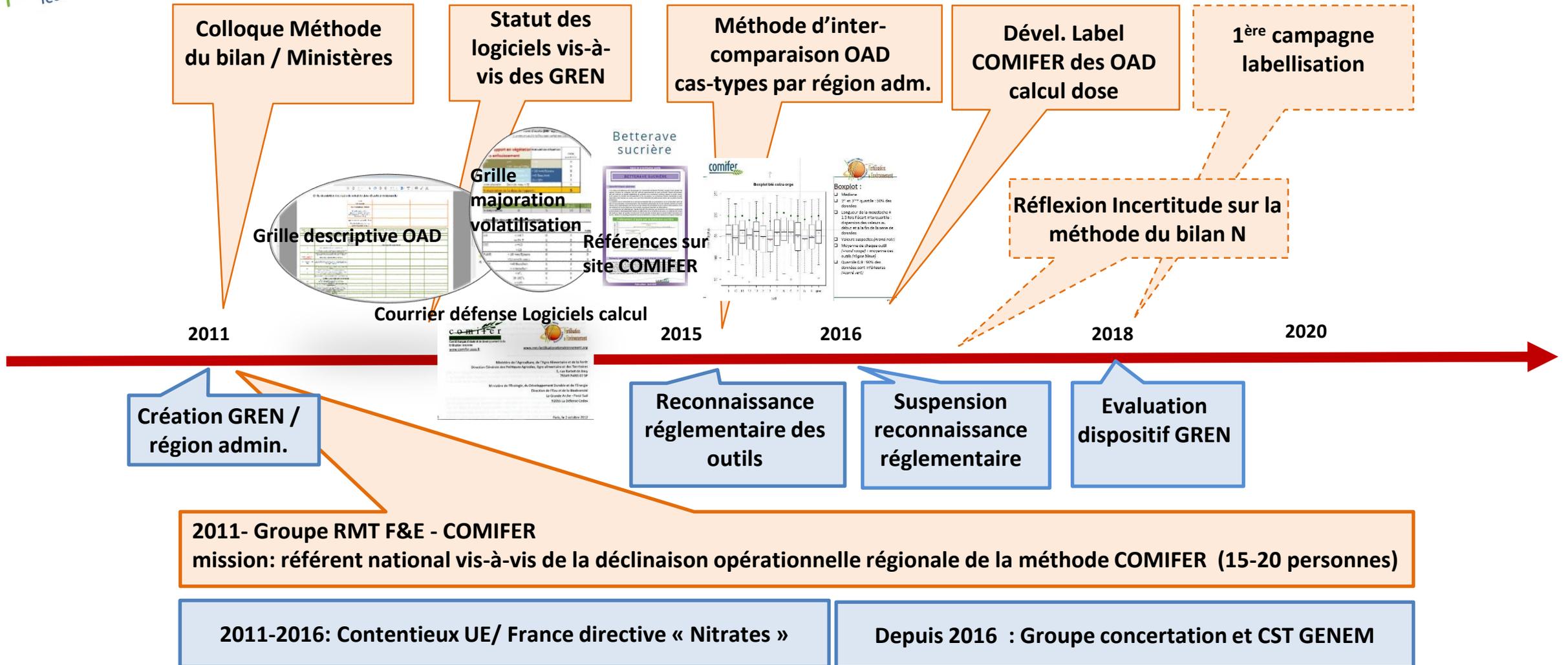
#### Travaux en cours :

Définir une trajectoire d'INN et déclencher un apport dès que l'on s'en éloigne trop à cause d'un défaut de fourniture du sol. Plusieurs variantes de trajectoires testées en début et en fin de cycle.

- ✓ **Prototype** : thèse de C. Ravier 2017 (financement: Arvalis, INRA, ADEME)
- ✓ Solinazo: projet PEI Région Centre-Val-de-Loire, 2017-2021 (CA, INRA, Arvalis, Terres Inovia, 2 coops),
- ✓ Cap Filière Centre : sur Blé dur (CA, INRA, Arvalis)
- ✓ Arvalis et partenaires : expérimentations et développement du modèle CHN
- ✓ Groupe APPI-N 2019: (agriculteurs volontaires et/ou expérimentation en micro-parcelles) CA 70, 86, 02, 89, 51, 08, 16, 36, 58, 89, CR IdF, Bretagne, Normandie, le CER France Normandie-Maine, etc.

# Un appui aux politiques publiques sur les outils

# Notre appui aux politiques publiques



## En guise de conclusion....

- Un **travail de fond et continu** sur l'amélioration des outils de calcul de dose N: développements sur les différents postes du bilan, et même une remise en cause de ce bilan....
- A venir, un enjeu : **la prise en compte et le conseil en matière environnementale** (eau, air)
- L'enjeu reste très fort sur **l'usage des outils**, leur diffusion, leur reconnaissance réglementaire.



- **120 participants originaires de 20 pays**
- Ateliers de démonstrations (**9 outils**)

|            |         |           |            |             |
|------------|---------|-----------|------------|-------------|
| AzoFert®   | Syst'N® | FARMSTAR  | COWNEX     | VEGSYST-DSS |
| N-Pérennes | Sol-AID | FERTIWEB® | MANNER-NPK |             |



# Les partenariats autour des OAD présentés

AzoFert®

Contact : [cleroux@aisne.fr](mailto:cleroux@aisne.fr)



N'EDU

Contact : [julien.gaillard@aisne.chambagri.fr](mailto:julien.gaillard@aisne.chambagri.fr)



N'Pérennes

Contact : [Jean-Yves.Cahurel@vignevin.com](mailto:Jean-Yves.Cahurel@vignevin.com)



Contact : [c.lesouder@arvalis.fr](mailto:c.lesouder@arvalis.fr)



## RMT Fertilisation & Environnement

### Nouvelles connaissances et références sur les produits résiduaire organiques

**Houot S., Le Roux C., Levavasseur F., Lagrange H., Paillat J.-M.,**  
Jimenez J., Michaud A., Mazoyer J., Moreira M., Obriot F., Parnaudeau V., Thuriès L., Wassenaar T.



## Éléments de contexte et enjeux

- Valorisation des PRO : pratique ancienne, participe au bouclage des cycles et à l'économie circulaire des territoires, sources alternatives aux fertilisants minéraux, pratique nécessaire dont il faut maîtriser l'efficacité et les impacts.
- Développement de nouveaux traitements → nouveaux PRO ; grande diversité
  - Quelle caractérisation pour prédire leurs effets au champ ? → labo , transposition au champ
  - Comprendre la diversité de caractéristiques et d'effets en lien avec leur origine : typologie, bases de données de références, lien avec origine.
  - Acquérir des références : essais au champ, bases de données mutualisées
- Quels outils disponibles pour prédire leur devenir au champ, leur efficacité, leurs impacts : OAD, modèles. Quels paramétrages ?
- Quelles pratiques et mode de gestion pour une meilleure efficacité de valorisation des PRO : parcelles, exploitation, territoire ?
- Prise en compte des flux (logistique) et des acteurs et de leurs règles de décision.

## Quatre thèmes abordés

- 1. Caractérisation des PRO et acquisition de références**  
Caroline Le Roux, LDAR
- 2. Modèles et OAD pour prédire le devenir des PRO**  
Florent Levavasseur, INRA
- 3. Efficience d'utilisation de la valeur fertilisante des PRO**  
Hélène Lagrange, ARVALIS
- 4. De la parcelle au territoire**  
Jean-Marie Paillat, Cirad

**Synthèse et perspectives**  
Sabine Houot, INRA

# Partie 1 : Caractérisation des PRO et acquisition de références

# Prédiction des caractéristiques des PRO

- Grande diversité
- Besoins de comprendre cette diversité et de prédire les caractéristiques des PRO en fonction des conduites d'élevage

Projet CasDar/Ademe Effluents d'élevage 2010-2014 : « Améliorer la caractérisation des effluents d'élevage par des méthodes et des modèles innovants pour une meilleure prise en compte agronomique »



Le calculateur de la quantité et de la composition des effluents porcs, bovins et volailles



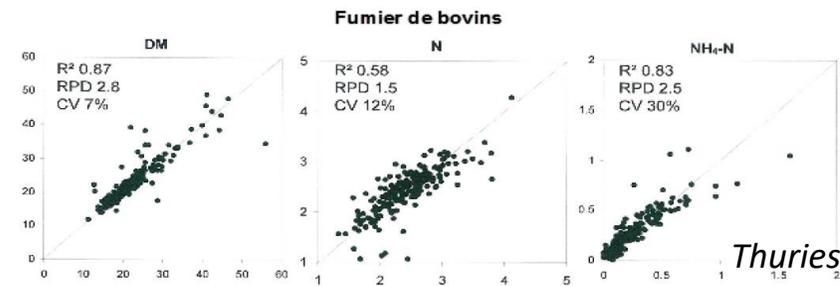
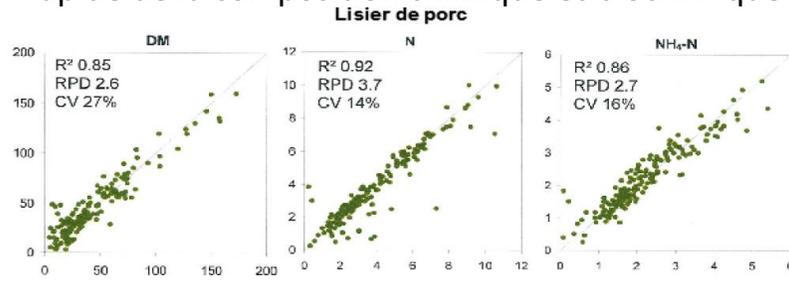
| Catégorie d'animaux            |          | Effectif annuel                    | Mode de logement                                  | Quantité de litière   |
|--------------------------------|----------|------------------------------------|---|-----------------------|
| <b>Bovins</b>                  |          |                                    |   | <b>kg/animal/jour</b> |
| Vache Laitière                 | 46       | Logette, lisier                    | 1   |                       |
| Vache allaitante avec son veau | 0        | Logette, mixte lisier/fumier       |   |                       |
| Génisse (6 mois-1 an)          | 9        | Litière accumulée intégrale        | 1,5   |                       |
| Génisse (1 - 2 ans)            | 18       | Litière accumulée intégrale        | 5   |                       |
| Génisse (> 2 ans)              | 18       | Litière accumulée intégrale        | 5   |                       |
| Bovin à l'engrais (0 - 1 an)   | 0        | Pente paillée                      |   |                       |
| Bovin à l'engrais (1 - 2 ans)  | 0        | Pente paillée                      |   |                       |
| Bovin à l'engrais (> 2 ans)    | 0        | Etable entravée, fumier            |   |                       |
| <b>Porcs</b>                   |          | <b>Effectif</b>                    | <b>Ouvrage de stockage et/ou type de produits</b> | <b>t/an</b>           |
| Truies et verrats              | 200      | Fosse stockage 2                   |   |                       |
| Post-sevrage                   | 4480     | Fumière (fumier paille compostée)  |   |                       |
| Porcs charcutiers              | 4480     | Fumière ( litière sciure fraîche ) |   |                       |
| <b>Espèce de Volailles</b>     |          | <b>Mode de production</b>          | <b>Effectif annuel</b>                            |                       |
| Dinde de chair                 | standard | 30000                              | Bout de champ (fumier paille frais)               |                       |



. Adapté du CORPEN (2003) pour le calcul des rejets porcins  
. Fonctionne sur excel 2007

Version 1.0

Calibration de la SPIR comme méthode détermination rapide de la composition chimique et biochimique



Thuries et al., 2013

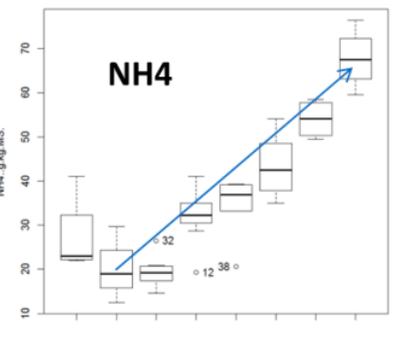
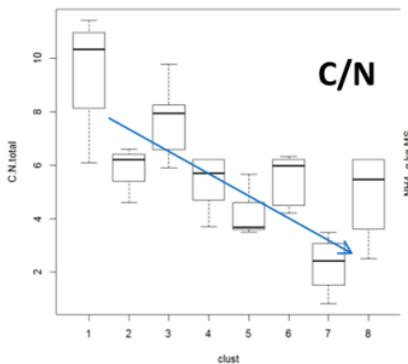
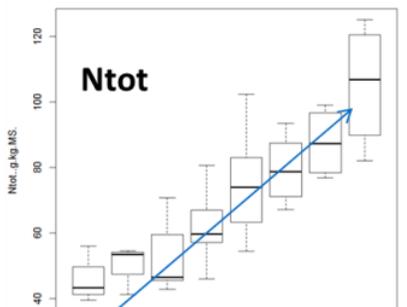
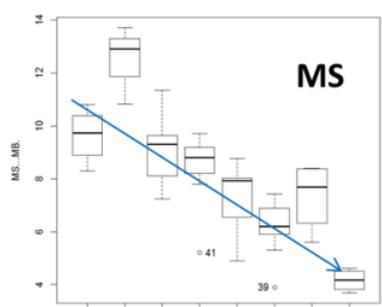
Source : Compositim, 2014

# Typologie des PRO : exemple des digestats

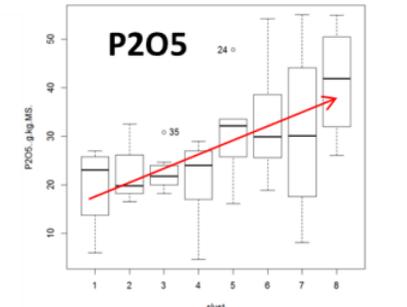
- 8 types de digestats bruts en fonction des intrants

Collaboration avec  
AAMF sur les digestats  
agricoles: 74 sites  
**Variables:** qualité  
agronomique  
**Analyses statistiques**

| Classe | Intrants                                 |
|--------|--|
| 1      | Fumiers + Végétaux                       |
| 2      | Fumiers + Végétaux + Lisier de ruminants |
| 3      | Fumiers                                  |
| 4      | Lisier de ruminants                      |
| 5      | Lisier de non-ruminants + Biodéchets     |
| 6      | Lisier de non-ruminants                  |
| 7      | Lisier de ruminant + Graisse             |
| 8      | Lisier de non-ruminants + Graisse        |



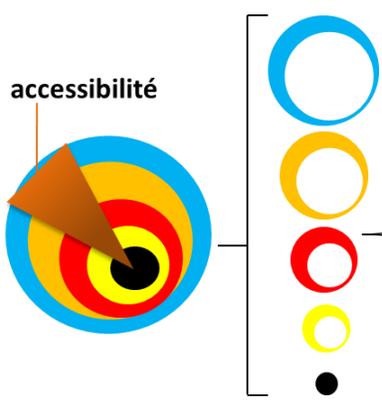
Effet fertilisant  
augmente de classe  
1 à classe 8



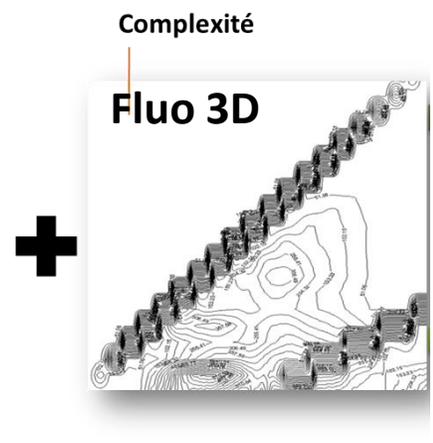
Projet ADEME Concept-Dig, 2017-2020

# Fractionnement des matières organiques pour prédire leur évolution

- Prédire leur devenir au champ mais aussi au cours des traitements
- Extractions séquentielles → fractions dynamiques
- **Evolution des méthodes**



- Fractionnement Van Soest → **ISMO** (Lashermes et al., 2009): Indice stabilité MO normalisé → Paramétrage de modèle d'évolution MO (RothC, AMG) mais développé pour des MO lignocellulosiques (composts, fumiers...)
- Modification du fractionnement + **analyse complexité** → **ISBAMO** (Jimenez et al., 2014; 2015; 2017) : Indice de bioaccessibilité MO → englobe une gamme de PRO plus large (Boue step)
- **Biodégradabilité : notions de bioaccessibilité et de complexité**

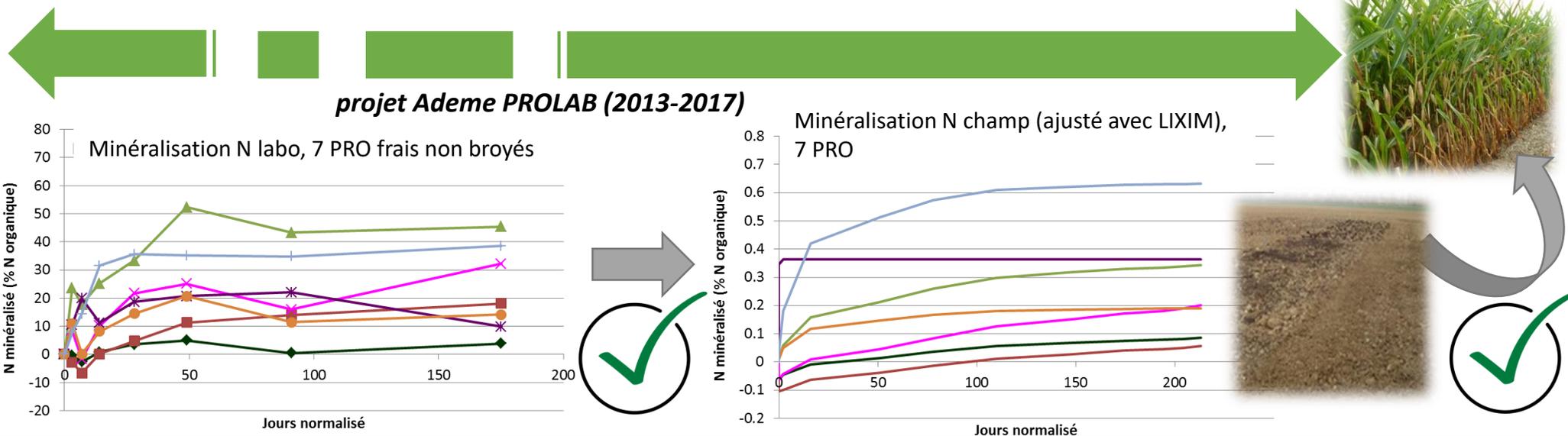


# Transposition des mesures labo pour prédire ce qui se passe au champ

-> Minéralisation dans les normes FD U44-163 et FD U42-163 exprime mal le comportement au champ des PRO

