



Groupe N



Vers une gestion intégrée de l'N dans les agrosystèmes

Marie-Hélène Jeuffroy, INRAE Saclay

Avec les contributions de :

Josette Garnier, Philippe Gate, André Gallais,
Jean-Louis Peyraud, Christian Rousseau, Philippe Viaux,

Séance du 15 Novembre 2025

- 1/ Les pratiques de fertilisation N des cultures : d'une approche de pronostic vers une approche de diagnostic**
- 2/ La diversification des rotations culturales avec des légumineuses : un moyen de diminuer la dépendance des systèmes de culture à la fertilisation**
- 3/ Des variétés pour diminuer la dépendance aux engrais azotés**
- 4/ La méthanisation pour valoriser les intercultures/CIVES, produire digestat et énergie**
- 5/ La ré-association entre « agriculture et élevage » à l'échelle territoriale**
- 6/ Conclusion : reconnexion culture-élevage et intégration des systèmes alimentaires pour une gestion durable des agro-écosystèmes**

1/ Les pratiques de fertilisation N des cultures : d'une approche de pronostic vers une approche de diagnostic

2/ La diversification des rotations culturales avec des légumineuses : un moyen de diminuer la dépendance des systèmes de culture à la fertilisation

3/ Des variétés pour diminuer la dépendance aux engrais azotés

4/ La méthanisation pour valoriser les intercultures/CIVES, produire digestat et énergie

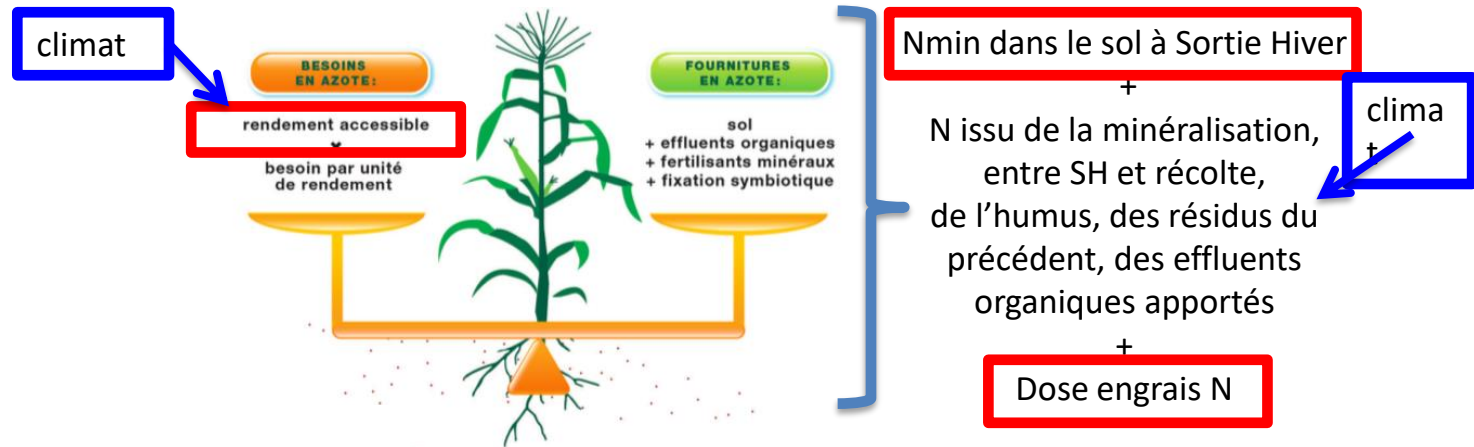
5/ La ré-association entre « agriculture et élevage » à l'échelle territoriale

6/ Conclusion : reconnexion culture-élevage et intégration des systèmes alimentaires pour une gestion durable des agro-écosystèmes

Les pratiques de fertilisation N des cultures : du pronostic au diagnostic

Un modèle de raisonnement unique depuis plus de 50 ans :

Méthode du bilan (*Hébert, 1969; Rémy et Hébert, 1977*)



Les pratiques de fertilisation N des cultures : du pronostic au diagnostic

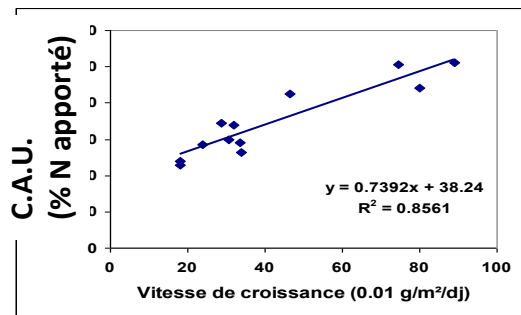
MAIS des impacts environnementaux encore trop élevés (pertes nitriques et gazeuses)

➔ 2 enjeux pour améliorer les pratiques de fertilisation N :

