



HAL
open science

Bouclage des cycles des éléments minéraux dans les systèmes agricoles diversifiés. Mobilisation d'essais systèmes.

Anne-Sophie Voisin, Virginie Parnaudeau

► To cite this version:

Anne-Sophie Voisin, Virginie Parnaudeau. Bouclage des cycles des éléments minéraux dans les systèmes agricoles diversifiés. Mobilisation d'essais systèmes.. Séminaire INRAe "Les systèmes agricoles diversifiés : état des lieux et perspectives de recherche", May 2023, Toulouse, France. hal-04115246

HAL Id: hal-04115246

<https://hal.inrae.fr/hal-04115246>

Submitted on 26 Jun 2023

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

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

Les systèmes agricoles diversifiés : état des lieux et perspectives de recherche – Toulouse mai 2023

Session 1. Interactions entre gestion et processus biologiques dans les systèmes agricoles diversifiés

➤ Bouclage des cycles des éléments minéraux dans les systèmes agricoles diversifiés.
Mobilisation d'essais systèmes.

Virginie Parnaudeau (SAS, AgroEcoSystem), Raphaël Paut (Agronomie, AgroecoSystem), Olivier Godinot (SAS, Institut Agro Rennes-Angers), Sandra Novak (Ferlus, AgroEcoSystem) et Anne-Sophie Voisin (Agroécologie, AgroEcoSystem)

et tous les collaborateurs de NExSys

Contexte et enjeux

- Depuis les années 2000, systèmes de culture innovants en rupture conçus et testés à INRAE (ou en collaboration avec INRAE) dans des « expérimentations systèmes », ayant pour contrainte de **limiter drastiquement voire de supprimer l'usage de pesticides** tout en maintenant **un objectif de production satisfaisante**
- Pour y parvenir, ces systèmes recourent mobilisent une **diversité biologique accrue**, dont on attend principalement (via une combinaison à des techniques variées) une **régulation biologique des bioagresseurs**, visant maladies, ravageurs, adventices
- Résultats visés, observations et acquisitions de connaissances dans ces systèmes de culture expérimentaux **concernent majoritairement ces processus de régulation biologique.**

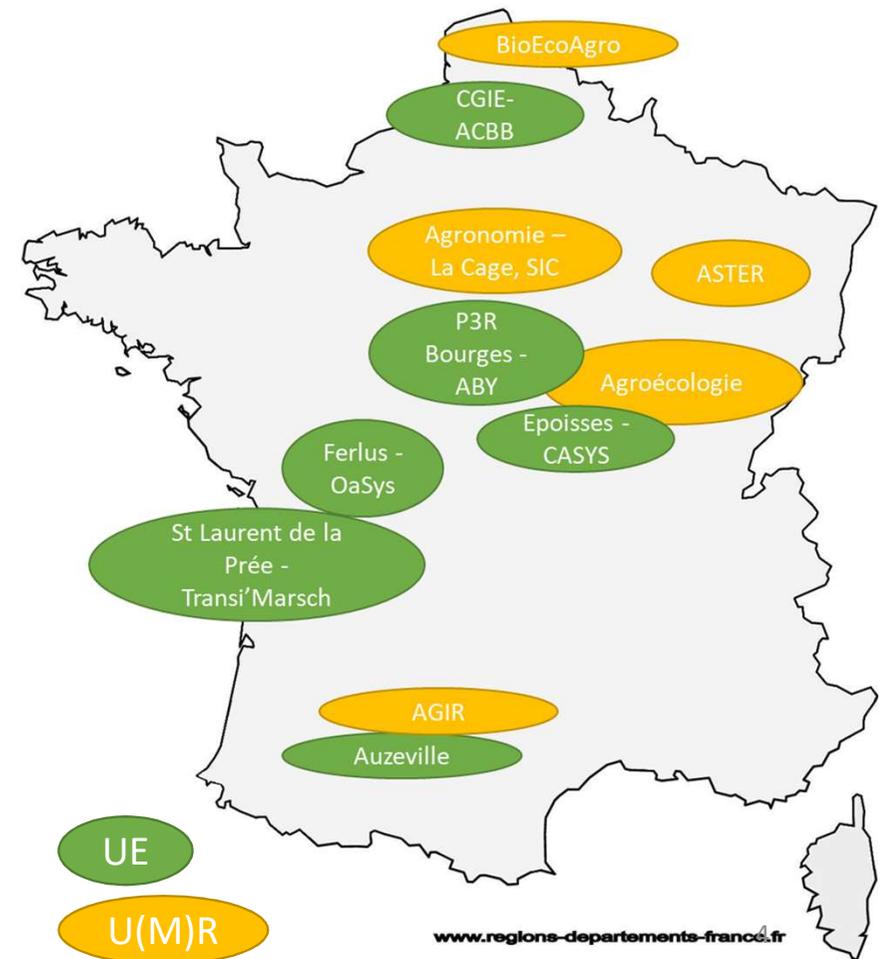
Le projet NExSys

(2022-2024 – dép^t INRAE AgroEcoSystem)

- NExSys : Évaluer et reconcevoir pas à pas des systèmes de culture « bas pesticides », pour atteindre une haute performance azotée
- Haute performance azotée :
 - Alimentation azotée des cultures satisfaisante
 - Faibles émissions d'azote vers l'environnement
 - Maintien (a minima) de la fertilité des sols
- Des systèmes agricoles diversifiés
 - Avant tout ici des systèmes « bas-pesticides »
 - Diversification = une conséquence de la gestion des bioagresseurs sans pesticide
 - Diversité biologique mobilisées conjointement à des pratiques
 - Certaines de ces pratiques peuvent impacter la gestion de l'azote et de la fertilité des sols.

20 essais-systèmes d'une diverse diversification

- Systèmes de grandes cultures ou polyculture-élevage
- Diversité végétale :
 - Dans le temps : cultures de diversification dans la succession
 - Dans l'espace : associations plurispécifiques
 - Plantes de service
- Diversité de conduite des systèmes, avec un gradient :
 - d'association à l'élevage
 - de recours à la fertilisation N et diversité de modes d'apport de N
 - de couverture du sol : sol nu vs couverture permanente
 - de recours au travail du sol entre 2 voies de l'agriculture : AB vs ACS



20 essais-systèmes d'une diverse diversification

PRO "Productif", ref	Colza
	Blé
	Pois
	Blé
BNI Bas niveau d'intrant	Colza
	Blé
	Pois
	Blé
SCV Sous couvert végétal	Maïs
	Blé
	Pois
	Blé
BIO	BTH
	Colza
	BTH
	Pois

< La Cage

ACBB >

Zéro intrants, bio lutte mécanique	Pois P
	Colza associé
	Blé
	Orge P
	Betterave S
Blé	

Non pâturable	Luzerne, graminée, légumineuse 3 ans
	Luzerne ou méteil si luz dégradée
	Maïs - Légumineuse
	Blé
	Interculture: crucifère, tournesol, phacélie, TA, sarrasin...
	Sorgho-légumineuse
Protéagineux-céréales	