- Cinétiques de minéralisation N sur sol nu reflètent le comportement d'absorption en N en parcelle cultivée
- Les dynamiques N au champ sont corrélées avec les incubations de PRO frais non broyés

**Normes  
FD U44-163  
FD U42-163**

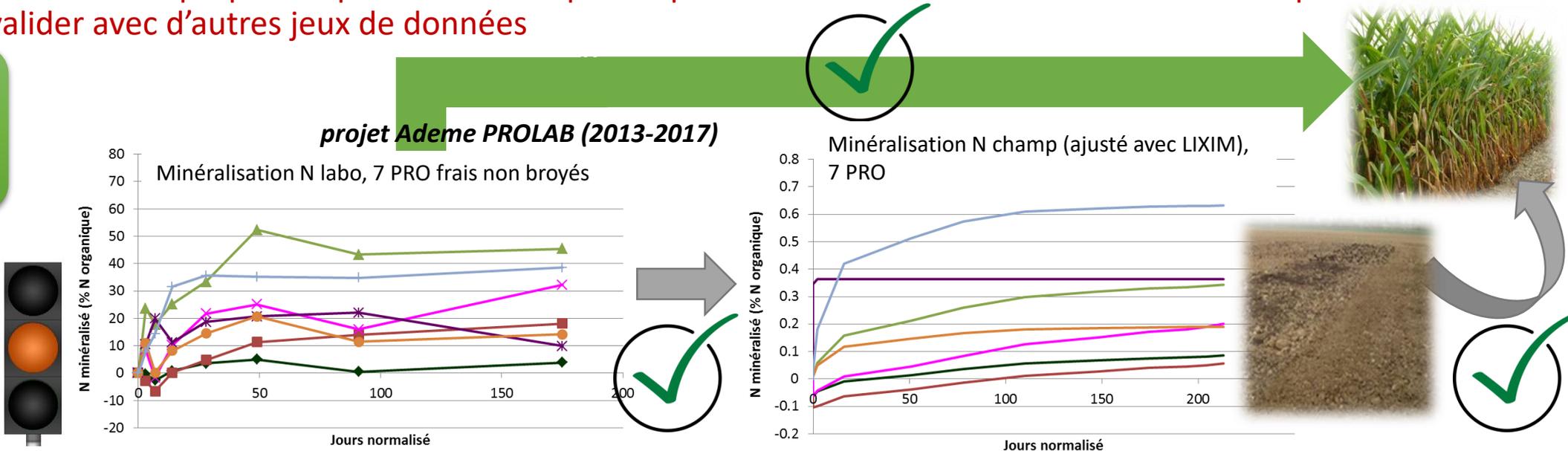
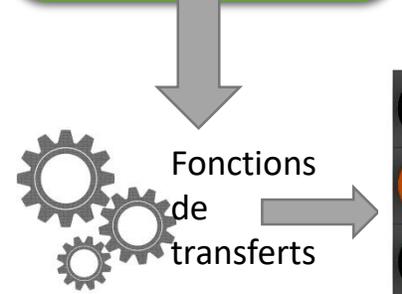


# Transposition des mesures labo pour prédire ce qui se passe au champ

-> Minéralisation normes FD U44-163 et FD U42-163 exprime mal le comportement au champ des PRO

- Cinétiques de minéralisation N sur sol nu reflètent le comportement d'absorption en N en parcelle cultivée
- Les dynamiques N au champ sont corrélées avec les incubations de PRO frais non broyés
- Les modes de préparation et conservation des PRO et sols influent sur la cinétique :
  - Séchage; Broyage; Ajout N minéral
- Fonctions de transfert proposées prenant en compte les paramètres de différences identifiés. Ces équations sont encore à valider avec d'autres jeux de données

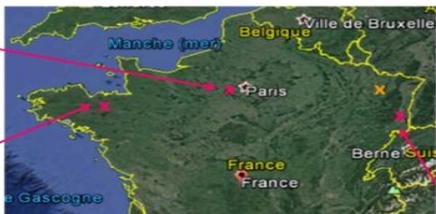
**Normes  
FD U44-163  
FD U42-163**



# Essais au champ sur les PRO : base de données commune

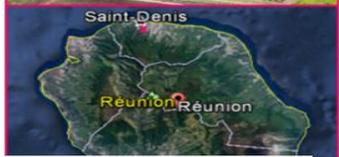
**QualiAgro - 1998, 6 ha**  
Composts urbains, fumier  
Conduite biologique  
Céréales/luzerne

**EFELE - 2012, 2,3 ha**  
Effluents d'élevage  
(bruts, compostés, digérés)  
Blé-mais/CIPAN



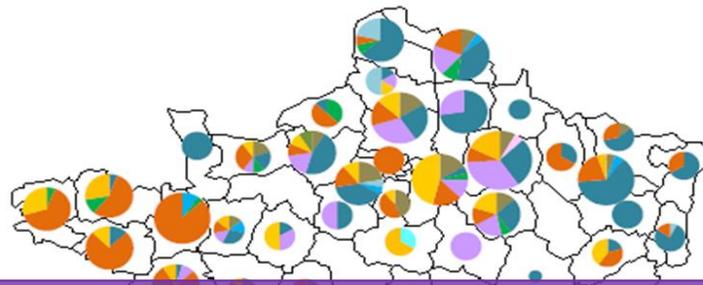
**PRO'spective - 2000, 2 ha**  
Boues, fumier, biodéchets  
(compostés, non compostés)  
Blé-mais-orge-betterave suc.

**la Réunion - 2013**  
Boues, fientes...  
Canne à sucre



**Sénégal - 2016**  
Boue, digestat, litière volailles  
Maraîchage

**5 sites observations détaillées, monitoring complet**  
**+ 3 sites associés** (2 historiques et 1 site au Burkina Faso)



Réseau PRO – filière (2011-2014) 50 essais archivés  
Projets Digestats (ex. VADIM ETHAN, VADIM)  
Début d'analyse commune des données essais



**Vingtaine essais longue durée + nombreux essais annuels**  
Grandes cultures, viticulture, ± AB  
Effluents élevage, PRO urbains, > 2013 essais digestats

*Projet CasDar/Ademe Réseau PRO*  
*Projets Ademe VADIM et VADIMETHAN*



# Essais au champ sur les PRO : base de données commune

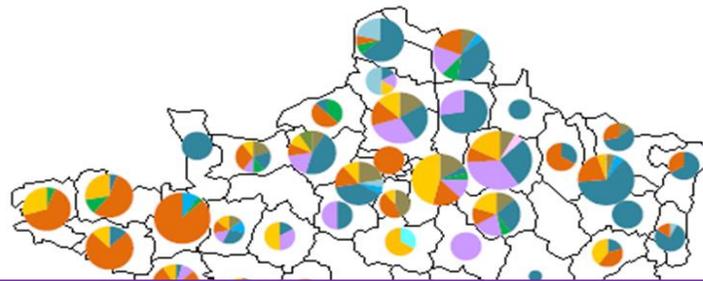
**QualiAgro - 1998, 6 ha**  
Composts urbains, fumier  
Conduite biologique  
Céréales/luzerne

**EFELE - 2012, 2,3 ha**  
Effluents d'élevage  
(bruts, compostés, digérés)  
Blé-mais/CIPAN



**PRO'spective - 2000, 2 ha**  
Boues, fumier, biodéchets  
(compostés, non compostés)  
Blé-mais-orge-betterave suc.

**la Réunion - 2013**  
Boues, fientes...  
Canne à sucre



Réseau PRO – filière (2011-2014) 50 essais archivés  
Projets Digestats (ex. VADIM ETHAN, VADIM)  
Début d'analyse commune des données essais

**SOERE PRO - Observatoire recherche :**  
**INRA, CIRAD, IRD**  
6 Sites instrumentés et suivis complets sur  
les compartiments des agrosystèmes

**Sénégal - 2016**  
Boue, digestat, litière  
volailles  
Maraîchage

**5 sites observati**  
**+ 3 sites associé**

**Bienvenue sur le SI du Système d'Information sur les Produits Résiduaire Organiques (SI PRO) du SOERE PRO (Système d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement).**

Le SOERE PRO est un observatoire de recherche en environnement composé de dispositifs expérimentaux au champ dédiés à l'étude des effets à long terme du recyclage agricole des PRO. Le réseau de sites est labellisé en tant que SOERE par ALLENOVI depuis 2011, avec renouvellement de la labellisation en 2015. Il est

**Systeme information INRA SOERE PRO**

- Outil archivage, harmonisation description données
- Faciliter exploitation commune origine <> effets observés

Comment accéder aux données ?

Voir quelles sont les données actuellement disponibles dans la base de données.

Le système d'information contient des données qui sont en libre accès et des données accessibles après validation d'une demande spécifique auprès des responsables scientifiques. Dans tous les cas, vous devez vous connecter avant de pouvoir interroger la base de données et extraire des données pour vos besoins.

[Se connecter](#) [Créer mes identifiants de connexion](#)

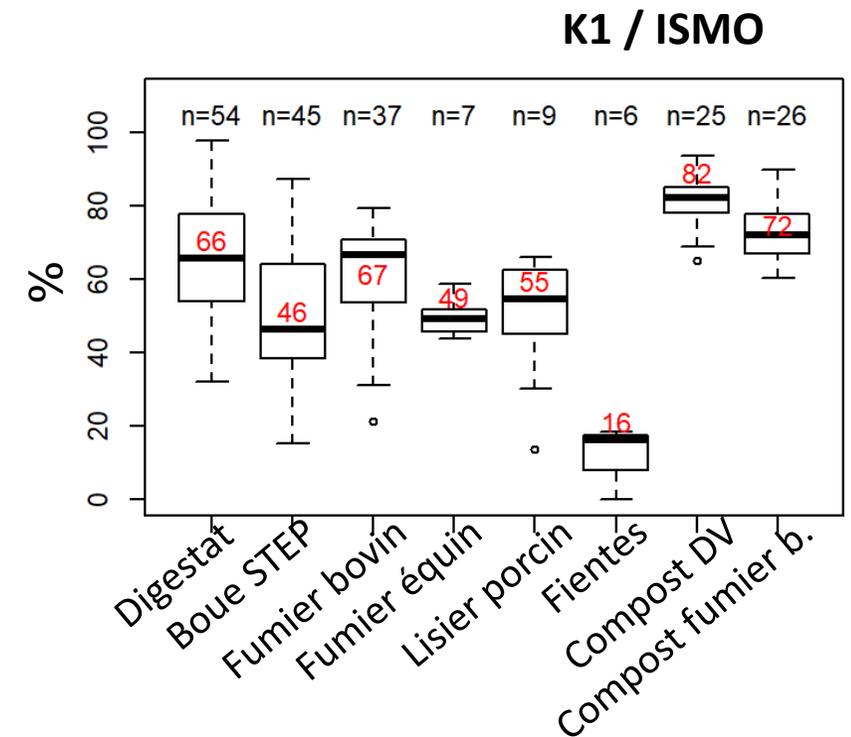
Mentions légales [Contacts](#)

saiss annuels  
gestats  
t CasDar/Ademe Réseau PRO  
eme VADIM et VADIMETHAN

## Partie 2 : Modèles et OAD pour prédire le devenir des PRO

## Dynamique de la matière organique : Les PRO dans AMG

- **Augmentation MO** : climat et sol, pratiques d'apport (dose, fréquence), valeur amendante des PRO
- **Valeur amendante** : teneur en C et coefficient isohumique  $K_1$  = fraction de C du PRO qui intègre le carbone organique du sol au bout d'un an
- **Validation des performances d'AMG** à simuler l'effet des PRO sur la base de 7 essais longue durée/ ISMO bon prédicteur du  $K_1$
- **Nouvelles valeurs par défaut pour SIMEOS-AMG** :
  - Teneurs en C issues d'une synthèse bibliographique (ESCO MAFOR...)
  - Synthèse des données d'ISMO (+ 600 PRO)
- **Domaine de validité** :
  - Forte variabilité de l'ISMO /  $K_1$  pour un même type de PRO (vraie variabilité des PRO / facteurs non pris en compte ?)
  - Non adapté à certains PRO (biochar, composts très stables)



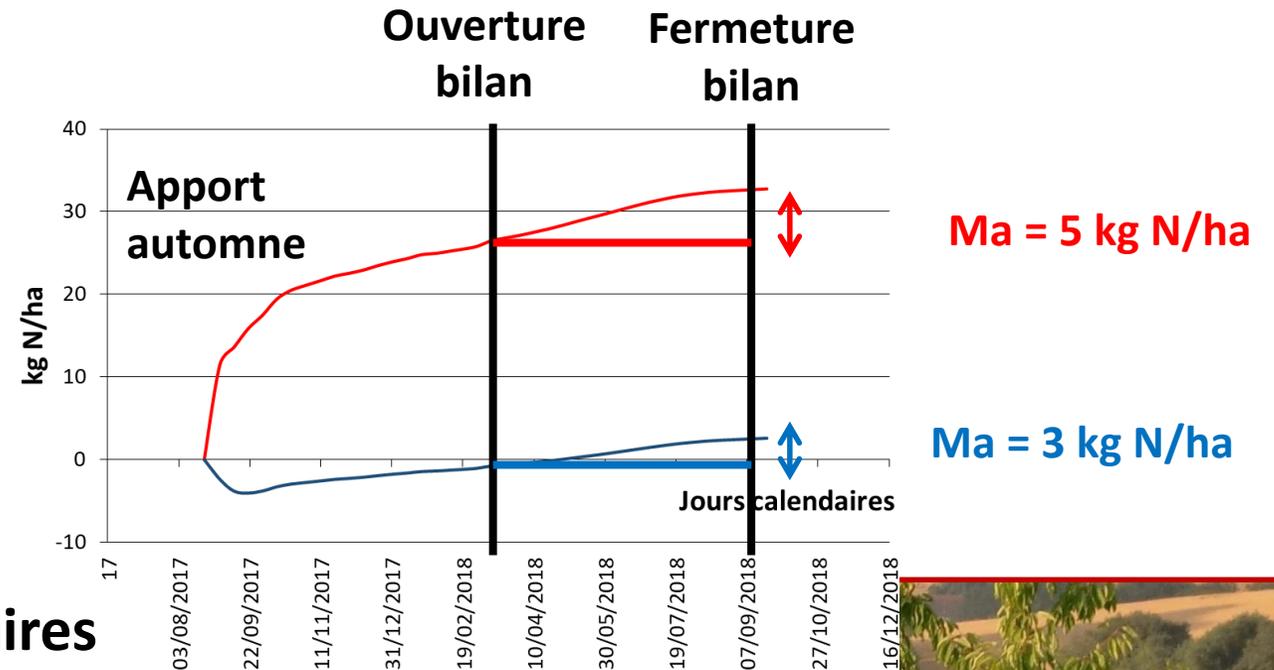
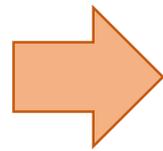
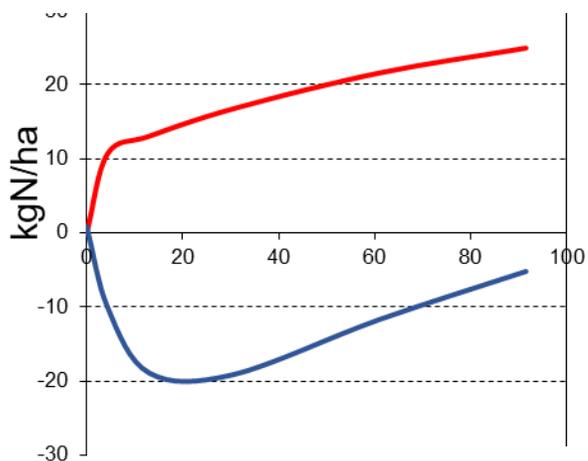
*Projet SOLEBIOM (2016-2018), Levavasseur et al., in prep*

## La décomposition des PRO (Poste Ma) dans AzoFert®

- AzoFert® > 35 PRO différents → ex : Vinasse, fumier de bovins, lombricompost, fumier de champignons...
- Cinétiques de minéralisation de l'azote →  $N_t = QN_{\text{PORG}} \times (a_N - b_N \times \exp(-kt) - c_N \times \exp(-lt))$  coefficients pour chaque PRO
- Prise en compte volatilisation et organisation
- Quantité N minéral à prendre en compte pour la fertilisation en fonction de la date d'apport du PRO et de la date d'ouverture du bilan : ex. **vinasse et fumier de bovins décomposé** pour une betterave avec ouverture du bilan le 1<sup>er</sup> Mars