1/ Accroître l'efficacité d'utilisation de l'N

= réduire les pertes gazeuses

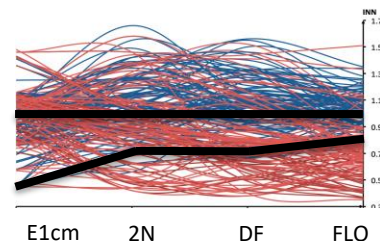
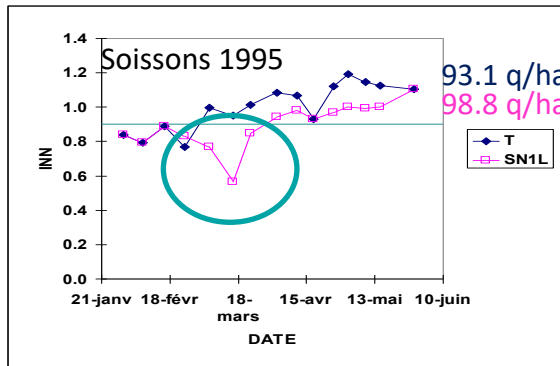
CAU moyen : 30 à 50% (*Tilman et al., 2002*)



Limaux 1999; Limaux et al., 2001

➔ Apporter l'N quand la plante en a besoin, est en croissance et qu'il pleut

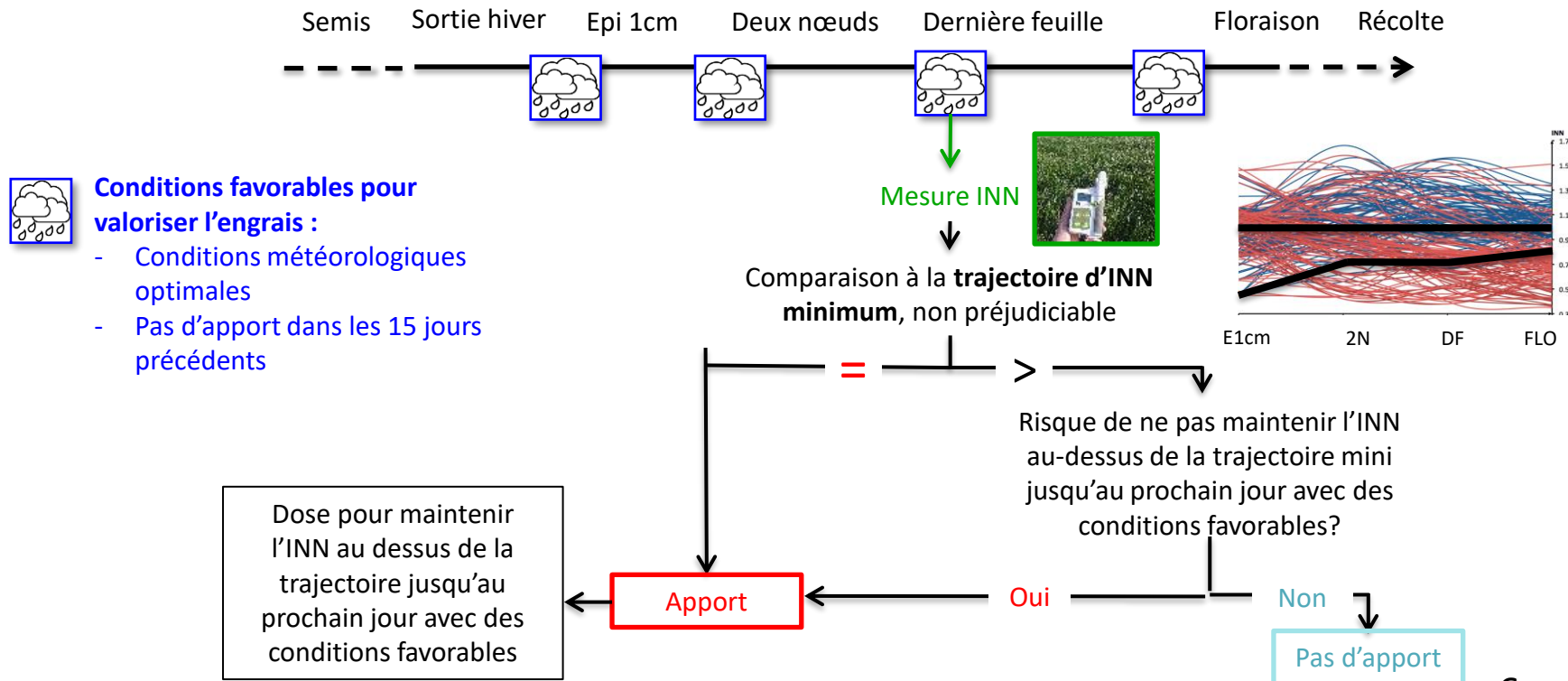
2/ Ne plus chercher à éviter des périodes de carence N temporaire