< OasYs



TS1	Colza associé
	Orge H
	Sarrasin
	Soja
	BTH
	Couvert: Phacélie, nyger, tournesol, sorgho, millet, féveroles P, trèfle d'alexandrie
	Maïs
	Lupin P
	Moutarde H
	BTH
	Couvert: Phacélie, nyger, tournesol, sorgho, millet, féveroles P, trèfle d'alexandrie
	Soja
	BTH
Couvert	
Orge P	
Féverole H	



< CASYS (2018-...) >

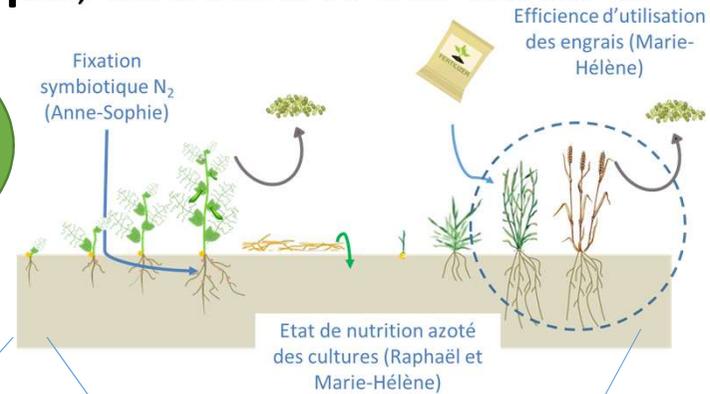
SD2	Colza associé (Féverole P + trèfle A)
	Couvert: si trèfle peu développé, sursemis Phacélie, nyger, tournesol, millet, sorgho, trèfle A, féverole)
	Orge H
	Sarrasin
	BTH
	Couvert: Phacélie, nyger, tournesol, sorgho, millet, féveroles P, trèfle d'alexandrie
	Couvert: seigle, vesce
	Soja
	BTH + Féverole H
	Couvert: Phacélie, nyger, tournesol, sorgho, millet, féveroles P, trèfle d'alexandrie
Orge P + Pois P	

Des questions et difficultés générales vis-à-vis de la performance azotée

- Des difficultés à gérer les bioagresseurs => la gestion de N n'est pas la priorité
- Des résultats qu'on ne comprend pas, qu'on n'arrive pas à interpréter
- Un manque de référence et connaissance sur cultures de diversification, sur certaines légumineuses, sur les associations de cultures, sur les systèmes diversifiés (régime restitution N des sols)
- La gestion de la fertilisation azotée pour les associations céréales / légumineuses
- Besoin d'évaluer et d'analyser les performances N de ces systèmes diversifiés

Schéma général du projet
Évaluation de la performance azotée des systèmes de culture expérimentaux « bas-pesticides »

Quantifier les entrées N dans le système sol-plante :
fixation symbiotique, nutrition N des cultures



Quantifier les **entrées et sorties N** du système de production : **Bilan azoté**

Quantifier les **pertes N** du système sol-plante et comprendre l'origine des pertes

Par la modélisation + les mesures

Par la mesure (Marjorie)

Syst'N® (Virginie)
 (simulation)

NO₃⁻, NH₄⁺, (N₂O)



Lixim (Fabien)
 (optimisation)

NO₃⁻



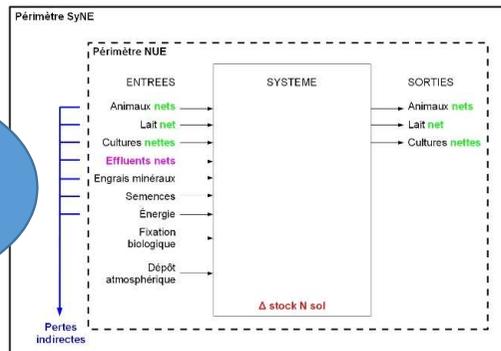
Non-crop N dynamics

Agroecological system, experimental zone

Autillage

Non-crop N dynamics

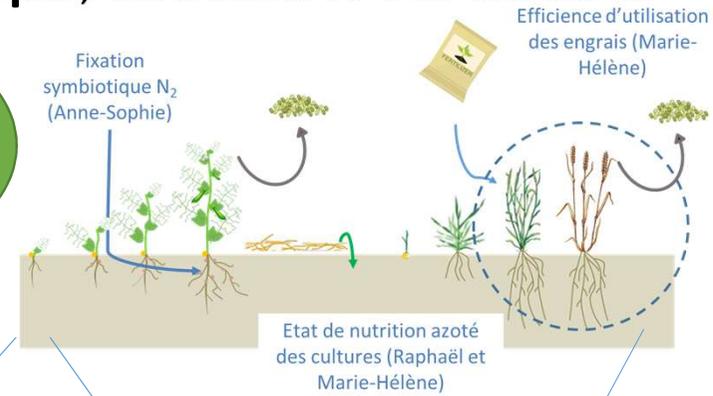
Fertilité N des sols



CASYS x drainage

Schéma général du projet
Évaluation de la performance azotée des systèmes de culture expérimentaux « bas-pesticides »

Quantifier les entrées N dans le système sol-plante : **fixation symbiotique, nutrition N des cultures**



Quantifier les pertes N du système sol-plante et comprendre l'origine des pertes

Quantifier les **entrées et sorties N** du système de production : **Bilan azoté**

Par la modélisation + les mesures

Par la mesure (Marjorie)

Syst'N[®] (Virginie)
 (simulation)

NO₃⁻, NH₄⁺, (N₂O)



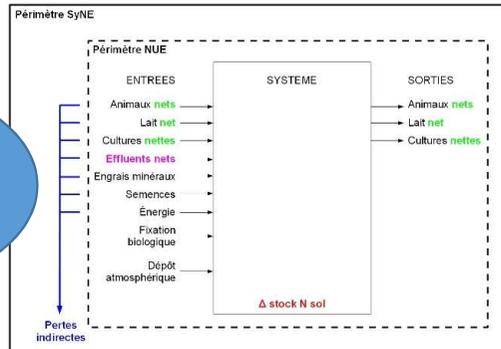
Lixim (Fabien)
 (optimisation)