### Doses d'apport :

**Vinasse = 2 t/ha** , **Fumier = 35 t/ha**



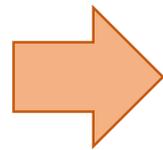
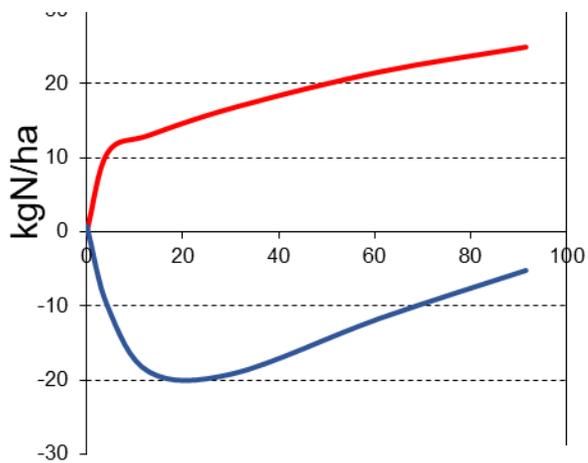
**Jours normalisés** → **Jours calendaires**

## La décomposition des PRO (Poste Ma) dans AzoFert®

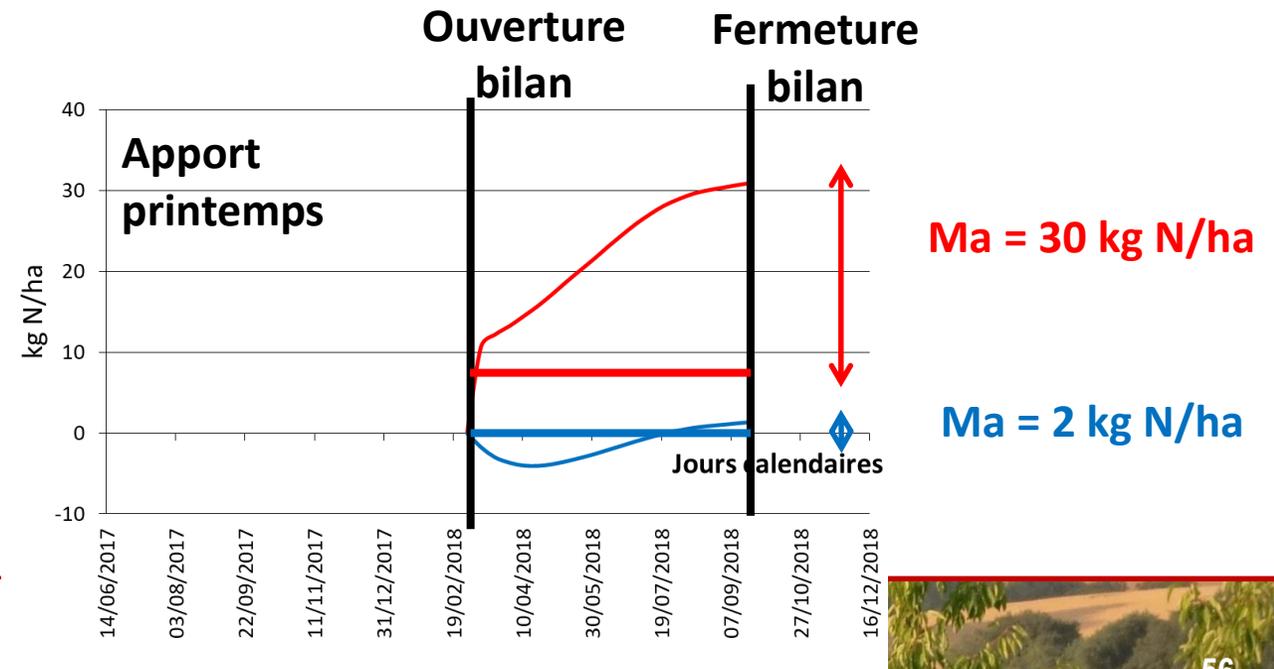
- AzoFert® > 35 PRO différents → ex : Vinasse, fumier de bovins, lombricompost, fumier de champignons...
- Cinétiques de minéralisation de l'azote →  $N_t = QN_{\text{PORG}} \times (a_N - b_N \times \exp(-kt) - c_N \times \exp(-lt))$  coefficients pour chaque PRO
- Prise en compte volatilisation et organisation
- Quantité N minéral à prendre en compte pour la fertilisation en fonction de la date d'apport du PRO et de la date d'ouverture du bilan : ex. **vinasse et fumier de bovins décomposé** pour une betterave avec ouverture du bilan le 1<sup>er</sup> Mars

### Doses d'apport :

**Vinasse = 2 t/ha** , **Fumier = 35 t/ha**



**Jours normalisés** → **Jours calendaires**



## Les PRO dans



- 25 PRO pris en compte (choix dans un menu déroulant pour l'utilisateur)

- Paramètres décrivant les PRO :

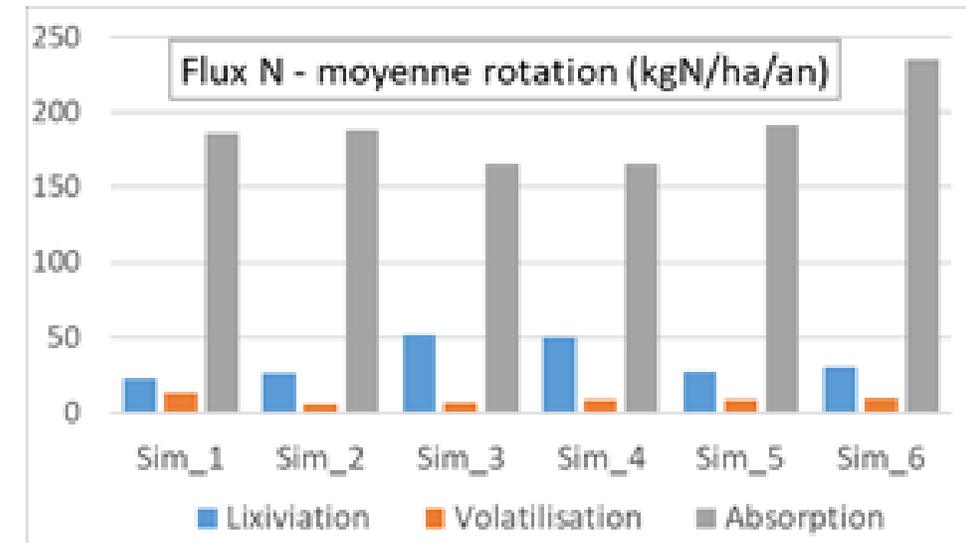
- Par défaut dans l'outil et modifiables : teneurs  $N_{tot}$ ,  $N-NH_4^+$ , MS
- Par défaut, non modifiables : pH
- (+ 5 param. cinétique de minéralisation)

|                            | Sim_1    | Sim_2    | Sim_3    | Sim_4     | Sim_5       | Sim_6       |
|----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------------|-------------|
| <b>Rotation</b>            | Maïs/blé | Maïs/blé | Maïs/blé | Maïs/blé  | Maïs/blé/Ci | Maïs/blé/Ci |
| <b>PRO</b>                 | DVB      | FB       | FB       | FB        | FB          | FB          |
| <b>Dose (T/ha)</b>         | 15       | 35-40    | 35-40    | 35-40     | 35-40       | 50          |
| <b>Période</b>             | Fin été  | Fin été  | Fin été  | Printemps | Printemps   | Printemps   |
| <b>Station</b>             | Grignon  | Grignon  | Rennes   | Rennes    | Rennes      | Rennes      |
| <b>Lame drainante (mm)</b> | 150      | 150      | 230      | 230       | 230         | 230         |

- Modélisation

- De la minéralisation du N organique des PRO  
Formalisme : celui d'AzoFert®
- De la volatilisation des PRO  
Fonction de la dose, du pH, de la MS

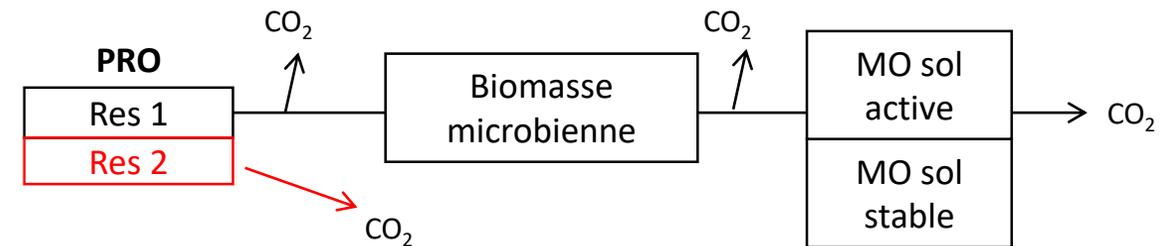
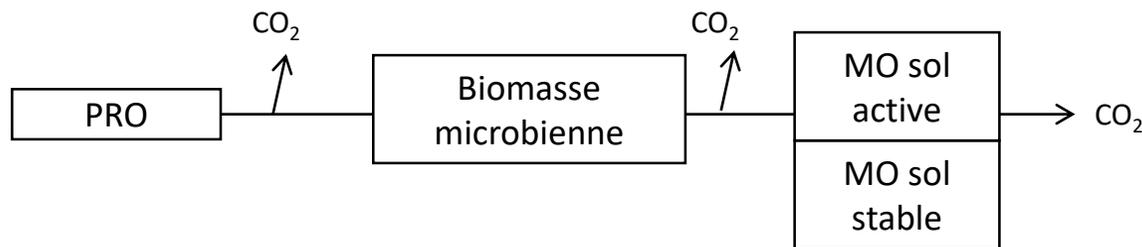
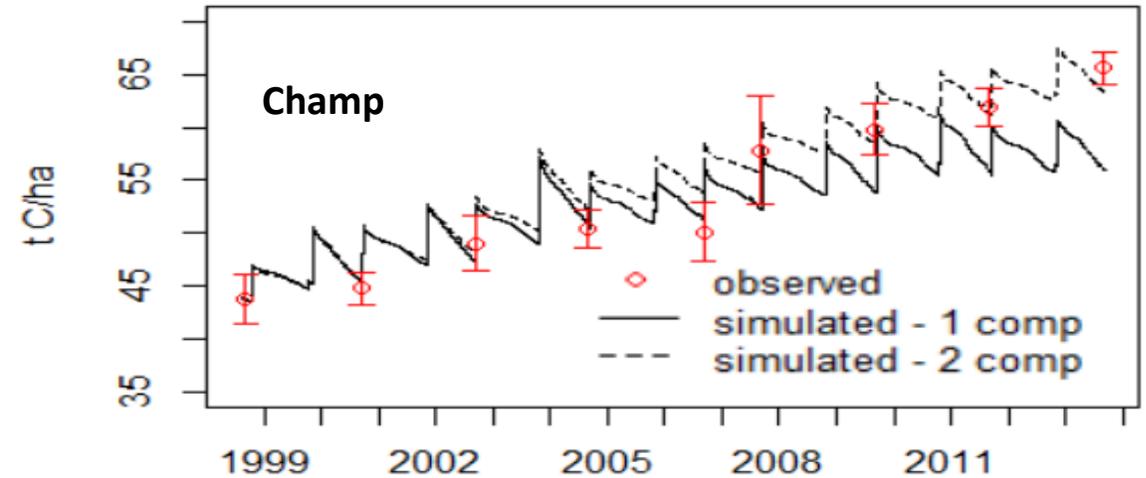
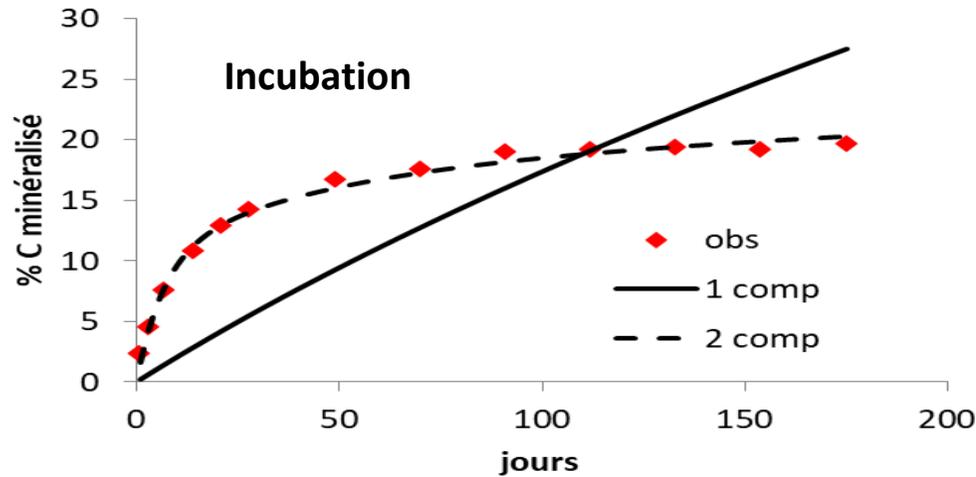
- Domaine de définition : France métropolitaine



# Représentation des PRO dans



- Formalisme de minéralisation des résidus de culture (1 compartiment MO) incapable de simuler les dynamiques C et N des incubations et du champ → Nécessité d'intégration d'un 2<sup>e</sup> compartiment



- Développement en cours d'une typologie de PRO pour STICS

Levavasseur et al., in prep

## Partie 3 : Efficience de valorisation du N des PRO

## Acquisitions de références au champ : CAU/Keq

Le protocole repose sur le principe d'une courbe de réponse de l'azote absorbé par une culture fertilisée.

Guide méthodologique Réseau PRO (2011-2014)

$$CAU_{PRO} = (Nabs_{PRO} - Nabs_{TON}) / N_{PRO}$$

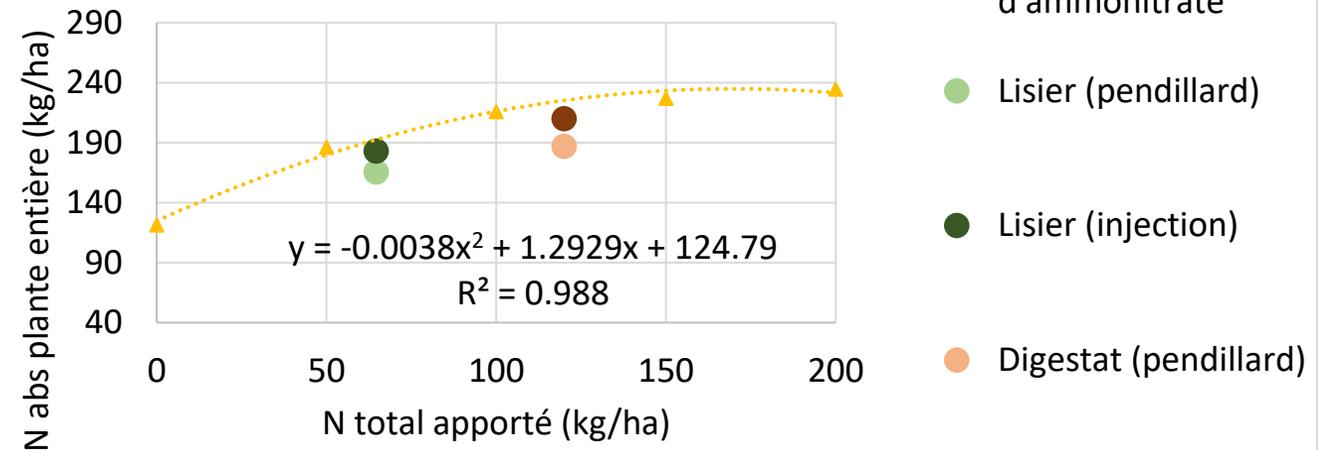
$$Keq = CAU_{PRO} / CAU_{Min}$$



calcul de la fertilisation azotée (COMIFER)

CAU: coefficient apparent d'utilisation.  
Keq: coefficient d'équivalence azote.