➔ Apporter N pour maintenir l'INN entre les deux trajectoires (noires)

Les pratiques de fertilisation N des cultures : du pronostic au diagnostic

APPI-N, Ferti-Adapt-CHN : méthodes basées sur le pilotage intégral des cultures
= apports d'engrais basés sur un suivi dynamique de la nutrition N (*Ravier et al., 2018*)



APPI-N, Ferti-Adapt-CHN : méthodes basées sur le pilotage intégral des cultures

(Ravier et al., 2018; Jeuffroy et al., 2019)

Méthode du bilan

- La dose totale et le fractionnement sont déterminés avant la période de fertilisation (prend mal en compte le climat au printemps)
- A partir d'un bilan des entrées/sorties d'azote estimées dans le système sol-plante (entrée = objectif de rendement estimé) → **PRONOSTIC**
- En plaçant la culture dans des conditions de nutrition N non limitante tout au long du cycle ($INN > 1$)
- Apport à des stades prédéterminés (et en anticipant les périodes de sec)

Méthode APPI-N

- Les dates d'apports et les doses sont déterminées in itinere et tiennent compte en temps réel des besoins de la culture et du climat
- A partir d'un indicateur mesuré du niveau de nutrition azotée de la plante : l'INN → **DIAGNOSTIC**
- Et d'une trajectoire d'INN seuil tolérant des carences en début de cycle, tout en permettant rendement et teneur en protéine optimaux, donc retardant les apports et augmentant le CAU (donc réduisant les pertes)
- Apports aux « jours favorables » pour optimiser la valorisation de l'engrais (pluie annoncée)

Les pratiques de fertilisation N des cultures : du pronostic au diagnostic

APPI-N, synthèse de l'évaluation au champ (Centre-Val de Loire et Grand-Est) (Paut et al., 2024)

Type de résultats	Paramètre d'évaluation	Essais de type 1 (n=58)	Essais de type 2 (n=55)
Stratégie de fertilisation 	Date du 1 ^{er} apport	 20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)	17 jours plus tard
	Nombre total d'apports	 Bilan : 95% : 3 apports 5% : 2 apports APPI-N : 50% : 2 apports 50% : 3 apports	Bilan : 18% 2 apports 75% 3 apports APPI-N : 37% 2 apports 56% 3 apports
	Dose totale	 Réduite de 18 kg N/ha (S)	Réduite de 26 kg N/ha
Performance économique 	Rendement à 15%	 Equivalent : Ecart de -0.6 q/ha (NS)	Equivalent : Ecart de +0.9 q/ha (NS)
	Taux de protéine	 Equivalent : Ecart de +0.1 point (NS)	Equivalent : Ecart de +0.3 point (NS)
	Marge partielle	 Equivalent : Ecart de + 22.7€/ha (NS)	Ecart de + 12€/ha (NS)
Performance environnementale 	Pertes	 Réduites de 9 kg N/ha (S)	Réduites de 36 kg N/ha
	Emission de GES par hectare	 Réduites de 627 kg CO2eq/ha (S) (-26%) (n=19) <i>L'équivalent d'un trajet d'environ 3250 km en voiture</i>	Réduites de 1895 kg CO2eq/ha (-39%)
	Émission de GES par quintal de produit récolté	 Réduites de 8,6 kg CO2eq/q (S) (-28%) (n=19)	Réduites de 25,3 kg CO2eq/q (-40%)

1/ Les pratiques de fertilisation N des cultures : d'une approche de pronostic vers une approche de diagnostic

2/ La diversification des rotations culturales avec des légumineuses : un moyen de diminuer la dépendance des systèmes de culture à la fertilisation

3/ Des variétés pour diminuer la dépendance aux engrais azotés

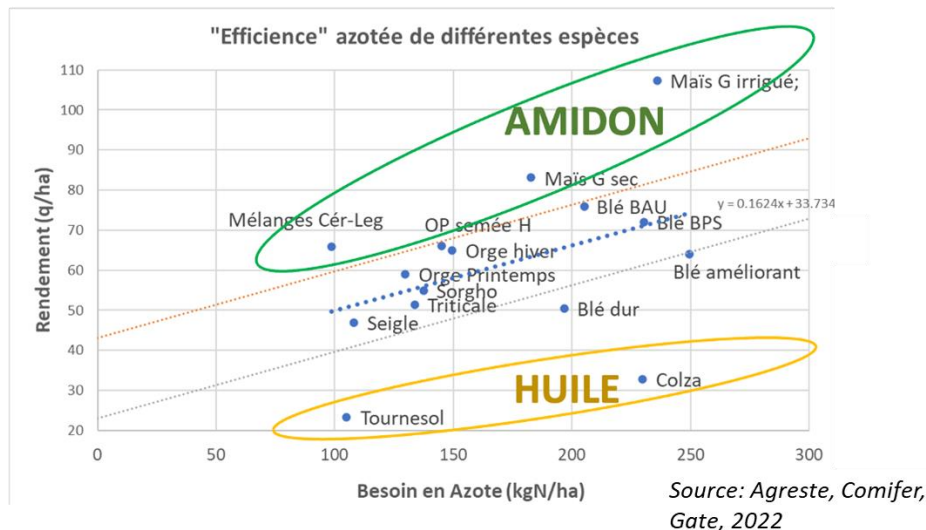
4/ La méthanisation pour valoriser les intercultures/CIVES, produire digestat et énergie