NO₃⁻



CASYS x drainage

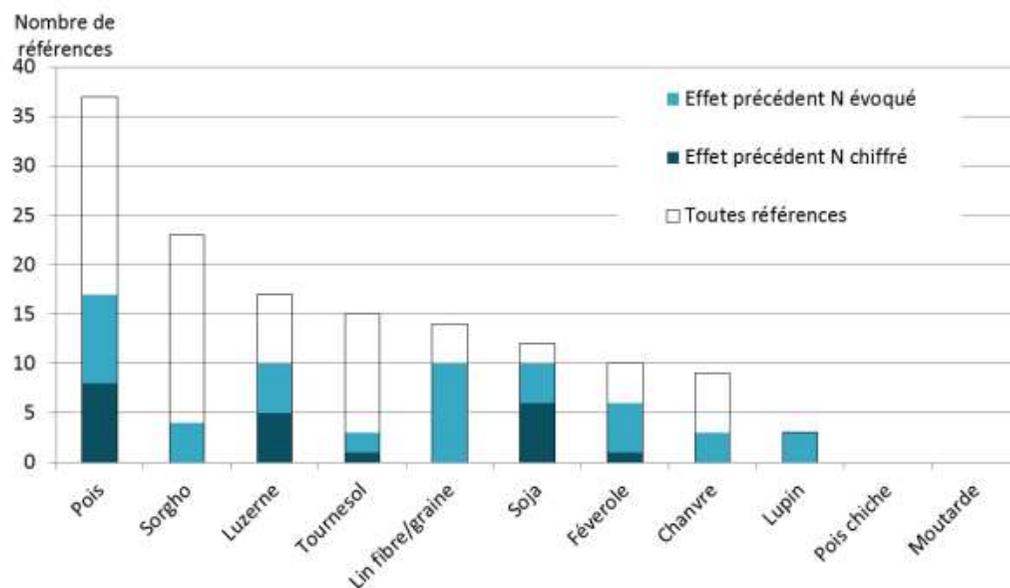
Fertilité N des sols



Alimentation azotée et diversification

La place particulière des légumineuses :

- **En précédent:** des effets évoqués mais pas toujours chiffrés
(Ballot 2009; UNIP 2011; Voisin et al. 2014; Guinet et al. 2018)

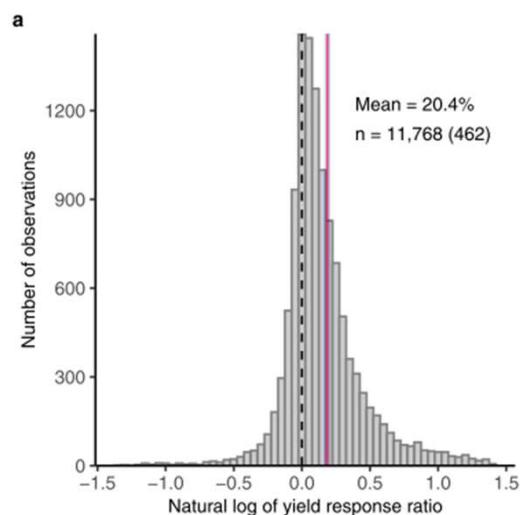


Pourcentage de références évoquant et chiffrant l'effet des cultures de diversification sur la fertilisation N du suivant (Meynard et al. 2015)

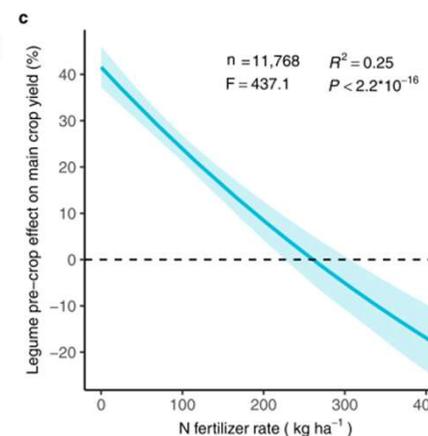
Alimentation azotée et diversification

La place particulière des légumineuses :

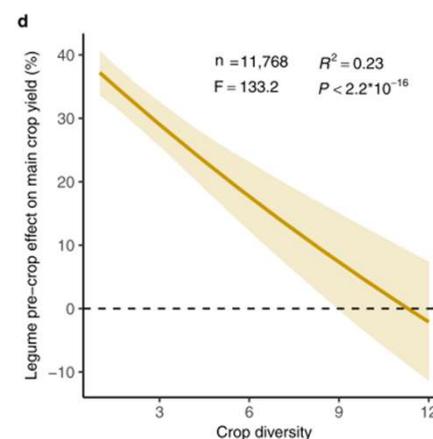
- **En précédent:** des effets évoqués mais pas toi (*Ballot 2009; UNIP 2011; Voisin et al.; Guinet et al. 2018*)



Effet moyen sur la culture suivante :
+20% de rendement



... mais cet effet diminue fortement avec la fertilisation N



... et cet effet est d'autant plus important sur des rotations courtes

Alimentation azotée et diversification

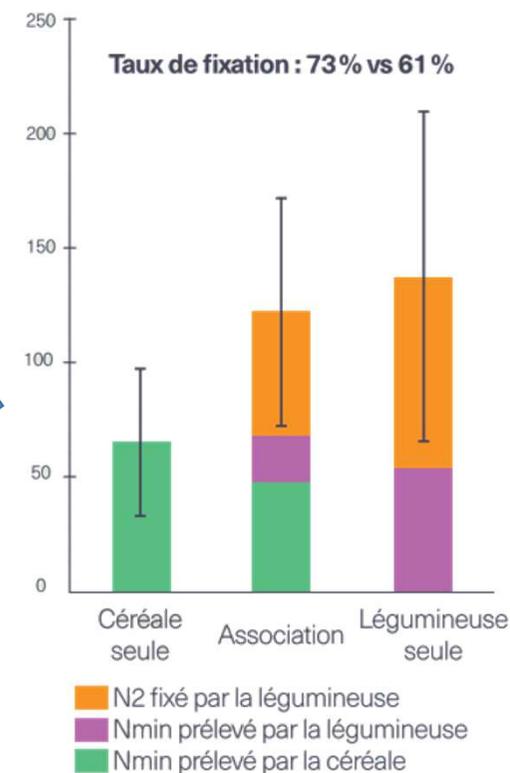
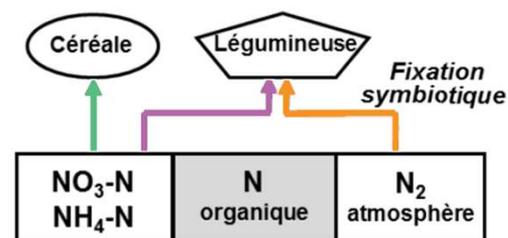
La place particulière des légumineuses :

- En association

Deux processus en jeu pour l'utilisation de l'azote :

- La **compétition** (utilisation de ressources abiotiques au même moment au même endroit)
- La **complémentarité de niche** (utilisation d'un même pool de ressources, de façon différée dans le temps ou dans l'espace)

(Bedoussac et al. 2015 ; Justes et al. 2014 ; Jensen et al. 2020)



Bedoussac et al. 2015

Alimentation azotée et diversification

Bilan :

- Connaissances très partielles (seules quelques espèces ou associations bien documentées)
- Les calculs de rentabilité invisibilisent l'effet précédent (calcul annuel)
- Interactions avec d'autres effets précédents et cumulatifs (rupture du cycle des maladies et ravageurs, gestion de l'enherbement)