Courbe de réponse de l'N absorbé par le maïs grain station de Kerguéhenec (56) - 2015



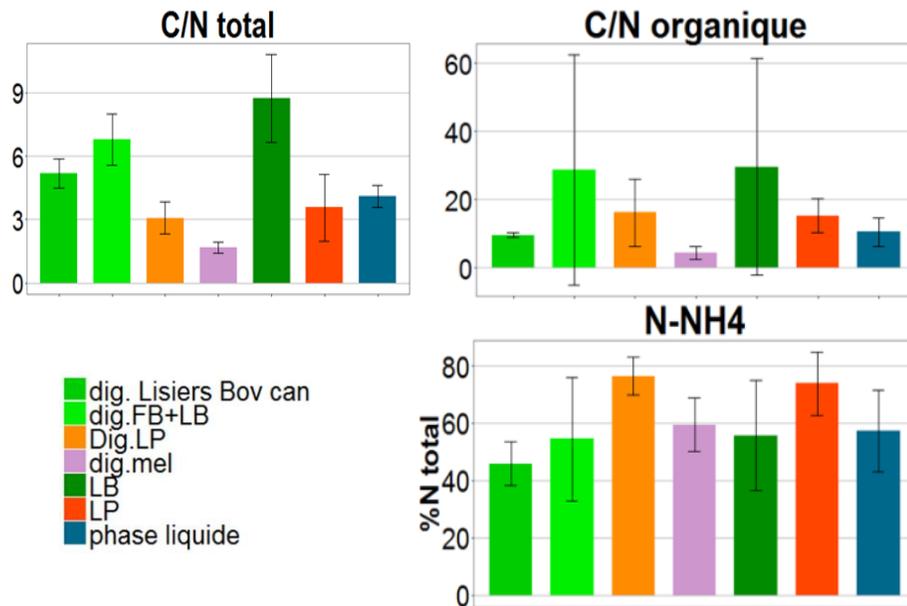
|                       | PRO | $N_{PRO}$ | $Nabs_{TON}$ | $Nabs_{PRO}$ | $Nabs_{Min}$ | $CAU_{PRO}$ | $CAU_{Min}$ | <b>Keq</b>  |
|-----------------------|-----|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Lisier (pendillard)   |     | 65        | 122          | 166          | 192          | 0.68        | 1.08        | <b>0.63</b> |
| Lisier (injection)    |     | 65        | 122          | 183          | 192          | 0.96        | 1.08        | <b>0.89</b> |
| Digestat (pendillard) |     | 120       | 122          | 187          | 225          | 0.55        | 0.86        | <b>0.64</b> |
| Digestat (injection)  |     | 120       | 122          | 210          | 225          | 0.74        | 0.86        | <b>0.86</b> |

Projet Ademe VADIM (2013-2016)

# Acquisitions de références au champ : CAU/Keq

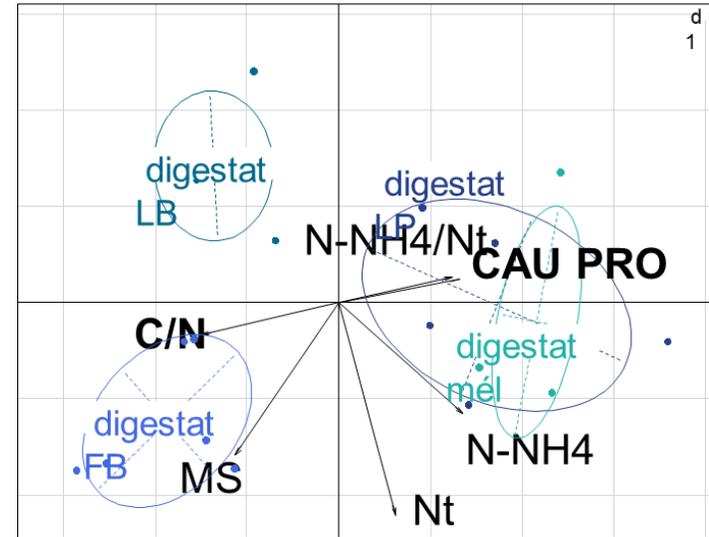
## Les déterminants du CAU des digestats

Différentiation des classes de PRO en fonction de différents paramètres analytiques.



14 PRO, 75 analyses (2011-2015)

Projets Ademe VADIM et VADIMETHAN



**C/N total** : paramètre agronomique le plus corrélé avec le **CAU** obtenu au champ sur céréales (21 essais)

Possibilité de prédire un comportement azoté en culture :

$$CAU = 0.137 + 0.007 \times N-NH_4/N \text{ total} - 0.017 \times C/N \text{ organique}$$

$R^2 = 0,56$  (que digestats)

Proposition de **Keq** des digestats sur céréales (à valider) :

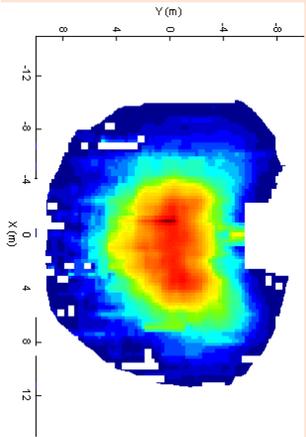
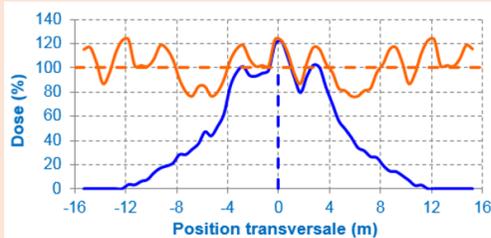
| C/N élevé (bovin) | C/N faible (lisier porc, IAA) |
|-------------------|-------------------------------|
| 0.2 - 0.4         | 0.5 - 0.7                     |

Projet Ademe VADIM (2013-2016)

# Qualité des épandages de PRO

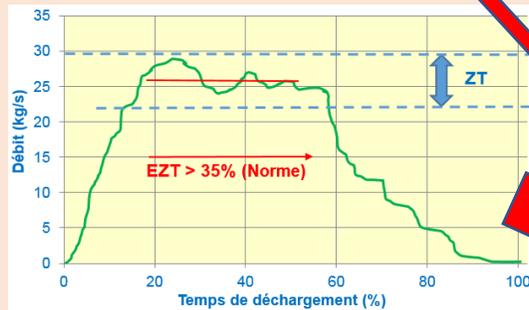
## Mesures des performances PRO solide

### Répartition Transversale (RT)



Nappe

### Répartition Longitudinale (RL)



La variabilité des mesures surtout en RL impacte la qualité de la répartition spatiale

## Banc Cemob pour mesurer les répartitions longitudinale et transversale



### Etat des lieux

La variabilité à la parcelle avec des zones sous-dosées et sur-dosées



## Des questions restant à traiter

- Prise en compte de la réalité de l'épandage dans les logiciels OAD (substitution minéral)
- Prise en compte de caractéristiques mesurées des PRO (teneurs NPK, MO, MS...) dans l'épandage

## Innovations efficaces

- Tablier accompagnateur : +++ (RL)
- Pesage ++ (masse volumique)
- Débit Prop. Avancement Electron. = (dose)
- Porte de dosage, suivi de contour +++ (RL)
- Volet de bordure + (RT)
- Gestion de section : - - (RT)

La variabilité mesurée surtout en RL est réduite avec l'emploi d'équipements de maîtrise de dose

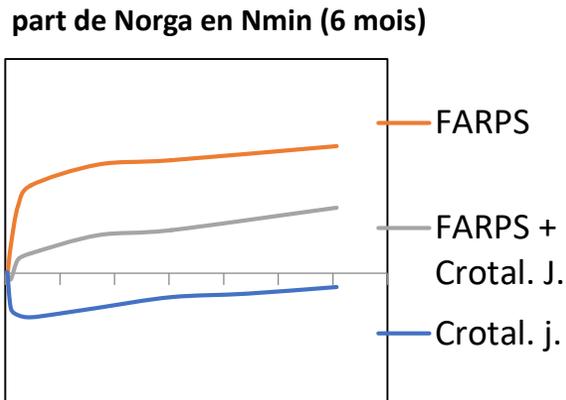
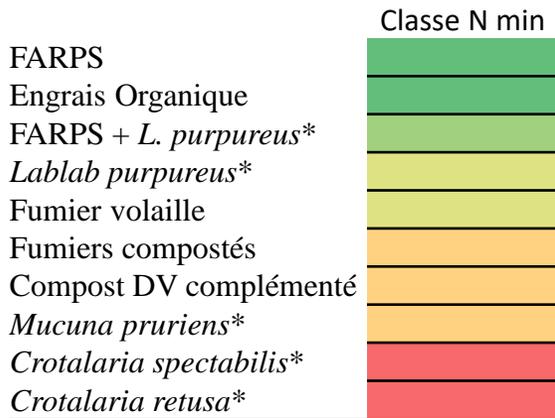
# Caractériser la diversité disponible et proposer des associations de PRO pour répondre aux besoins des cultures



**CasDAR ANANABIO (2016-2019) : Action 1 Fertilisation organique de la culture d'ananas en AB : évaluation des matériaux organiques candidats à la substitution des fertilisants minéraux**



## 1) Criblage des potentiels (purs et mélanges) *in silico*



## 2) + autres critères de sélection des Plantes de Service : biomasse, ravageurs, propriété nématocide, non-hôte → Test *in situ*

| %/300 N                      | Rdt        | Q(s/a)     |
|------------------------------|------------|------------|
| O N                          | - 6        | - 3,5      |
| FARPS                        | + 4        | - 5,3      |
| <b>FARPS + <i>Crotal</i></b> | <b>+ 5</b> | <b>+ 0</b> |

FARPS : farines de plumes et sang

Rothé et al. (2019)

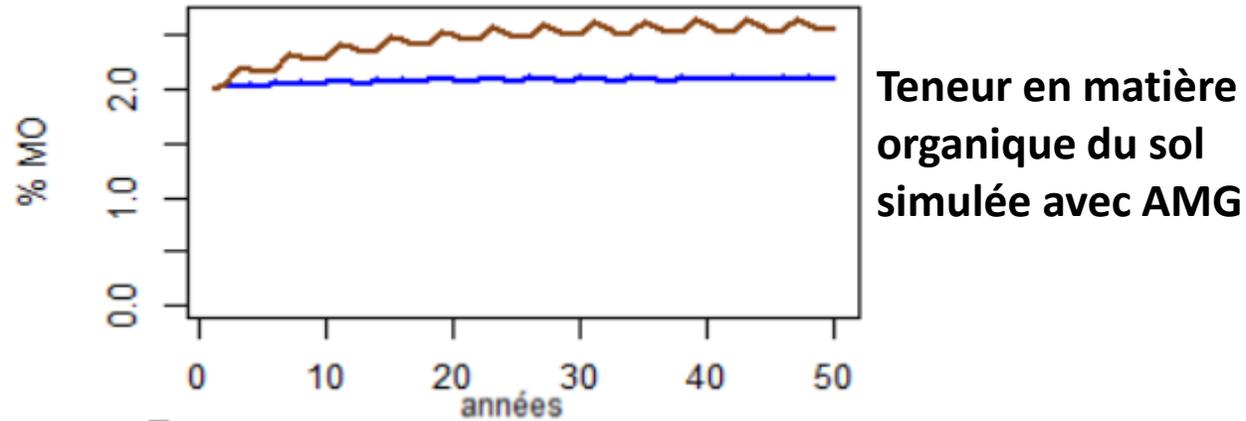
Q (s/a) : Qualité, exprimée par le rapport entre la teneur en sucre (Brix) et l'acidité



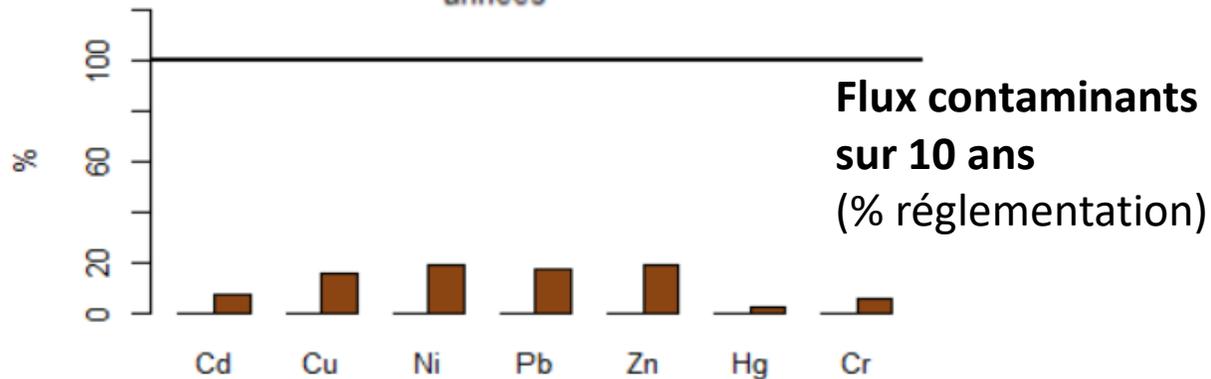
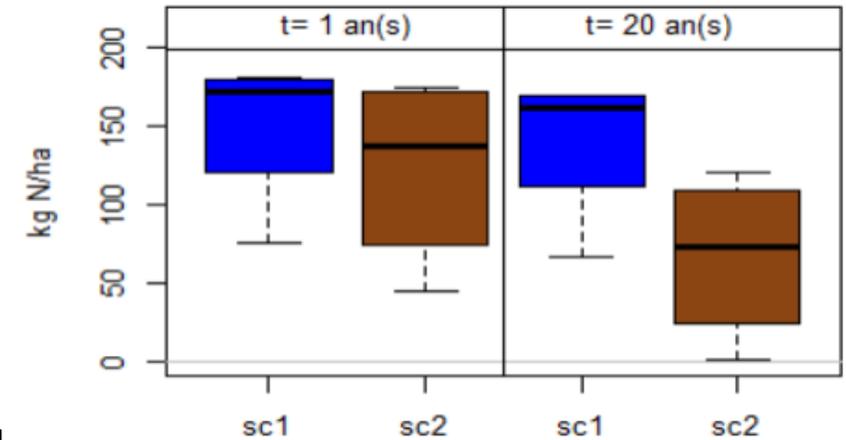
# Développement d'un outil d'évaluation multicritère prédictif des effets des PRO

Projet PS DR ProLeg (2016-2020)  
UMT Alter'N

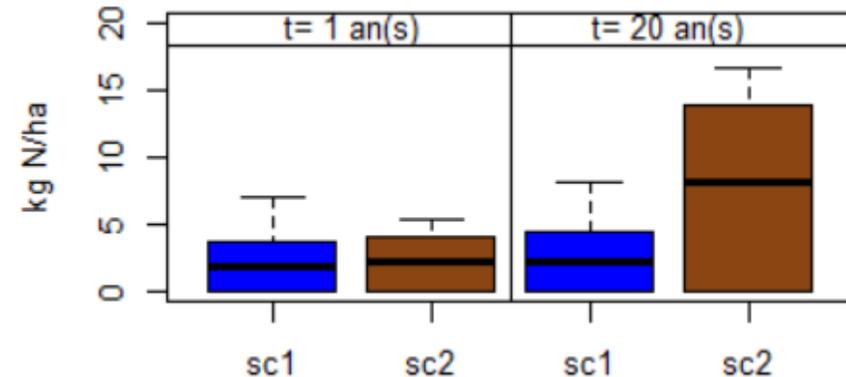
Exemple d'une rotation colza-blé-blé-orge en sols limoneux **avec** ou **sans** apport de compost (30 t/ha tous les 3 ans)



**Besoin en engrais N simulé avec STICS**



**Lixiviation N avec STICS**



+ autres indicateurs (fertilité physique, biologique, autres pertes N, économie...)

## Partie 4 : De la parcelle au territoire

# Quantifier les grands équilibres entre puits et sources : inventaires et bilans statiques à des échelles larges

Localisation, quantification des sources

Production d'engrais de PRO maîtrisables et non maîtrisables

Besoins en nutriments des cultures

Localisation des cultures

CAU, Keq

Niveau de substitution

Choix des PRO à épandre

Zones d'exclusion limitant l'épandage

N apporté par le sol

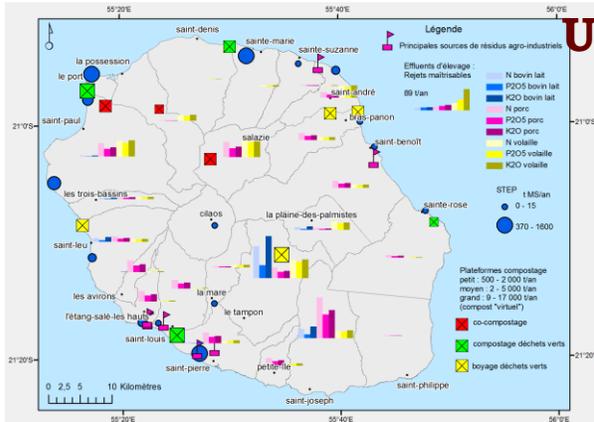
**FERTIMO**

SIG

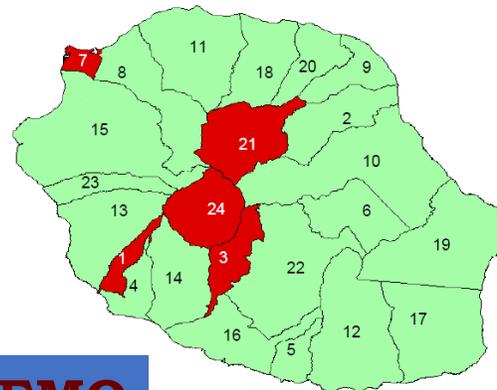
Projets :  
MVAD 2006  
CasDar Girovar (2011-2014)  
CasDar Gabir (2018-2020)

**Calcul de bilan (N essentiellement) = offre en PRO - demande des cultures**

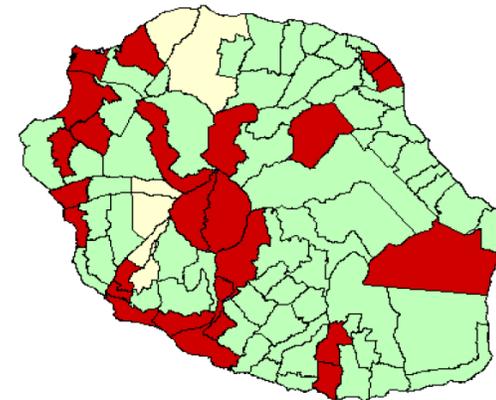
**Un « équilibre » global qui cache des déséquilibres locaux**



A l'échelle communale :



A l'échelle sous-communale :



Collo

**GEMO**

MVAD, Cirad, 2006

- (Sous) commune excédentaire en azote organique
- (Sous) commune équilibrée en azote organique
- (Sous) commune déficitaire en azote organique

19

66

# Quantifier les grands équilibres entre puits et sources : inventaires et bilans statiques à des échelles larges

Localisation, quantification des sources

Production d'engrais de PRO maîtrisables et non maîtrisables

Besoins en nutriments des cultures et des étangs

Localisation des cultures et des étangs (Vn)