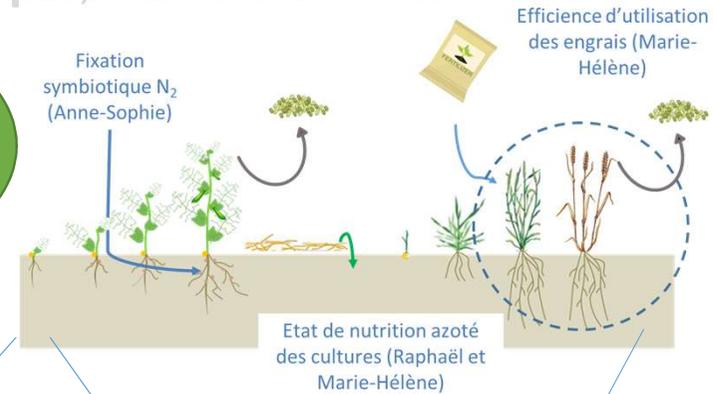
Dans ce contexte : Pilotage complexe de la fertilisation -> repenser nos méthodes ?

- Indicateurs de nutrition azotée en association ou en contexte bas intrants
- Pilotage intégral adapté à une diversité d'espèces en rotation / association (*Ravier et al. 2017, Paut et al. 2022*)

Nécessité de produire des connaissances et références sur les cultures de diversification : intérêts agronomiques de la diversification, effets 'précédent', effets 'association' et effets cumulatifs (*Meynard et al. 2015*)

Schéma général du projet
Évaluation de la performance azotée des systèmes de culture expérimentaux « bas-pesticides »

Quantifier les entrées N dans le système sol-plante :
fixation symbiotique, nutrition N des cultures



Quantifier les **pertes N** du système sol-plante et comprendre l'origine des pertes

Quantifier les entrées et sorties N du système de production : **Bilan azoté**

Par la modélisation + les mesures

Par la mesure (Marjorie)

Syst'N® (Virginie)
 (simulation)

NO₃⁻, NH₄⁺, (N₂O)



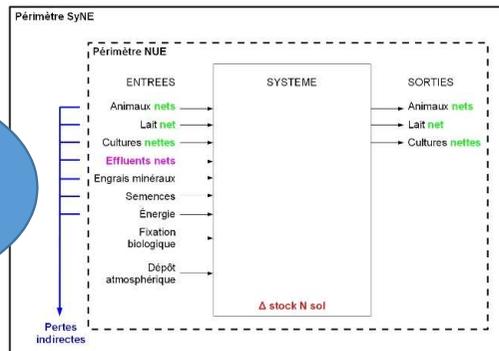
Lixim (Fabien)
 (optimisation)

NO₃⁻



CASYS x drainage

Fertilité N des sols

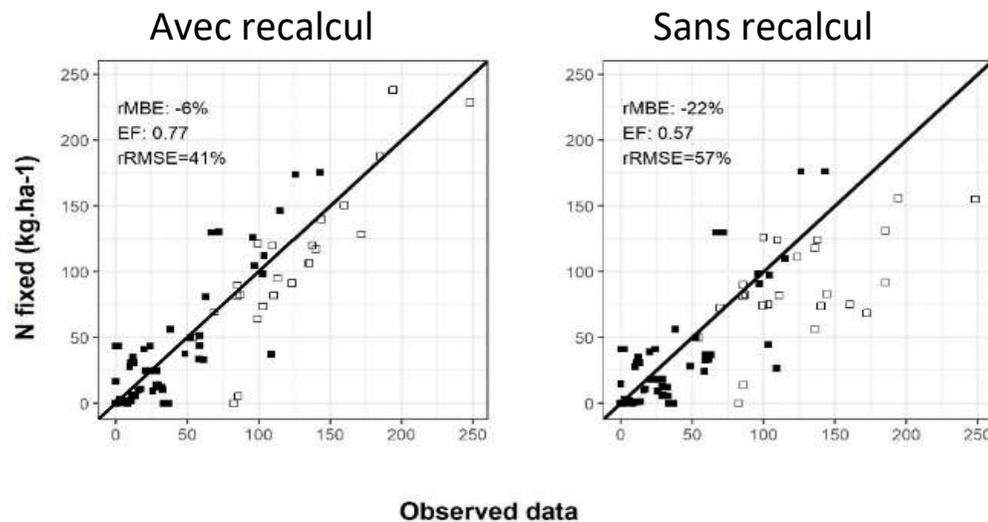


Émissions d'azote vers l'environnement

- Enjeu : faibles émissions, dans ces systèmes diversifiés caractérisés par
 - Sols plutôt couverts
 - Des restitutions et apports sous forme organique (légumineuses + PRO) => fourniture de N par le sol en évolution
 - D'abord, évaluer les émissions :
 - Difficiles, coûteuses à mesurer (lixiviation du nitrate, volatilisation de l'ammoniac, émissions de protoxyde d'azote)
 - Mesures intermédiaires (ex. Reliquat Entrée Hiver pour estimer la lixiviation)
 - Utilisation de modèles plus ou moins complexes (construits en utilisant des mesures !), la plupart du temps conçu pour évaluer les émissions N de systèmes peu diversifiés
 - Puis gérer le système (pas seulement l'N) pour les éviter
 - Réaliser un diagnostic...
- Méthodes et outils encore peu adaptés aux systèmes diversifiés

Adaptation de Syst'N[®] aux légumineuses

- Initialement : formalismes simples pour le pois
 - Élargissement du domaine de définition à d'autres légumineuses
- ⇒ Non satisfaisant
- Mobilisation de formalismes de STICS mais tout le modèle pas embarqué
- ⇒ Plus satisfaisant mais complexité trop importante pour améliorer les simulations, notamment pb des stades
- Choix de **demandeur aux utilisateurs la date de floraison** pour recalculer les stades de développement
- ⇒ amélioration à un niveau acceptable



Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR



MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
*Liberté
Égalité
Fraternité*

Projet CasDAR Agro-éco-Syst'N

Projet OFB EcoSyst'N



Simuler les émissions d'azote vers l'environnement

Exemple d'évaluation avec outil Syst'N® (Schell 2021)

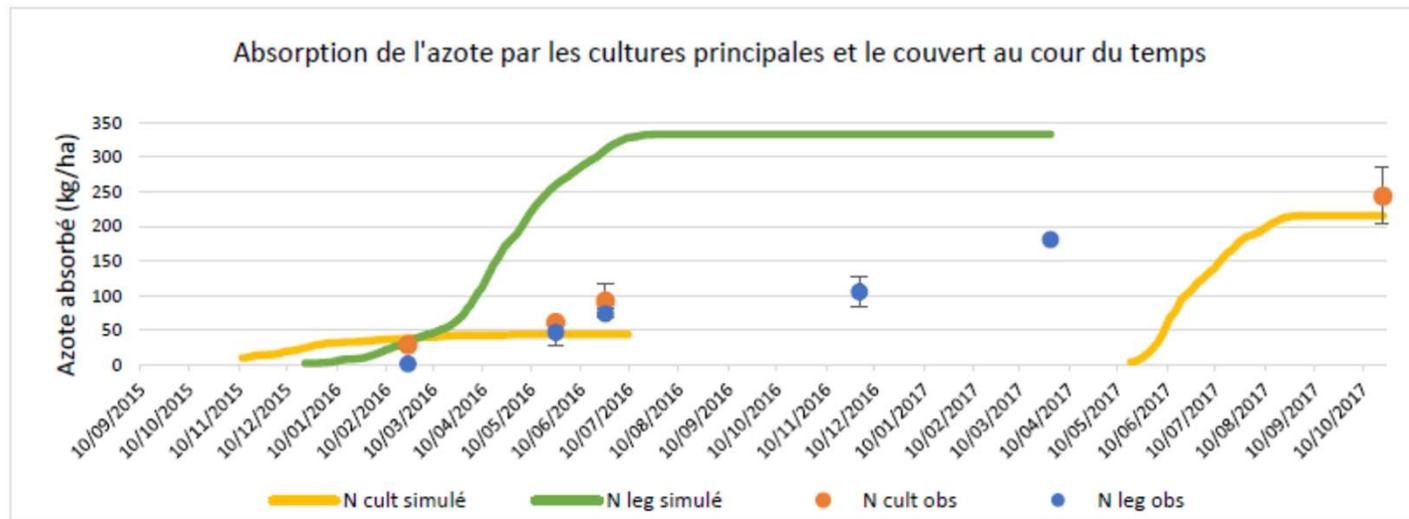
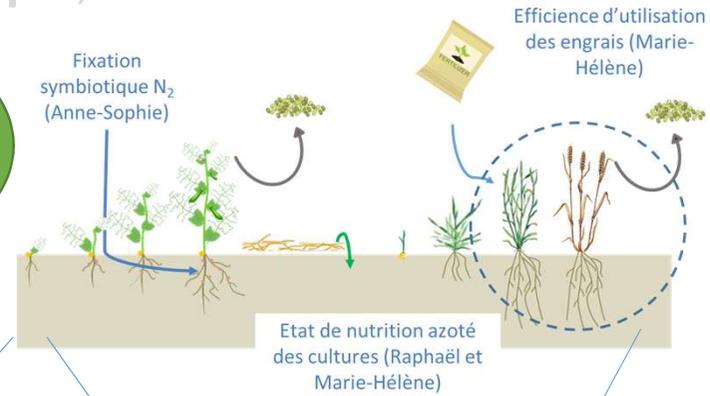


Figure 17 : Biomasse produite et azote absorbé par les cultures principales et le couvert (trèfle blanc d'automne) dans la situation CA16. Les barres d'erreurs indiquent l'écart-type des données observées.

- Pb de la compétition entre cultures (dont adventices)
 - Evaluation de la minéralisation des sols avec restitutions organiques diverses
- Mesures, observations de variables intermédiaires pour calibrer le modèle mais...

Schéma général du projet
Évaluation de la performance azotée des systèmes de culture expérimentaux « bas-pesticides »

Quantifier les entrées N dans le système sol-plante :
fixation symbiotique, nutrition N des cultures



Quantifier les **entrées et sorties N** du système de production : **Bilan azoté**

Quantifier les pertes N du système sol-plante et comprendre l'origine des pertes

Par la modélisation + les mesures

Par la mesure (Marjorie)

Syst'N® (Virginie)
 (simulation)

NO₃⁻, NH₄⁺, (N₂O)



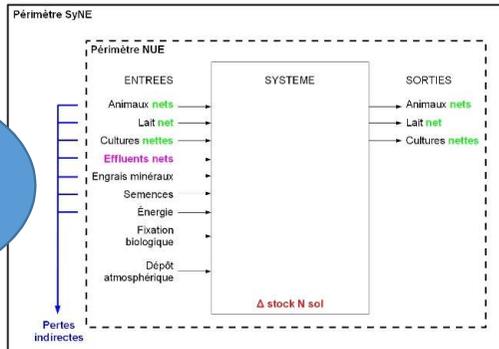
Lixim (Fabien)
 (optimisation)

NO₃⁻



CASYS x drainage

Fertilité N des sols



Bilan apparent et efficacité des systèmes

- Bilan apparent de l'azote
 - Amélioré par la réduction d'intrants azotés (*Lassaletta et al. 2014*) et par la diversification (*Sainju et al. 2018*)
 - Effet indirect de la réduction phyto ?
- Efficacité d'utilisation de l'azote
 - Probablement réduite par la diminution des produits phyto ?
 - Améliorée par la réduction d'intrants azotés (*Lassaletta et al. 2014*)
 - Effet variable de la diversification (*Saint Luce et al. 2020 ; Allen et al. 2021*)

=> Quels effets de la combinaison des pratiques de diversification x bas intrants sur le bilan azoté et l'efficacité d'utilisation de l'azote à l'échelle du système de culture ?

Bilan apparent et efficacité des systèmes

- Question du maintien de la fertilité N à long terme dans des systèmes caractérisés par :
 - peu d'engrais de synthèse
 - Restitutions de N : légumineuses, PRO, prairies, restitutions au pâturage
- Diversification des cultures liée à la stratégie phyto
 - CIPAN multispécifiques avec légumineuses
 - Certaines cultures moins bien connues

=> Enjeux méthodologiques pour le calcul des indicateurs de bilan apparent et d'efficacité à l'échelle du système de production

Fertilité azotée des sols

- Variations de stocks de MO du sol souvent négligées dans les calculs de bilan et d'efficacité au pas de temps annuel
 - Risque de déstockage plus important dans les systèmes à bas intrants (*EUNEP, 2015*)
 - Intérêt de la diversification (cultures fourragères, CIPAN...) pour entretenir la MO (*Beillouin et al., 2021*)
 - Effet difficile à mesurer annuellement, mais cumulatif => pertinence de considérer le temps long (*Carof et al., 2022*)

=> Modélisation du bilan humique avec AMG dans le calcul des indicateurs de bilan et d'efficacité à l'échelle du système de production, sur la rotation entière