CAU, Keq

Niveau de substitution

Choix des PRO à épandre

Zones d'exclusion limitant l'épandage

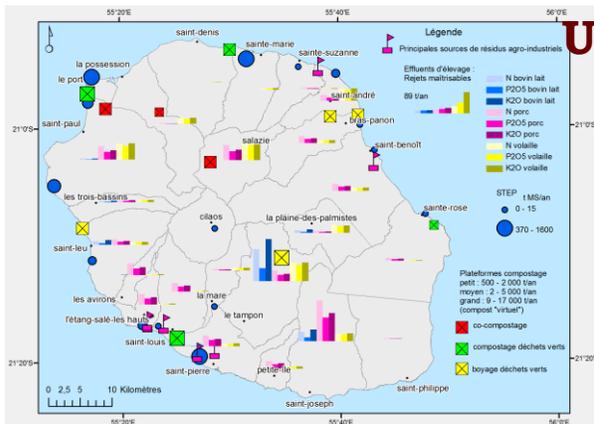
N apporté par le sol

**FERTIMO**

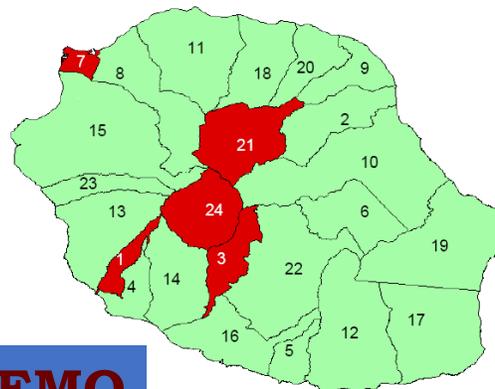
Projets :  
MVAD 2006  
CasDar Girovar 2011-2014  
CasDar Gabir 2018-2020

**Calcul de bilan (N essentiellement) = offre en PRO - demande des cultures (étangs)**

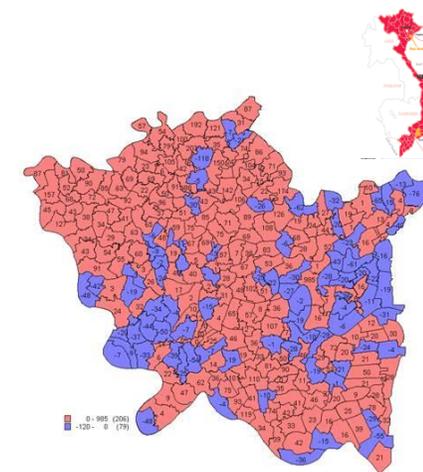
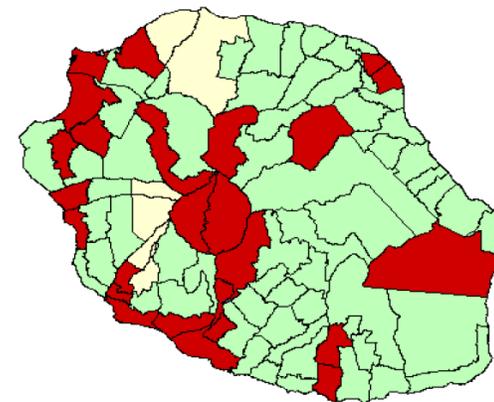
**Un « équilibre » global qui cache des déséquilibres locaux**



A l'échelle communale :



A l'échelle sous-communale :



Médoc J.M., Hillion B. In : Porphyre Vincent (ed.), Nguyen Que Coi (ed.)

Collo

**GEMO**

MVAD, Cirad, 2006

- (Sous) commune excédentaire en azote organique
- (Sous) commune équilibrée en azote organique
- (Sous) commune déficiente en azote organique

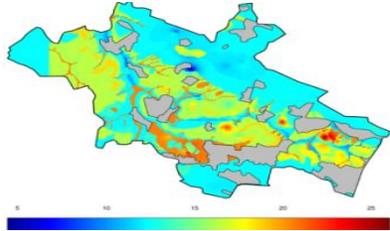
19

67

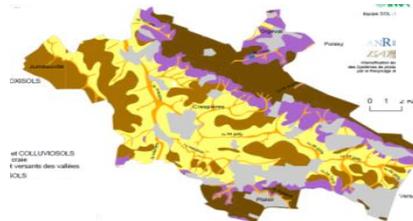
# Optimisation de l'insertion des PRO dans les systèmes de cultures

- Exemple de la Plaine de Versailles (Noirot Cosson, 2016)

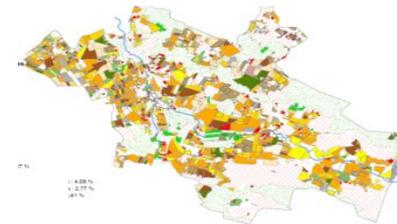
Carbone Organique des Sols (COS)



Cartographie des sols



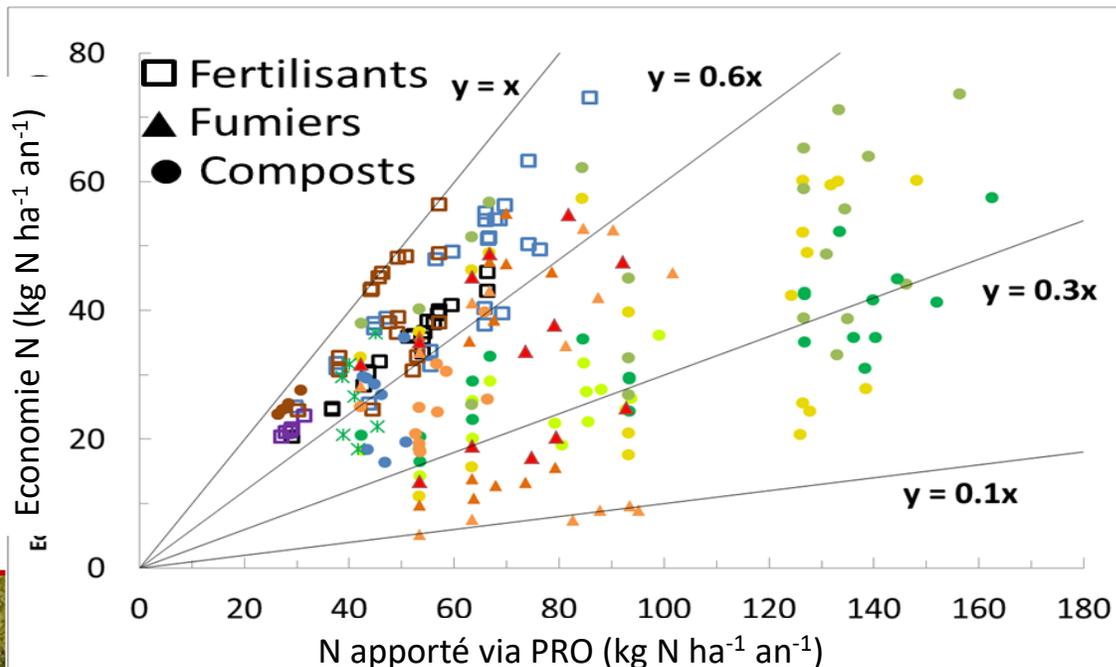
Systèmes de Culture (SdC)



Ressources en PRO

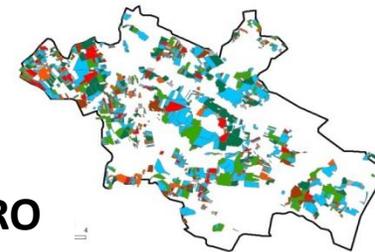


Scénarios d'utilisation des PRO prenant en compte N et P → Modélisation sur 20 ans, prise en compte augmentation MO



1 scénario = 16 simulations (4 sols x 4 teneurs initiales MO)

- Economies N synthèse:
  - ✓ PRO fertilisants > PRO amendants
  - ✓ Certains PRO amendants  $\approx$  fertilisants → moins contraint par P → Plus de N apporté
  - ✓ Effet indirect augmentation MO



## Optimisation de la distribution spatiale des PRO

|                    | Stockage C<br>tC/ha.an | Economie N<br>Kg N/ha. an |
|--------------------|------------------------|---------------------------|
| Stockage C maximum | 0.47                   | 29                        |
| Economie N maximum | 0.23                   | 53                        |



- La simulation multi-agent du fonctionnement des scénarios de gestion co-construits pour les concevoir, les dimensionner et les évaluer

- Un processus de co-construction porté par les acteurs « urbains » et « ruraux » du territoire et facilité par des chercheurs



niveau institutionnel :

légitimité



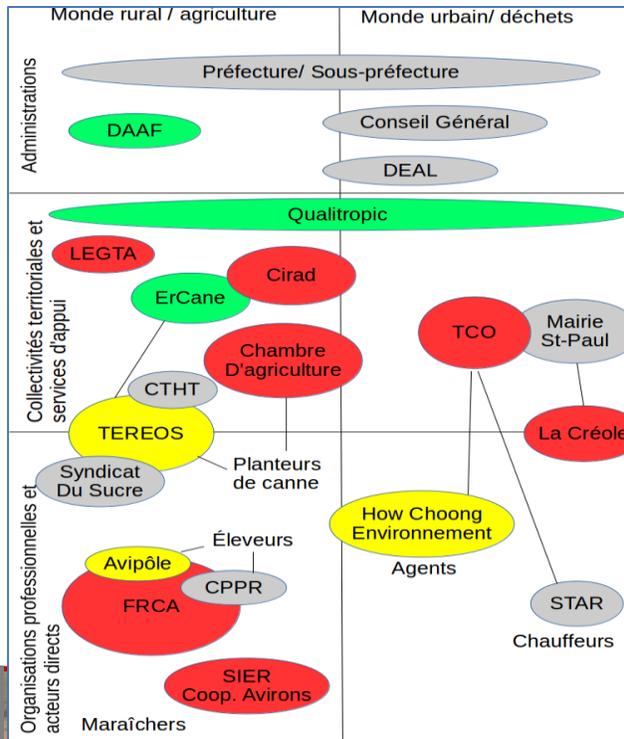
niveau technique :

crédibilité

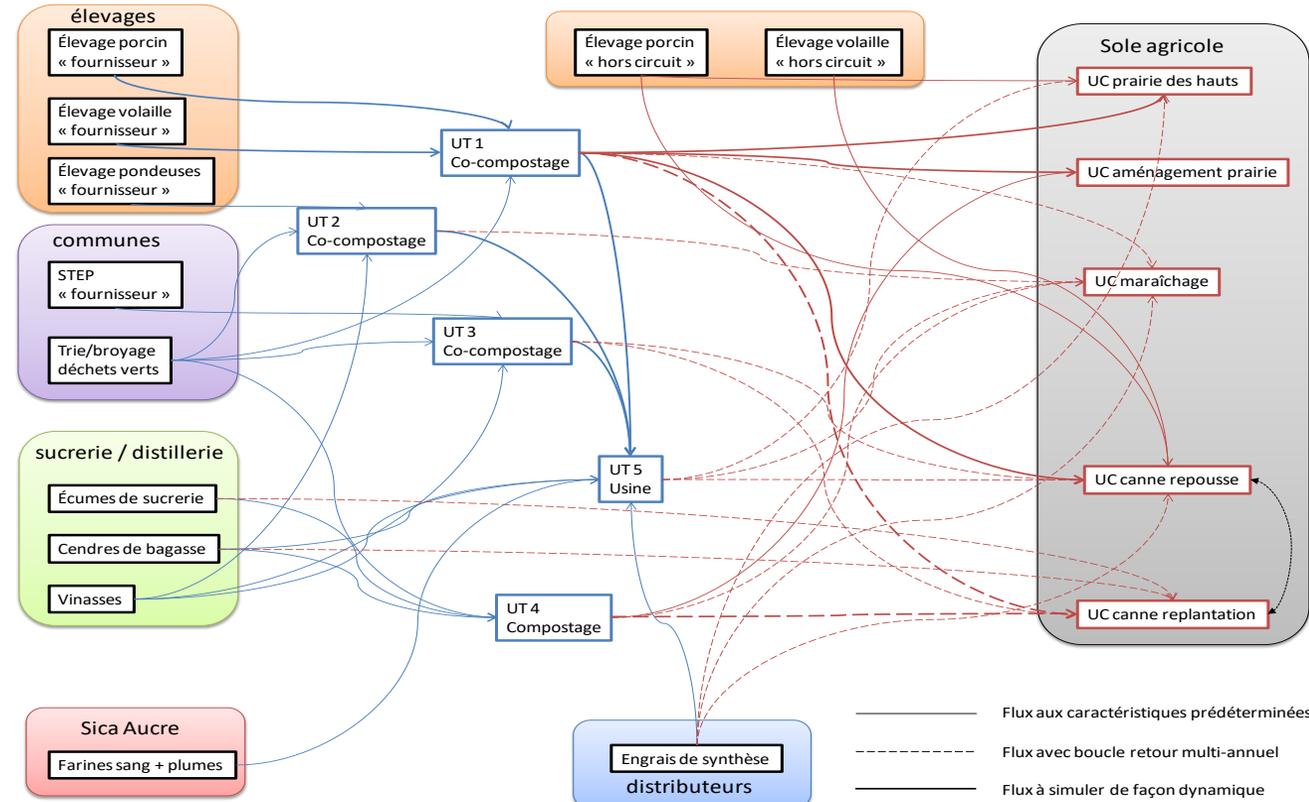


niveau professionnel :

acceptabilité



12 groupes cibles



Modèle UPUTUC → MAELIA-PRO (projet Ademe ProTerr)

# Bilan et perspectives

## • Diversité des PRO: origines, caractéristiques physico-chimiques, effets au champ

- Méthodes de caractérisation/calculateurs → caractéristiques physico-chimiques
- Liens origines – caractéristiques : typologie de PRO
- Méthodes de labo → prédire l'effet au champ
- Bases de données de références analytiques et au champ

- Liens origines – caractéristiques – devenir au champ : **Typologies étendues**
- BDD: tous les types de PRO
- Valider passage labo-champ

## • OAD et modèles

- Syst'N et AzoFert® : 25 à 35 PRO paramétrés
- Modèle AMG paramétré pour PRO
- Réflexion en cours sur évolution STICS

- Élargir à tous les types (classes) de PRO
- Lien paramètres modèles et caractéristiques PRO

## • Efficience

- **Epandage**: homogénéité, enfouissement...
- Lien avec les **caractéristiques physico-chimiques**
- **Synergie** entre pratiques
- **Multicritères** et effet d'apports répétés

- Prise en compte épandage dans OAD
- Prise en compte des systèmes de culture dans leur durée

## • Perspectives : passage au territoire

- Ressources: exploitation → territoire
- Optimisation des apports pour maximiser les effets ; quels leviers pour optimiser ces usages ?
- Prise en compte des acteurs et de leurs règles de décision

Plate forme multi-agents, multi-critères : **MAELIA**



## RMT Fertilisation & Environnement

**Quantifier les fuites d'azote vers l'environnement  
pour mieux les réduire**

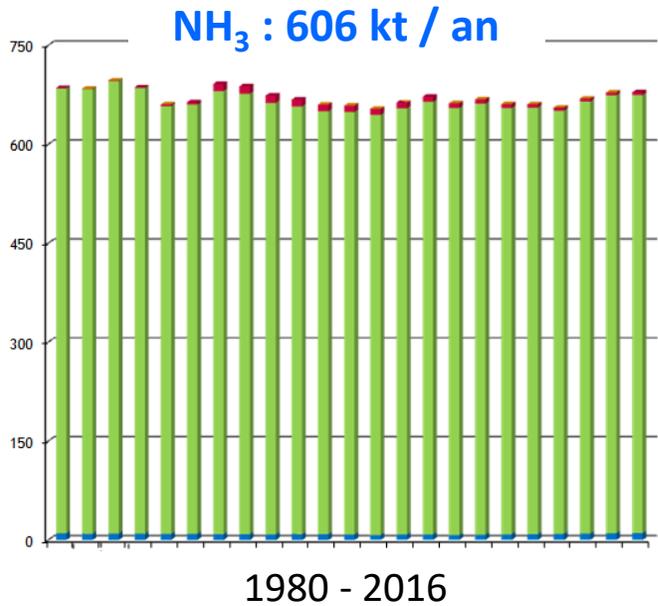
Le Gall C., Parnaudeau V., Soenen B., Générmont S.



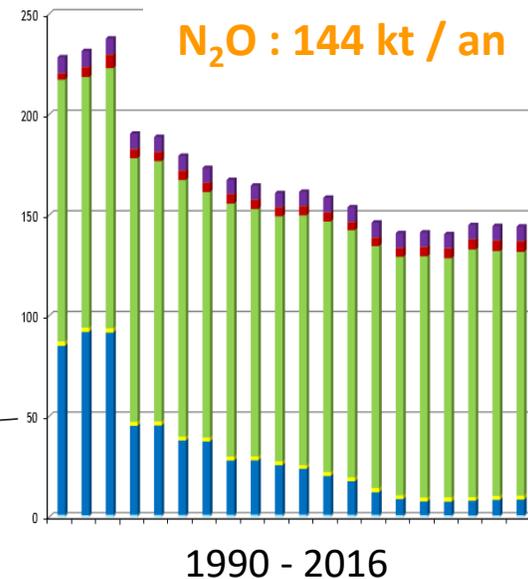
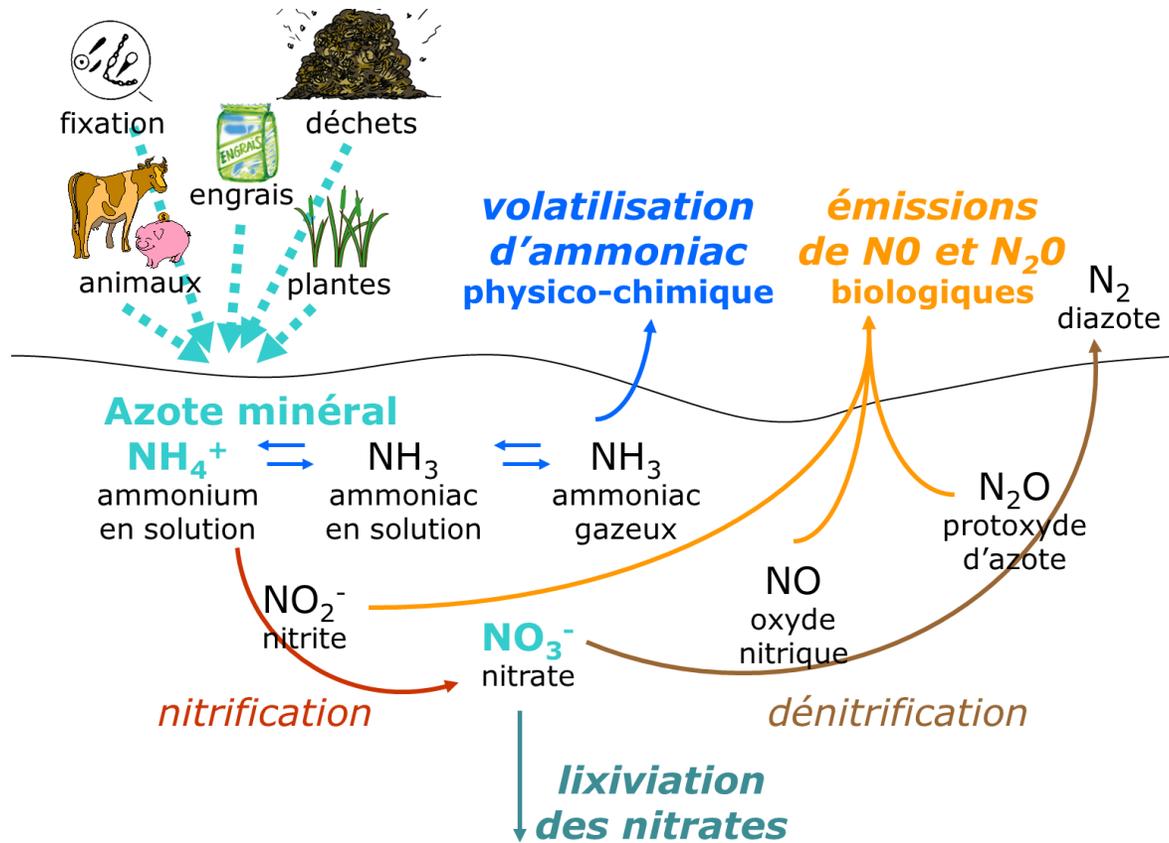
## Pourquoi s'intéresser aux pertes d'azote ?

- **Contexte scientifique et politique : un œil braqué sur les pertes d'azote**
  - Contexte scientifique : de plus en plus de questions posées sur le devenir de l'azote "hors du champ"
    - **Au départ, focus sur les pertes vers l'eau (nitrate) puis une ouverture sur le compartiment air ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NOx}$ ...)**
  - Contexte politique : une prise en compte de plus en plus importante des impacts de l'agriculture sur l'environnement
    - **Directive Cadre sur la qualité de l'eau**
    - **Directive Cadre sur la qualité de l'air**
    - **Directive Energie Renouvelable**
- **L'azote n'est pas le seul composé problématique...**
  - **Phosphore** : eutrophisation des milieux aquatiques
  - Métaux lourds, COV, HAP etc.
- **...mais c'est un composé très réactif et très difficile à gérer**

# D'où viennent les fuites d'azote ?



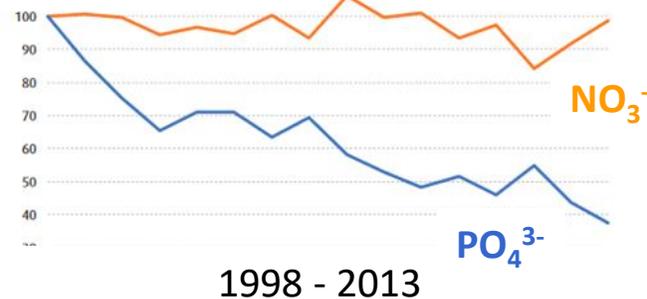
Elevage (déjections animales) : 64%  
Cultures (engrais minéraux) : 34%



Cultures (engrais) : 82%  
Elevage : 4,5%

**NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub> : 814 kt**  
(que combustion)  
+ sources "biologiques" :  
émissions par les sols +  
effluents d'élevage = 11%

## Indices de pollution des cours d'eau



Agence de l'eau, 2015



s, le 19 septembre 2019

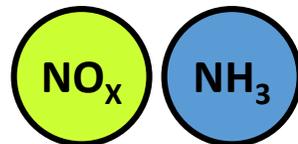
## Quels en sont les impacts ?



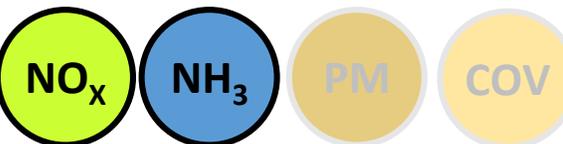
Réchauffement de l'atmosphère



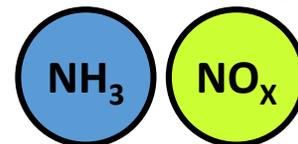
Acidification



Dégradation de la qualité de l'air



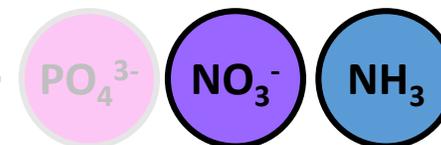
Baisse de la biodiversité



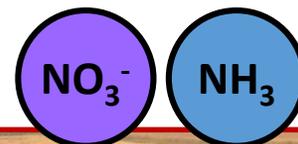
Trou dans la couche d'ozone



Dégradation de la qualité des eaux de surface et de mer



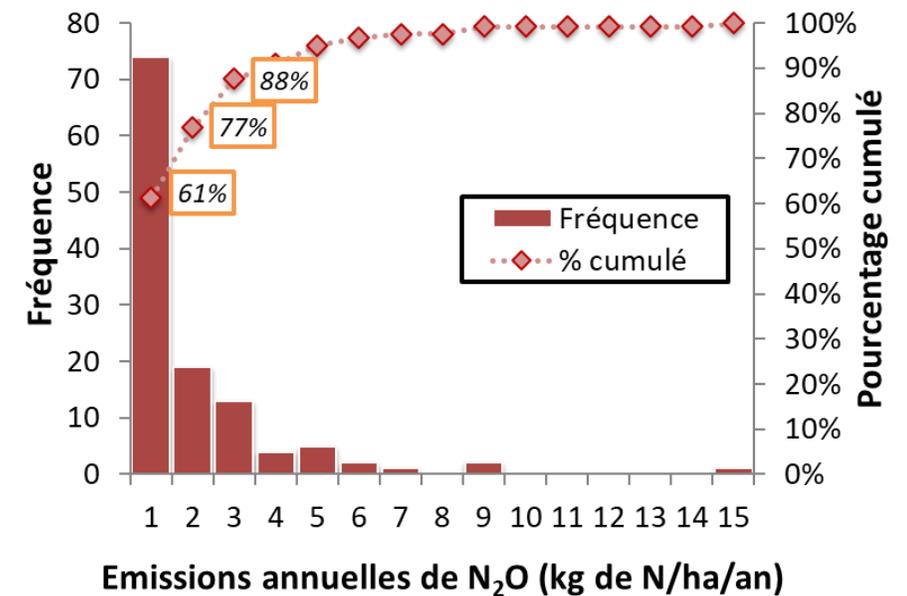
Pollution de l'eau potable



# 1 – Comprendre et quantifier les pertes

- Un fort enjeu sur la compréhension des mécanismes
  - Avec un focus sur les pertes gazeuses
- Appuyé par un gros effort d'acquisition de références
  - Au laboratoire : caractérisation des potentiels d'émission  $N_2O$  et  $NH_3$  des PRO et des sols
  - Dans les conditions de la pratique agricole française
    - Variabilité des émissions au niveau français
    - Effet du pédoclimat
    - Effet des pratiques
      - ✓ Dont focus sur l'effet du type d'engrais

Ex. du travail d'acquisition de références réalisé : bilan des émissions  $N_2O$  observé à l'échelle France



(BDD NO GAS 2)

## Acquisition de références au champ : focus sur $\text{NH}_3$

- Un travail de recherche engagé depuis plusieurs années pour comprendre les causes et modéliser les processus
  - Premières acquisitions de référence, mais avec des dispositifs relativement lourds
- Le déploiement de l'acquisition de références à une échelle territoriale nécessitait d'abord la mise au point d'une méthode d'acquisition de référence fiable mais plus « simple » à mettre en œuvre
  - Adaptation d'une méthode de suivi des concentration  $\text{NH}_3$  atmosphérique pour la mesure dans des dispositifs d'expérimentation analytique (projet Volat' $\text{NH}_3$ )
- Déploiement de la méthode au niveau national pour construction d'un jeu de références français dans le cadre de plusieurs projets :
  - *Volat' $\text{NH}_3$  (2009-12): centré sur l'adaptation de la méthode et son déploiement*
  - *EvaPRO (2016-19) : centré sur les PRO et les leviers d'atténuation*
  - *EvaMIN (2017-20) : centré sur les engrais minéraux et les leviers d'atténuation*

## Acquisition de références au champ : focus sur $\text{NH}_3$

- Volat $\text{NH}_3$ , EVAPRO, EVAMIN : les références acquises

### Un réseau expérimental conséquent :

- 50 essais (19+17+14) et 130 modalités testées (51+28+51)
- 6 cultures différentes (sol nu, blé, orge, colza, maïs, betterave, prairie)
- 3 leviers MIN (forme, inhibiteurs, enfouissement) et 4 leviers PRO (choix du produit, technique d'apport, enfouissement, traitement des PRO)

### Quelques exemples marquants :

# Acquisition de références au champ : focus sur NH<sub>3</sub>

- VolatNH3, EVAPRO, EVAMIN : Exemples de résultats expérimentaux EvaMIN (2016-2018)

## Lien entre sensibilité à la volatilisation et efficacité agronomique

4 essais blé (2016-2018)  
2 essais maïs (2016-2017)



39 essais blé (2013-2018)  
ACOLYANCE, ARVALIS,  
SOUFFLET et VIVESCIA

| Comparaison / Ammonitrate | Urée     | Urée +NBPT         | Solution N | Solution N +NBPT   |
|---------------------------|----------|--------------------|------------|--------------------|
| %N volatilisé             | +13.1**  | -0.5 <sup>NS</sup> | +9.4**     | +1.6 <sup>NS</sup> |
|                           | 6 essais |                    | 4 essais   |                    |

Test statistique en comparaison à la référence Ammonitrate (comparaison de moyennes appariées) :

\*\* : Différence significative au seuil de 5 %.  
NS : différence non significative

| Comparaison / Ammonitrate | Urée      | Urée +NBPT         | Solution N | Solution N +NBPT |
|---------------------------|-----------|--------------------|------------|------------------|
| CAU (%)                   | -3.6**    | +1.7 <sup>NS</sup> | -10.1***   | -5.4***          |
|                           | 39 essais |                    | 25 essais  |                  |

Test statistique en comparaison à la référence Ammonitrate (comparaison de moyennes appariées) :

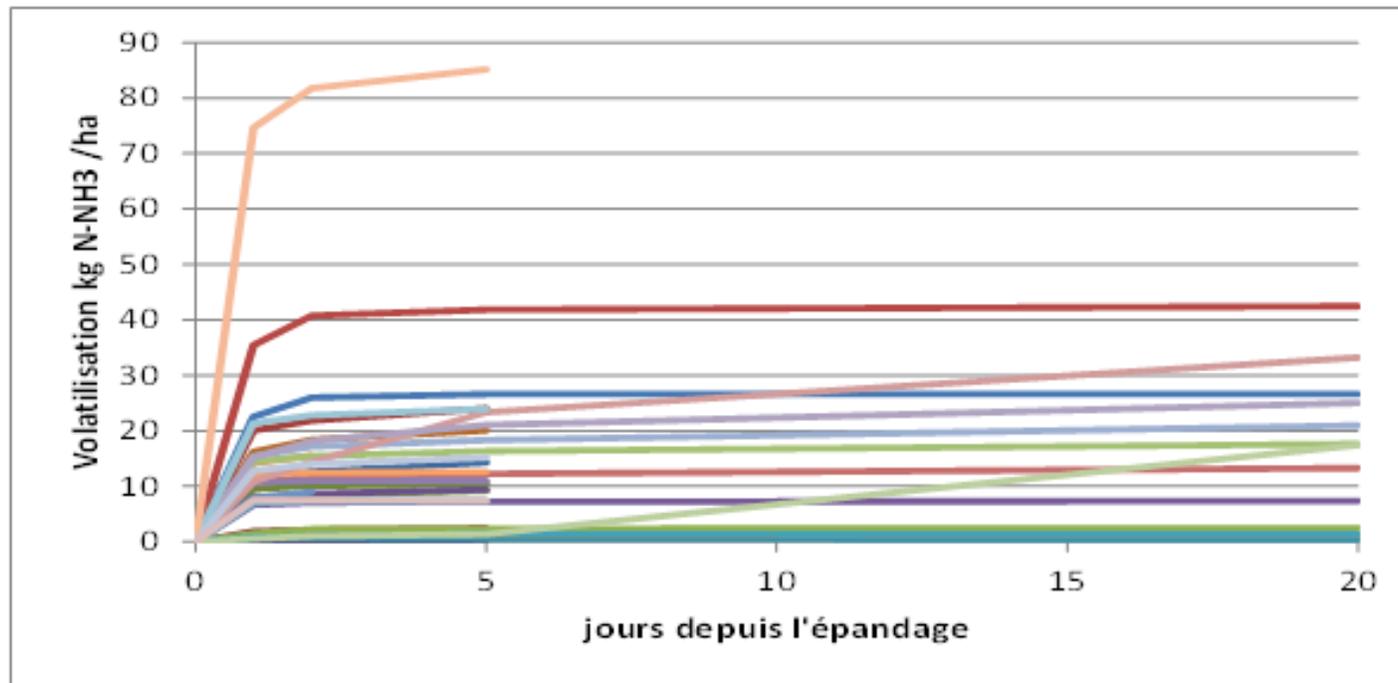
Différence significative au seuil de 5 % (\*\*), 1% (\*\*\*)  
NS : différence non significative

**La Solution N est moins sensibles à la volatilisation ammoniacale que l'urée, mais son efficacité agronomique est moindre → effet forme physique ?**

## Acquisition de références au champ : focus sur $\text{NH}_3$

- VolatNH3, EVAPRO, EVAMIN : Exemples de résultats expérimentaux EvaPRO (2016-2017)

### Ensemble des cinétiques de volatilisation d'azote ammoniacale cumulée



Perte d'azote par volatilisation ammoniacale allant de 0.3 à 85.2 kg de N/ha  
2 cinétiques particulières fumier de poulet de chair et fientes sèches : N uréique ?