Estimation des autres sources d'azote

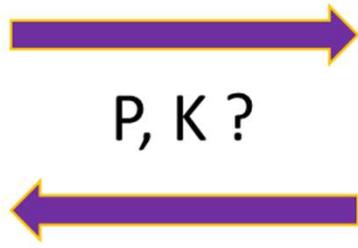
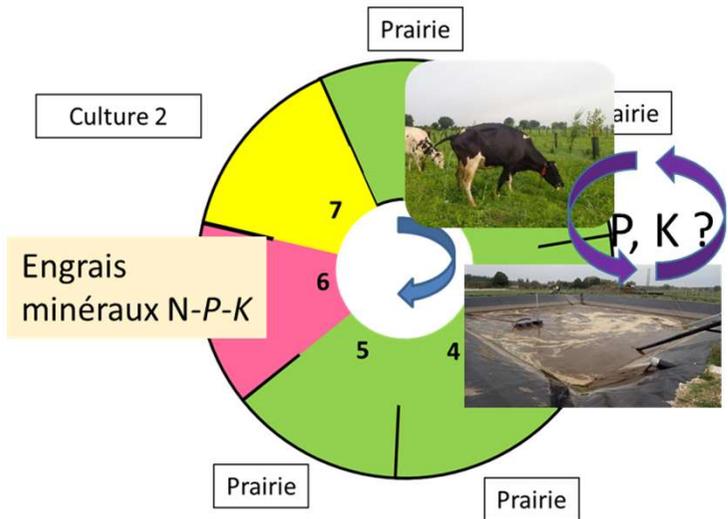
- Diversité = souvent plus de légumineuses, en culture principale ou CI
 - => bien estimer les apports d'azote par la fixation symbiotique
 - Calcul de la fixation difficile pour les légumineuses moins connues, en association ou cultivées à des périodes plus froides : approximation selon biomasse des légumineuses (*Anglade et al., 2015*)
 - Couplage cultures-élevage
 - Valorisation des co-produits (CIPAN, résidus de cultures, cultures déclassées)
 - Transferts de fertilité à l'échelle du système de production
- => Elargissement du SdC au SdP incluant l'élevage le cas échéant

Gestion et bouclage des cycles P et K : questions sur le dispositif OasYs quasi autonome en fourrages

Quels transferts de P et K entre les parcelles du système et quelles conséquences sur la fertilité des sols ?
De nouvelles pratiques pour mieux valoriser les effluents organiques produits sur le système ?

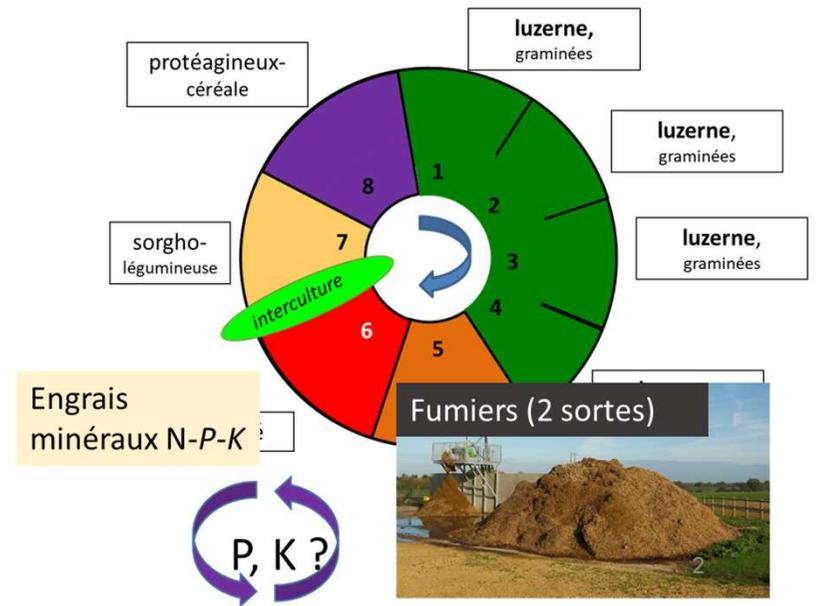
2 rotations pâturables

fertilisée par les restitutions directes des animaux et des « eaux brunes » + 1 peu d'engrais minéraux



1 rotation non pâturable

fertilisée par les fumiers produits + 1 peu d'engrais minéraux



Conclusions

- Rq préliminaire : des données nombreuses mais hétérogènes et pas toujours faciles à mobiliser
- Attendus du projet (fin 2024)
 - Résultats des évaluations des systèmes, en partie pour guider leur reconception (WP4)
=> Nouvelles connaissances, données sur N dans les systèmes diversifiées
 - Amélioration des outils, ou au moins identification des faiblesses
 - Gestion de N tactique et stratégique adaptées aux systèmes diversifiés, en conservant l’N au maximum dans le système sol-plante
- Quelles pistes de recherche ?
 - Relations gestion de N et bioagresseurs
 - Pistes suivies actuellement :
 - Hybridation modèle x mesures pour appréhender des systèmes diversifiés et en évolution
 - Typologie pour appréhender la diversité
 - suffisant ?
 - Quelles pistes vraiment innovantes, quelles approches en rupture ?