# 1 – Comprendre et quantifier les pertes

L'ensemble des connaissances et données acquises ont permis:

- De mieux comprendre les processus et identifier les leviers pour réduire les pertes
  - Les tester sous différentes conditions de pédoclimat
- **Améliorer les outils et modèles s'attelant à l'estimation et la prédiction des pertes (formalismes et paramétrages)**

## 2 – Estimer et prédire les émissions

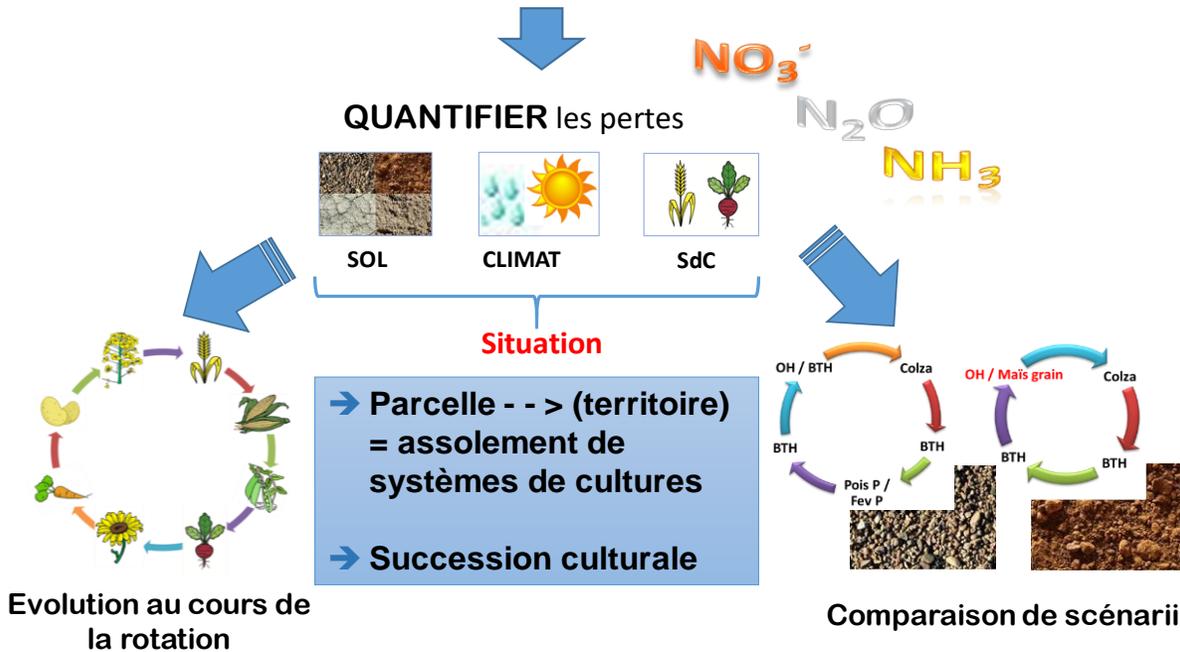
- Evaluer et faire évoluer les modèles et les outils de raisonnement et de diagnostic : un exemple concret avec l'outil de diagnostic **Syst'N**

## 2 – Estimer et prédire les émissions

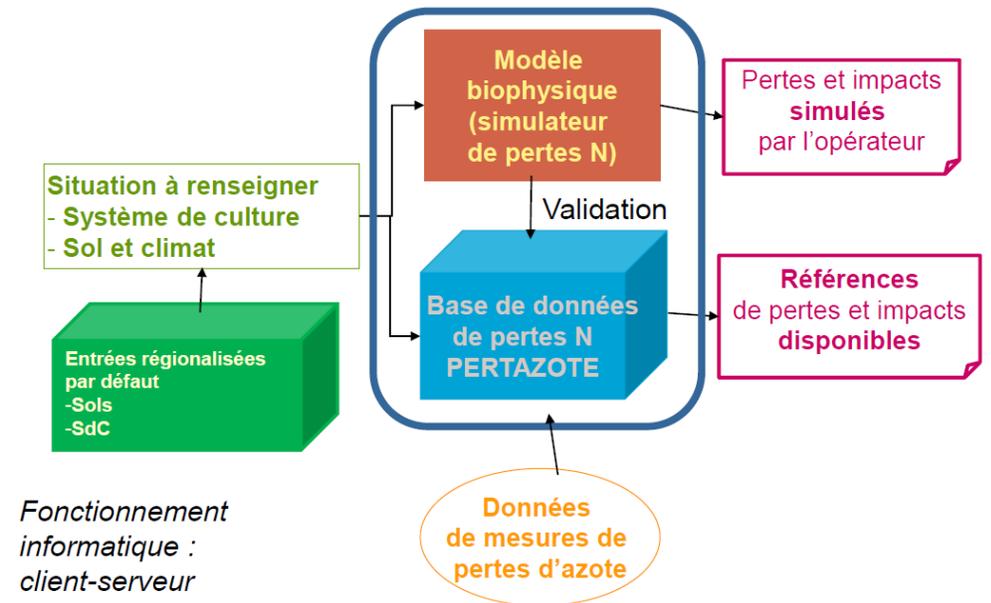
- Evaluer et faire évoluer les modèles et les outils de raisonnement et de diagnostic : un exemple concret avec l'outil de diagnostic **Syst'N**



➤ Outil conçu pour **développer le diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture**



➤ Basé sur un modèle dynamique adossé à plusieurs bases de données

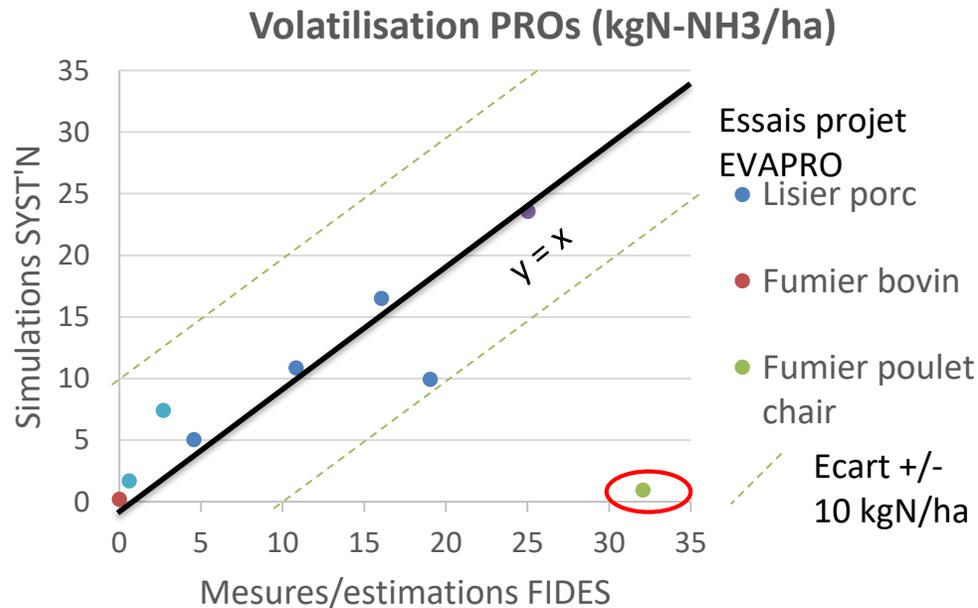


## 2 – Estimer et prédire les émissions

- Evaluer et faire évoluer les modèles et les outils de raisonnement et de diagnostic : un exemple concret – l'outil **SystN** : **Quelles évolutions permises par les connaissances et références acquises?**

### - réalisées dans des projets de recherche

Exemple du projet *ADEME EVAMIN (2017-2019)*  
Résultats relatifs aux essais EVAPRO avec les PROs paramétrés dans l'outil



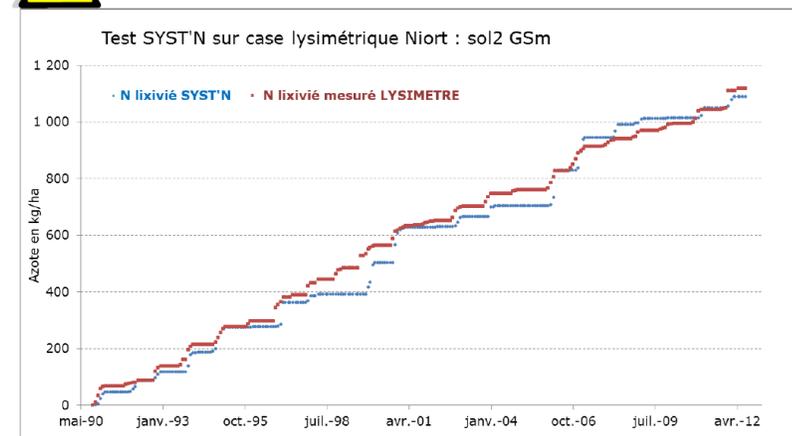
### - réalisées par les usagers

Exemple de la *CA79 en 2014 (M. Guiberteau)* : résultat de lixiviation sur 20 ans, après saisie de la description du sol de la case lysimétrique

#### Calage sur case lysimétrique



Attention à bien caler les types de sols des situations !



## 2 – Estimer et prédire les émissions

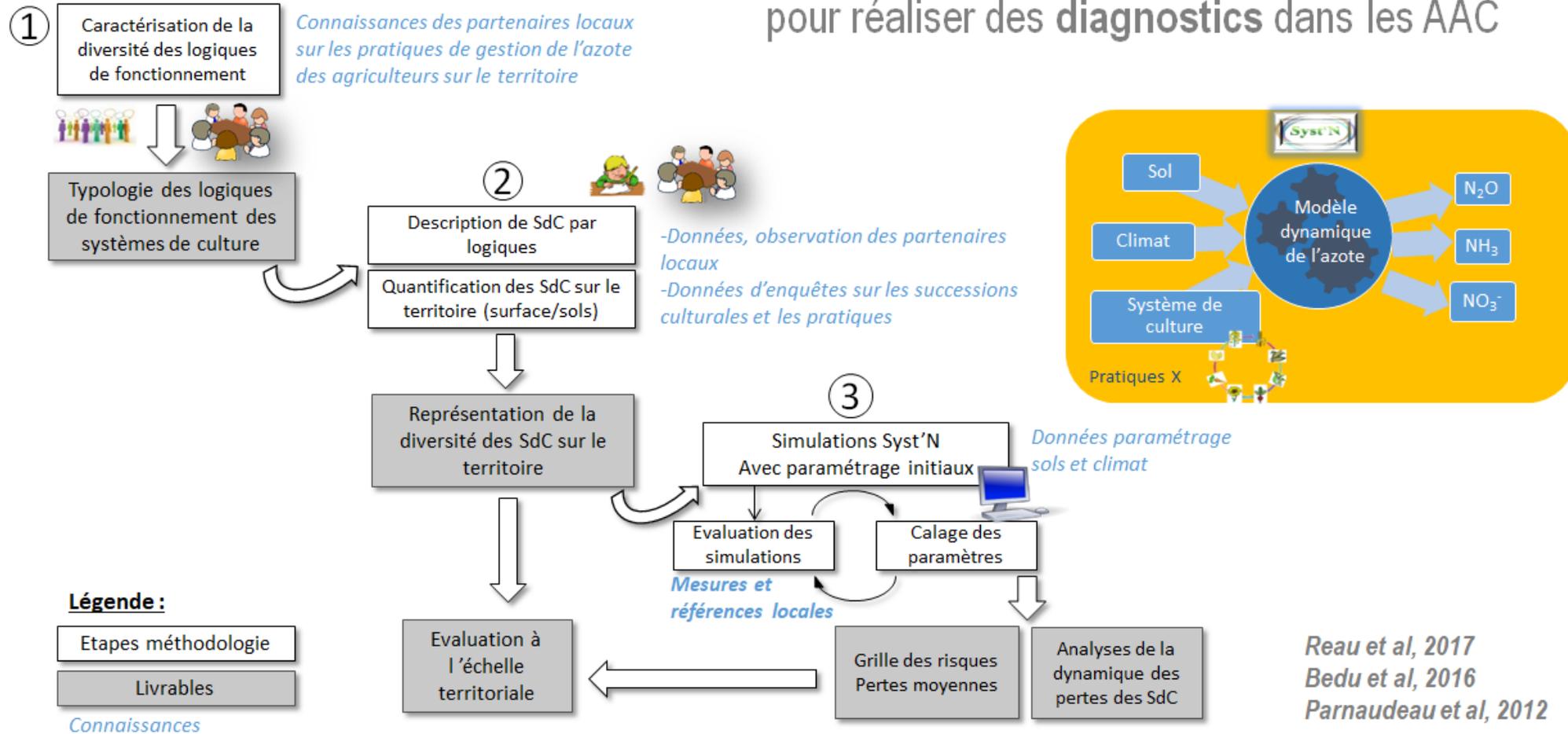
- Ces travaux ont alimenté d'autres démarches :
  - Estimer et prédire les émissions à l'échelle supra-parcellaire, sur de petits territoires

*Ex : échelle du bassin versant pour les pertes de nitrate – diagnostic réalisé avec SystN dans les Aires d'Alimentation de Captage (AAC)*



## 2 – Estimer et prédire les émissions

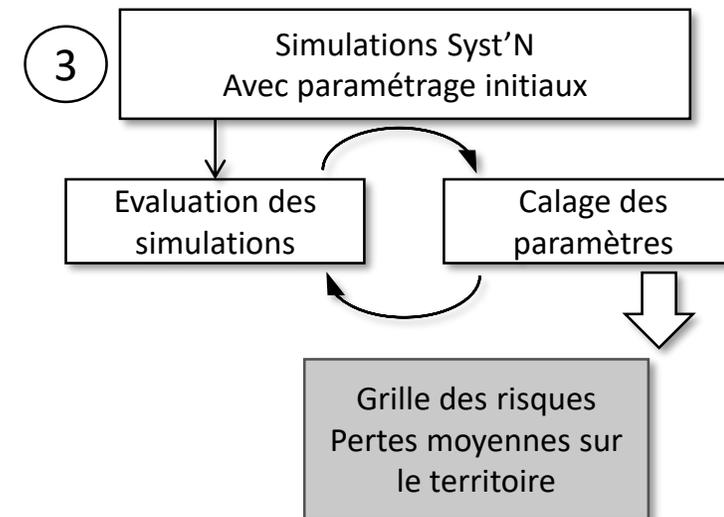
### Utilisation de Syst'N® pour réaliser des diagnostics dans les AAC



## 2 – Estimer et prédire les émissions

Utilisation de Syst’N®  
pour réaliser des diagnostics dans les AAC

| Gestion pluriannuelle |                         | Sans couvert        |                             | Couvert réglementaire |                             | Couvert pour vider le sol |                             | Couvert pour la biomasse |
|-----------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Fréq. Apports O.      | Succession des Cultures | 0 carence N visible | 0 carence N avec impact rdt | 0 carence N visible   | 0 carence N avec impact rdt | 0 carence N visible       | 0 carence N avec impact rdt | 0 carence N visible      |
| /                     | C+B.O+                  | 22                  | 22                          | 18                    | 18                          | 15                        | 15                          | 5                        |
| /                     | C+B+Op+                 |                     |                             | 17                    | 17                          | 6                         |                             | 4                        |
| /                     | C+B.B.O+                | 25                  |                             |                       |                             | 20                        |                             |                          |
| /                     | C+B+P+B.O+              | 28                  |                             |                       |                             | 14                        | 14                          |                          |
| /                     | C+B+M.B.O+              |                     |                             |                       |                             | 13                        |                             |                          |
| /                     | C+B+Op.B+O+             |                     |                             |                       |                             |                           |                             | 6                        |
| /                     | C+B.O+P+B.O+            | 29                  |                             | 23                    | 23                          | 17                        |                             |                          |
| /                     | C+B.O+T.B.O+            |                     |                             |                       | 23                          |                           |                             |                          |
| /                     | C+B+T+C+B.O+            |                     |                             |                       | 18                          |                           |                             |                          |



### Légende :

Etapes méthodo

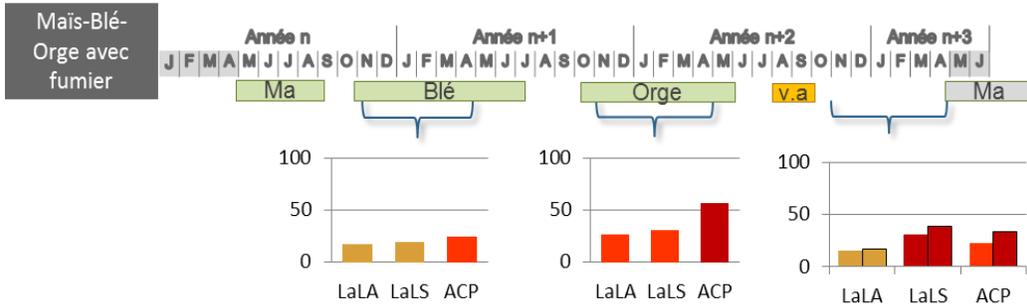
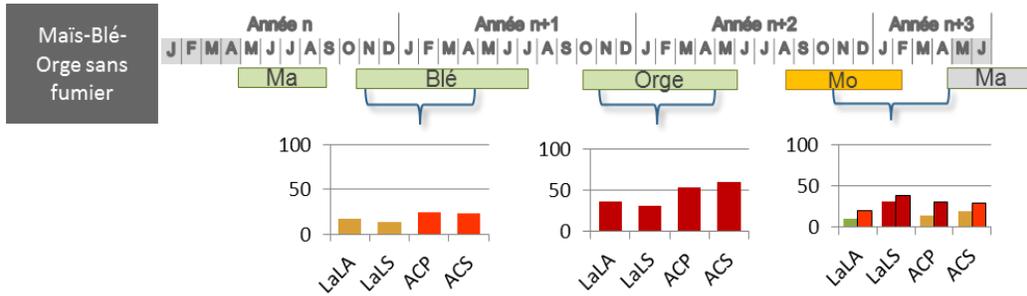
Livrables rapport AAC



## 2 – Estimer et prédire les émissions

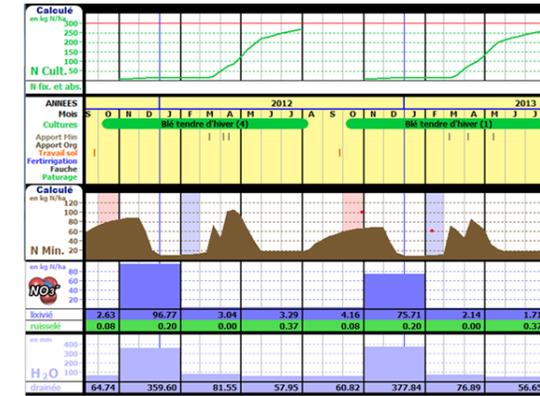
Utilisation de Syst'N®  
pour réaliser des diagnostics dans les AAC

Exemple :

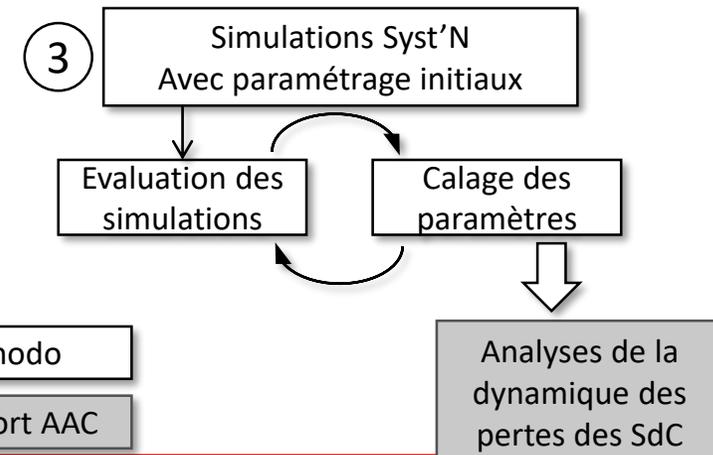


**Légende :**

- 0 à 10kgN/ha
  - 10 à 20kgN/ha
  - 20 à 30kgN/ha
  - > 30 kgN/ha
  - Pertes avec C.I. peu efficaces
- Etapes méthodo  
Livrables rapport AAC