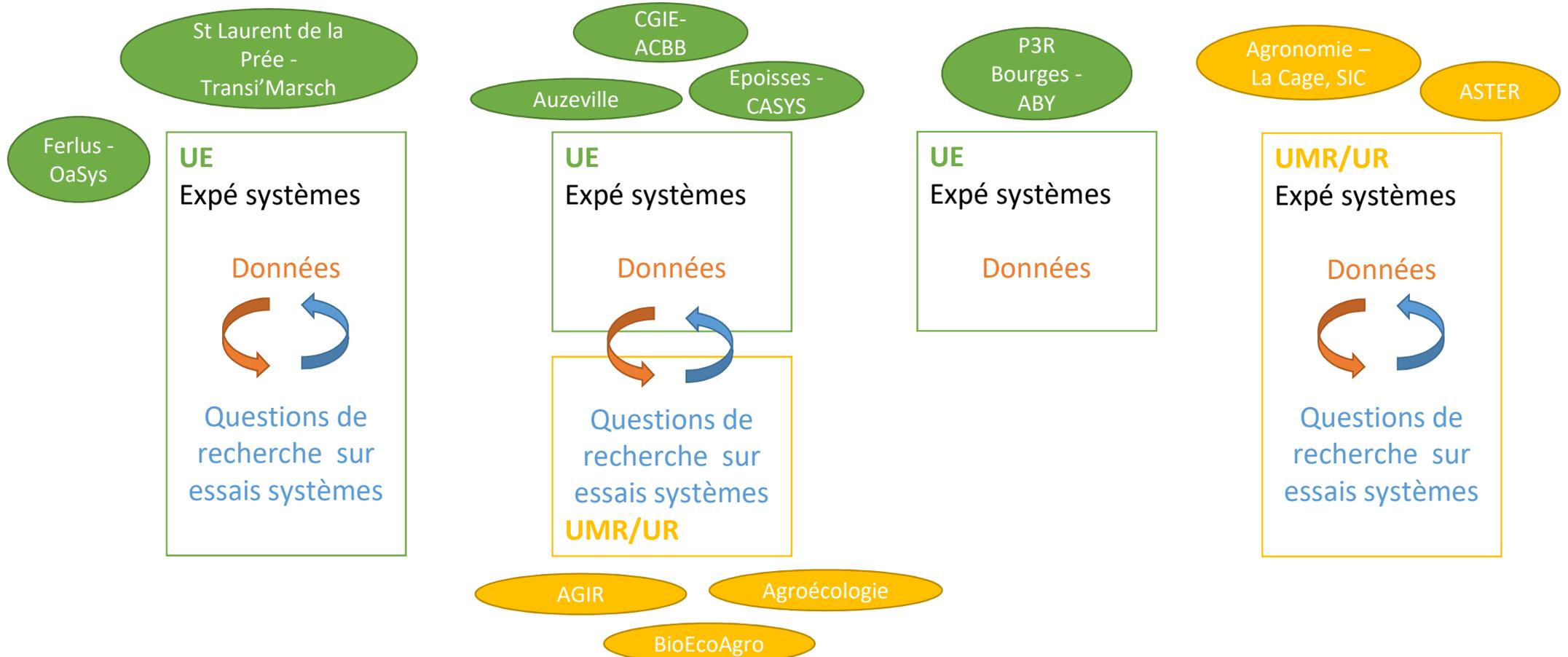
Merci de votre attention

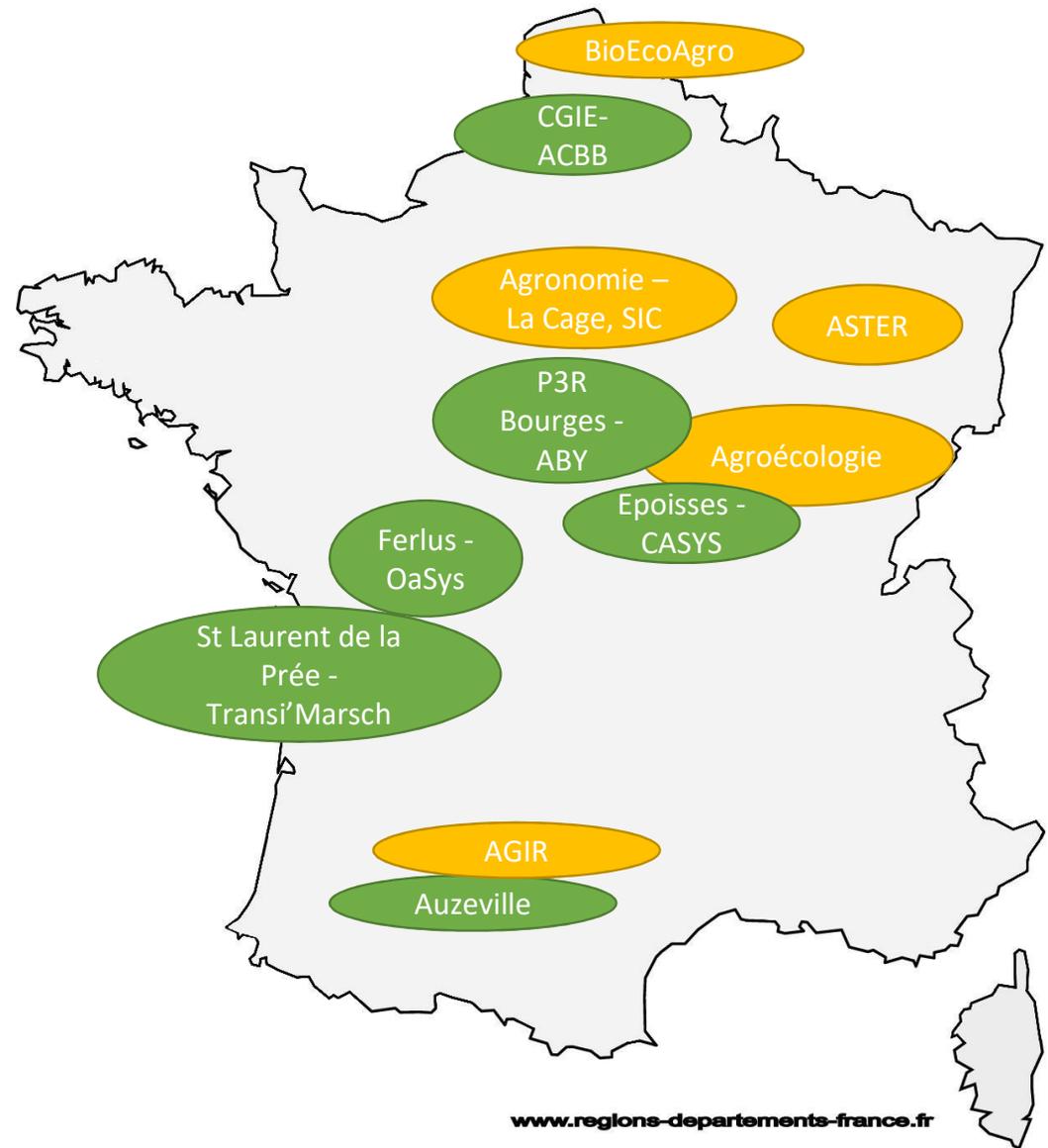
Vrac, suppléments

Expérimentations Systèmes support du projet

Type de sites pour le projet	Nom des Dispositifs	Lien à l'élevage	Dates, surfaces, parcelles
Sites « Récents », en cours, avec nouvelles mesures au cours du projet : - Analyse des premières campagnes - Evaluation/Mesures - Re-conception	CASYS , Dijon ABY , Bourges BioDiverSystem , Rennes	Non Oui / Non indirect	Depuis 2018 : 4 sdc, 42 parcelles, 125 ha Depuis 2018 : 4 sdc, 28 parcelles, 90 ha Depuis 2019 : 2 sdc, 6 parcelles, 3 ha
	OASYS Lusignan, période 2 Transi'marsch , St Laurent de la Prée 2	Oui Oui	Depuis 2020 : 3 sdc, 30 parcelles, 90 ha Depuis 2019 : 1 Sdc, 19 parcelles (+prairies), 60 ha (+ 100 ha)
Sites « En cours de re-conception », avec ancienneté et objectif de re-conception à venir ou récent : - analyse rétrospective Re-conception	La Cage Versailles Expé Sdc Longue durée , Auzeville ACBB Estrées-Mons (T7 et T8) Systèmes Bio TEMPO Mirecourt 2	Non Non Non Oui	1998-2022 : 4 sdc, 4 parcelles, 8ha Depuis 2000 : 3 sdc, 9 parcelles, 4 ha Depuis 2016 : 2 sdc, 6 parcelles, 2,5 ha Depuis 2016 : 1 sdc, 40 (+ 63 prairies), 105(+ 135 ha)
Sites « anciens », avec une dizaine d'années de recul - analyse rétrospective	OASYS Lusignan, période 1 Systèmes Bio TEMPO Mirecourt 1 Transi'marsch , St Laurent de la Prée 1 SIC Grignon (3 Sdc) Res0Pest Auzeville Res0Pest Bretenière Res0Pest Estrées-Mons Res0Pest Grignon Res0Pest Le Rheu Res0Pest Lusignan Res0Pest Mauguio Res0Pest Nouzilly Res0Pest Purpan	Oui Oui Oui Non Non Non Non Non Non Oui Oui Non Oui Oui	2013- 2020 , 3 Sdc, 30 parcelles, 90 ha 2004-2015 , 2 Sdc, 40 parcelles (+ 63 prairies), 105(+ 135 ha) 2009-2019, 1 Sdc, 19 parcelles (+prairies), 60 ha (+ 100 ha) 2008-2020 , 3 sdc, 9 parcelles, 4,5 ha 2013-2023 , 1 Sdc, 4 parcelles, 3 ha 2013-2023 , 1 Sdc, 4 parcelles, 4 ha 2013-2023 , 1 Sdc, 3 parcelles, 2 ha 2008-2020 , 1 Sdc, 3 parcelles, 1,5 ha 2013-2023 , 1 Sdc, 4 parcelles, 2,5 ha 2013-2023 , 1 Sdc, 4 parcelles, 4,5 ha 2013-2023 , 1 Sdc, 3 parcelles, 1,5 ha 2013-2023 , 1 Sdc, 4 parcelles, 2 ha 2018-2023 , 1 Sdc, 4 parcelles, 2 ha

Des essais-systèmes dans différents types d'unités





Les enjeux, relatifs à une bonne gestion de l'azote dans ces systèmes innovants basés sur une réduction drastique des pesticides

Enjeu 1. Fertilisation azotée :

- ☒ **compromis** entre **Alimentation azotée** des cultures et **Minimisation des pertes** dans l'environnement
- ☒ Nouvelles méthodes de fertilisation N

Enjeu 2. Gestion des bio agresseurs :

- la gestion de l'azote fait partie des **moyens contribuant à maîtriser les bio agresseurs**
- le pilotage de l'azote doit prendre en compte les **interactions avec la gestion des bio agresseurs**

Enjeu 3. Autonomie azotée dans les systèmes de production

- **niveau de dépendance** aux apports en engrais azotés qui **varie en fonction des systèmes**, selon leur cadre de contraintes et objectifs.
- Limitation des engrais de synthèse, sources alternatives d'azote

Enjeu 4. Couplage culture-élevage dans les systèmes de production

- Autonomie protéique, recours aux **légumineuses**, transfert de **fertilité**
- Lien entre (i) débouchés et pratiques liés à l'élevage et (ii) régulation des bioagresseurs

Questions initiales des porteurs d'essais vis-à-vis de l'azote en systèmes diversifiés

La nutrition azotée en contexte bas intrants :

- Comment optimiser les apports N dans les systèmes sans traitements phyto ?
- Comment gérer les carences en azote sur le long terme?



La place des légumineuses :

- Comment gérer la fertilisation azotée pour les associations céréales / légumineuses ?

Les questions sur la fertilisation azotée et la maîtrise des bio-agresseurs :

- Comment assurer une fertilisation azotée sans pénaliser les rendements ni favoriser les adventices : « arriver à un compromis » ?
- Quel est l'effet de la période de fertilisation sur les bio-agresseurs ?
- Comment ne pas favoriser les bio-agresseurs avec la fertilisation azotée pour les céréales ?
- Quel est l'impact de l'intensité et la fréquence des apports d'azote sur les bio-agresseurs et plus précisément les adventices ?
- Quels sont les effets directs et indirects de l'azote sur les plantes pathogènes?
- Quels sont les effets de différentes formes d'apports d'azote sur les adventices ?

... qu'on ne traite pas toutes dans le projet !

Alimentation azotée et diversification

Nécessité de produire des connaissances et références sur les cultures de diversification : intérêts agronomiques de la diversification, effets 'précédent' et cumulatifs (Meynard et al. 2015)

La place particulière des légumineuses :

- **En précédent:** des effets évoquées mais pas toujours chiffrés (Ballot 2009; UNIP 2011; Voisin et al.; Guinet et al. 2018)

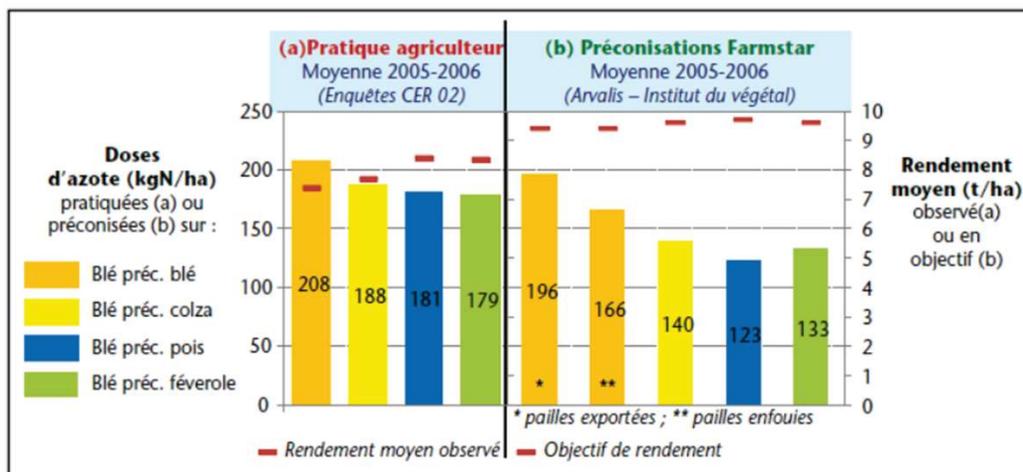


Figure 7. Comparaison de la dose azotée selon les précédents dans le cas de l'Aisne : (a) telle qu'appliquée par les agriculteurs (moyenne 2005-2006 des données d'enquêtes CER02 sur les pratiques culturales des agriculteurs) ; (b) telle que préconisée à une série d'agriculteurs (selon leur objectif de rendement) par les conseillers agricoles à l'aide de l'outil de précision "Farmstar" d'Arvalis – Institut du végétal (moyenne 2005-2006). (Source : UNIP, 2011)

Alimentation azotée et diversification

Nécessité de produire des connaissances et références sur les cultures de diversification : intérêts agronomiques de la diversification, effets 'précédent' et cumulatifs (Meynard et al. 2015)

La place particulière des légumineuses :

- **En précédent:** des effets évoqués mais pas toujours chiffrés

(Ballot 2009; UNIP 2011; Voisin et al.; Guinet et al. 2018)



Guinet 2019

Alimentation azotée et diversification

La place particulière des légumineuses

Des cultures sous représentées

<2% des terres cultivées en Europe, déficit protéines pour l'alimentation animale = 71%

(Murphy-Bokern et al. 2017)

Pourtant elles sont sources de nombreux bénéfices agronomiques et environnementaux potentiels

(Watson et al. 2017)

Quels sont les impacts de l'intégration de légumineuses dans les systèmes de cultures ?