Valoriser les sorties Syst'N permettant de mieux comprendre la dynamique des flux de N



## 2 – Estimer et prédire les émissions

- Ces travaux ont alimenté d'autres démarches :
  - Estimer et prédire les émissions à l'échelle supra-parcellaire, de petits territoires
  - Faire évoluer les méthodes de calcul / d'estimation des émissions pour d'autres applications : réalisation des inventaires nationaux d'émissions, l'évaluation multicritère, etc.
  - Faire le lien avec leurs impacts : ACV

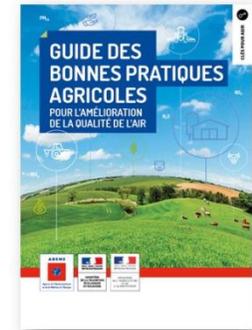
## 2 – Estimer et prédire les émissions

Ces efforts conséquents ont permis, au fur et à mesure :

- D'identifier, pour chaque levier testé, les plus efficaces (en fonction du contexte)
- **En les combinant au sein du système de culture, travailler à aller vers des systèmes « moins émetteurs »**

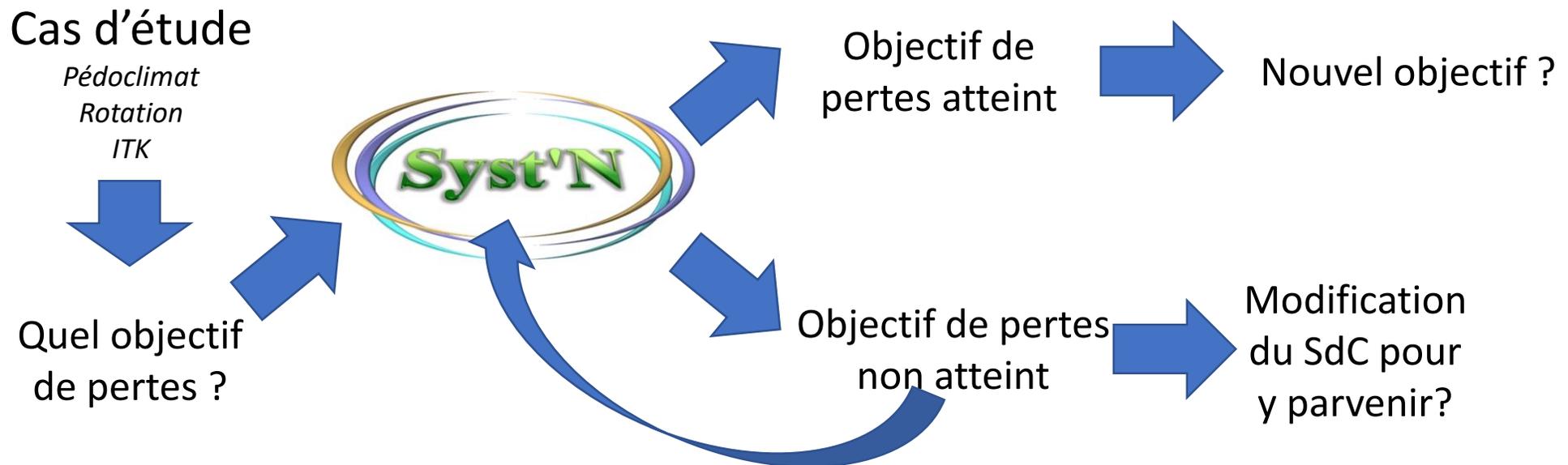
## 3 – Aller vers des systèmes moins émetteurs

- **Utiliser les références et connaissances acquises pour appuyer les politiques publiques**
  - $\text{NO}_3^-$  : appui aux GREN dans le cadre du contentieux sur la Directive Nitrates
  - $\text{NH}_3$  : appui à l'élaboration du PREPA et à la réalisation du « Guide des Bonnes Pratiques Agricoles »
  - $\text{N}_2\text{O}$  : PCAET
- **Raisonner les paysages**
  - Raisonner la gestion des pertes d'azote à une échelle supra-parcellaire
  - Et en incluant des leviers à l'échelle du paysage (ex : zone tampon)
- **Faire évoluer les systèmes de culture**
  - Pour limiter le recours aux intrants de synthèse (et les impacts associés)
  - Pour limiter les pertes
    - En agissant « à la source » : réduction de dose, modification de la forme d'engrais, enfouissement etc.
    - En pilotant la réflexion du système par l'objectif de réduction de pertes



### 3 – Aller vers des systèmes moins émetteurs

- Piloter la réflexion du système par l'objectif de réduction des pertes : utilisation de SystN pour identifier des systèmes à Hautes Performances Azotés (HP2N)



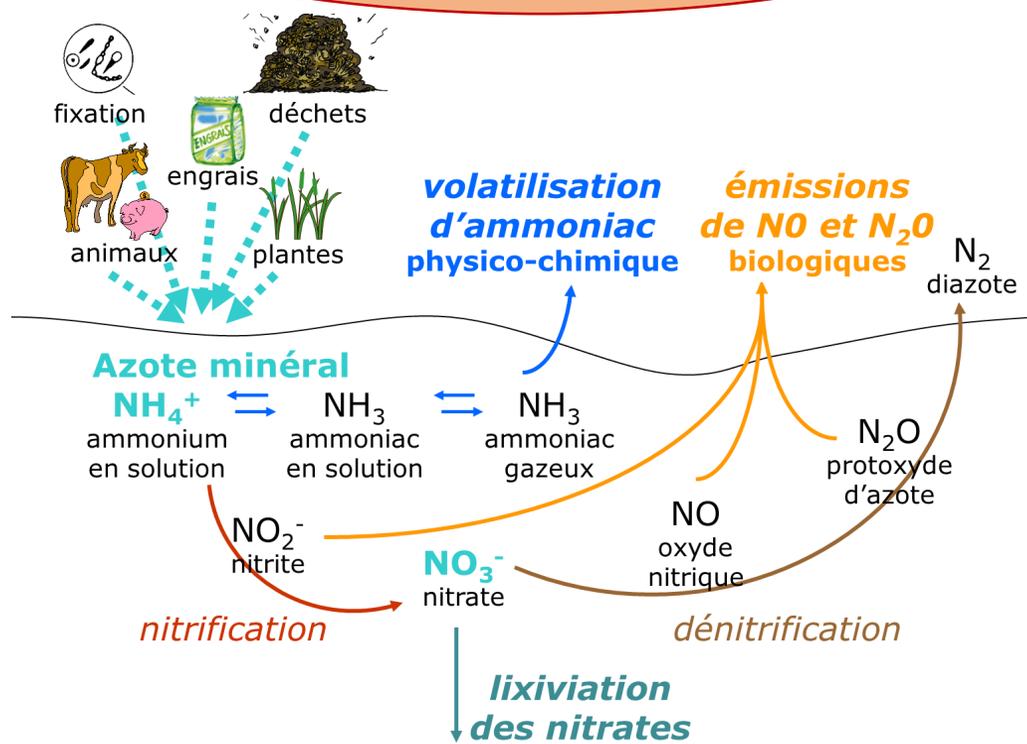
# Pour conclure

Acquisition de références françaises

$N_2O$ ,  $NH_3$

Formalismes/

Paramétrisations de modèles



Stratégies de gestion de l'azote à l'échelle de l'exploitation

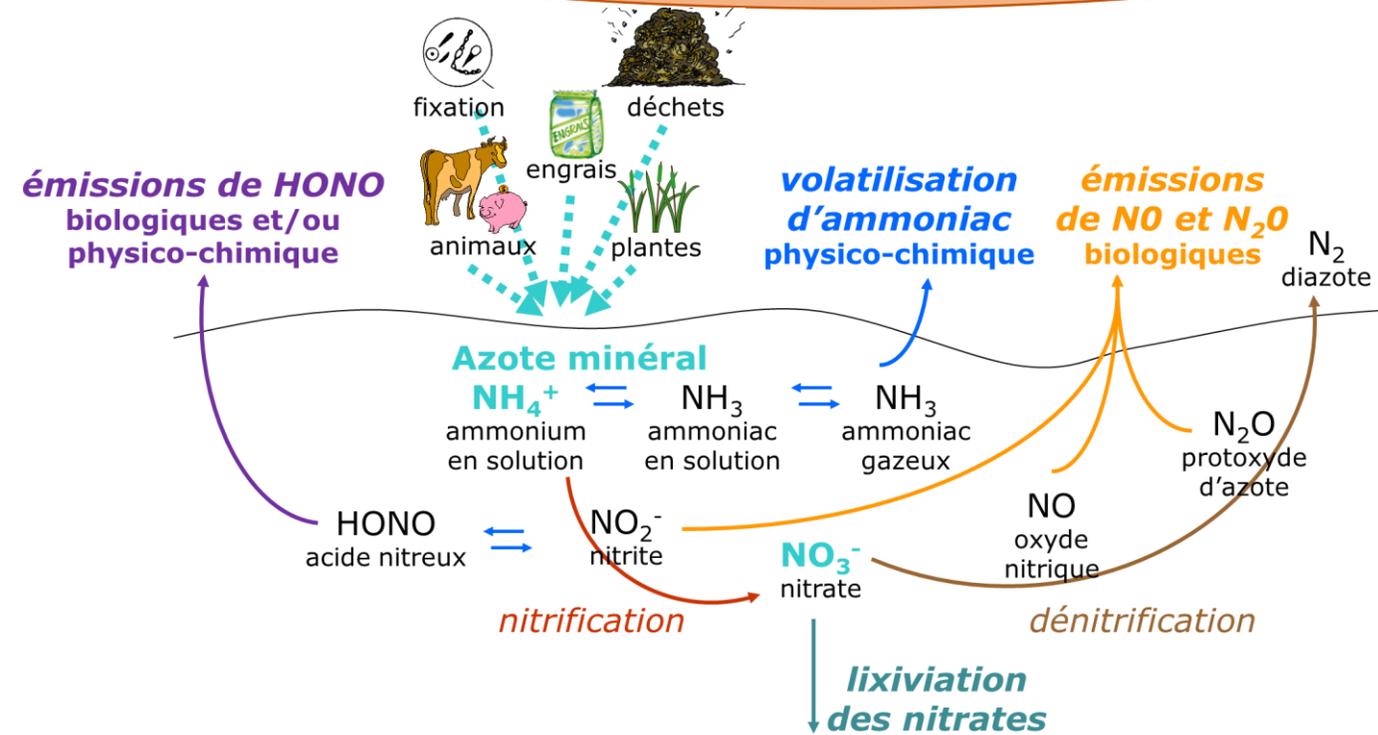
Scénarisation paysagère du devenir l'azote

# Quels prolongements envisager ?

Acquisition de références françaises

**NO, HONO, COV, DOC..., émissions indirectes**

Formalismes/  
paramétrisation modèles



Stratégies de gestion intégrative (toutes les formes de l'azote) à l'échelle du territoire et de la filière



# Retour d'expérience et réflexion prospective

**F. Laurent (Arvalis), S. Recous (INRA)**

# Trois axes d'analyse des activités du RMT

1. Le RMT au cœur de l'aide à la décision tactique / stratégique

2. Une réactivité prouvée face à un contexte réglementaire évolutif

3. Une nécessaire appropriation des enjeux de l'agroécologie

# 1. Le RMT au cœur de l'aide à la décision tactique / stratégique (1)

## A l'actif du RMT

- Valorisation et partage de références nécessaires pour l'aide à la décision (OAD)
- ... en s'appuyant sur des interactions avec les usagers (dont certains sont membres actifs du RMT)
- Extension à d'autres systèmes : cultures pérennes (transposition des concepts) et conditions tropicales (ANANABIO, GIROVAR, GABIR)
- Extension à d'autres usages : formation initiale (N'EDU)

## Un travail sur 2 fronts : modèles et outils

- AzoFert® : un modèle déjà en version « outil » dont il a fallu assurer la croissance fonctionnelle
- Syst'N® : incubé et construit au sein du RMT. Les interfaçages conçus et développés au sein du RMT
- Partage de formalismes, références, paramètres, algorithmes mais en laissant aux membres du RMT la responsabilité de la mise en forme utilisateur

## 1. Le RMT au cœur de l'aide à la décision tactique / stratégique (2)

### Absence de centre de ressources

- Difficulté à assurer une réelle mise en commun des références activables dans les différents outils des partenaires
- Constat : il faut un porteur opérationnel pour garantir la meilleure appropriation / diffusion possible

### Un principe de réalité : le conseil est un domaine concurrentiel

- Plus de 70 outils recensés sur le conseil de fertilisation azotée
- Peut freiner l'objectif de mutualisation
- Une difficulté pour trouver des « marchés » pour certains outils du RMT (Syst'N<sup>®</sup>, N'EDU)

## 2. Une réactivité prouvée face à un contexte réglementaire évolutif

### Capacité à créer un collectif d'experts : motivé, solidaire

- Statut des outils de calcul N (GREN) : autosaisine 2011. Articulation avec le Comifer
- Diversité des organisations et des métiers
- Capacité de mobilisation sur la durée : 8 ans
- Visant la production de livrables originaux et engageants
- Dans un souci de dialogue continu avec les ministères

### Proposition d'une labellisation « par la profession » des outils de calcul de dose N en substitution à une démarche réglementaire portée par l'administration

- Démarche d'analyse approfondie de conformité à la méthode du bilan
- Créer règles et référentiel de toutes pièces
- Améliorer la transparence et traçabilité des référentiels et modèles utilisés
- En préservant la contextualisation régionale : dialogue au travers des cas-types

➔ Nous oblige à sortir de la posture "technico / scientifique"

### 3. Une nécessaire appropriation des enjeux de l'agroécologie

| Ouverture vers d'autres cadres conceptuels   | Contribution à l'articulation interdisciplinaire écologie / agronomie  | Anticipation des enjeux et bouclage des cycles : Produits Résiduaux Organiques   |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nouveau paradigme raisonnement ferti N blé,</li> <li>○ Nouvelle vision sur flux N dans systèmes cultivés (stockage / déstockage)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Séminaires réflexion prospective</li> <li>○ Maturation et accompagnement de projets : Microbioterre, ...</li> <li>○ Préparation RMT « Bouclage »</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Volet environnemental NH<sub>3</sub> : EvaPro (et EvaMin)</li> <li>○ Cascade de l'azote</li> <li>○ Approches territoriales               <ul style="list-style-type: none"> <li>• GIROVAR, GABIR</li> <li>• Partage en séminaire</li> </ul> </li> </ul> |

➔ A permis l'évolution des outils du RMT : Syst'N, ... (et des partenaires : CHN, ...)

## Et après ?

### L'efficacité de la fertilisation et le bouclage des cycles

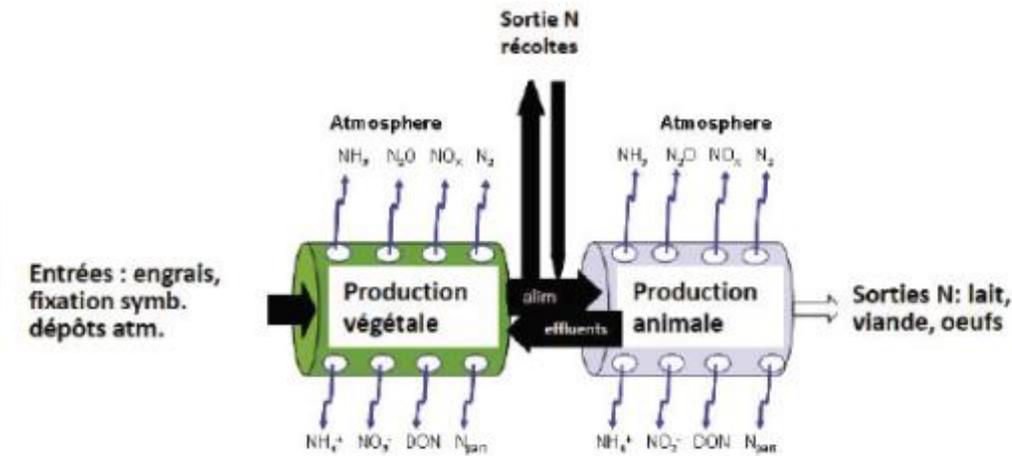
- Un réel enjeu (les « pertes de charge » des systèmes agricoles sont encore importantes) ...
- ... mais peu traité (guichets « recherche appliquée » inadaptés ?)

### Place du machinisme ?

- Place dans la boucle vertueuse : Planifier – Réaliser – Contrôler – Ajuster

### Place de la connaissance des pratiques ? (un enjeu transverse)

- → Connaître les déterminants / freins à adoption de pratiques



- Qualité d'épandage
- Recyclage / gestion territoriale des produits résiduels organiques (PRO): multi-sources; contraintes logistiques / agronomiques;
- Gestion des hétérogénéités intra parcellaire

## Et après ?

### Nouveaux champs disciplinaires à embarquer ?

- Economie : ressources en microéconomie (exploitation agricole)
- SHS (prendre en compte mode raisonnement (« schémas décisionnels) agriculteur (bloc de parcelles, contraintes logistiques, ...)
- Ecologie territoriale

Un défi : comment accroître la notoriété des productions du (des) RMT ?