5/ La ré-association entre « agriculture et élevage » à l'échelle territoriale

6/ Conclusion : reconnexion culture-élevage et intégration des systèmes alimentaires pour une gestion durable des agro-écosystèmes

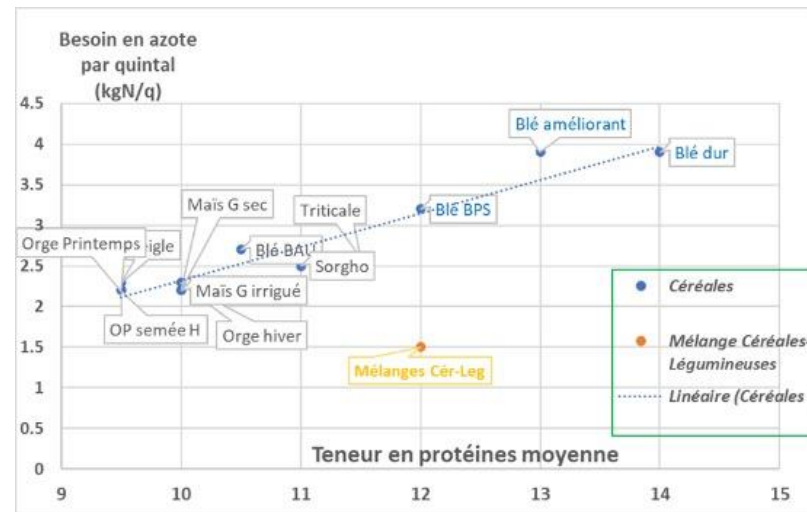
La diversification des cultures pour diminuer la dépendance aux engrais N

Des exigences en N différentes selon les espèces et les débouchés



Ex de voies pour réduire l'utilisation d'engrais N:

- Introduire des espèces à faibles besoins
- Changer la répartition des variétés dans la sole française (blé): BPS=98%
- Modifier les procédés de transformation



La demande en N de chaque espèce de céréales à paille ou du type de variété (de blé tendre) varie également en fonction des exigences qualitatives

Intérêt des légumineuses :

L'introduction de légumineuses dans les successions améliore/ne dégrade pas les performances technico-économiques à l'échelle du système de culture :

Analyse des enquêtes Pratiques Culturelles du SSP (2016): Ex de Bourgogne

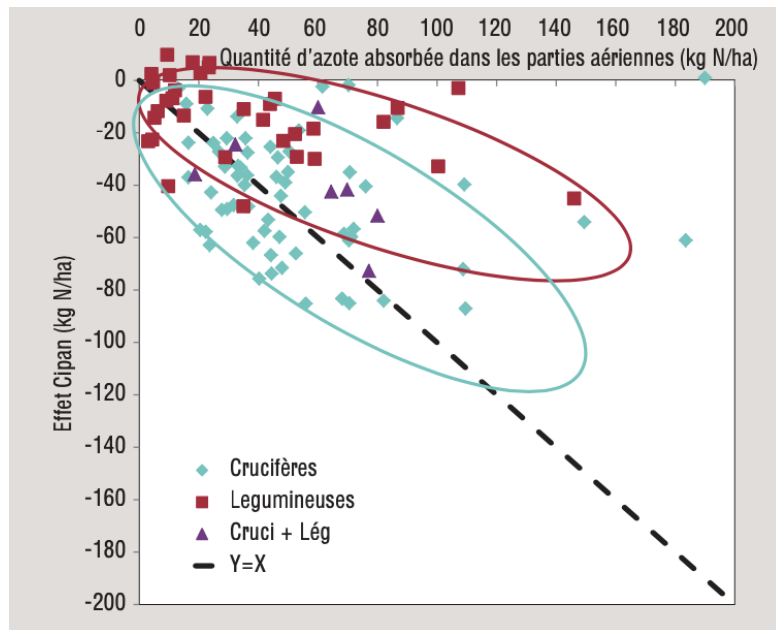
(Ballot et al., 2021)



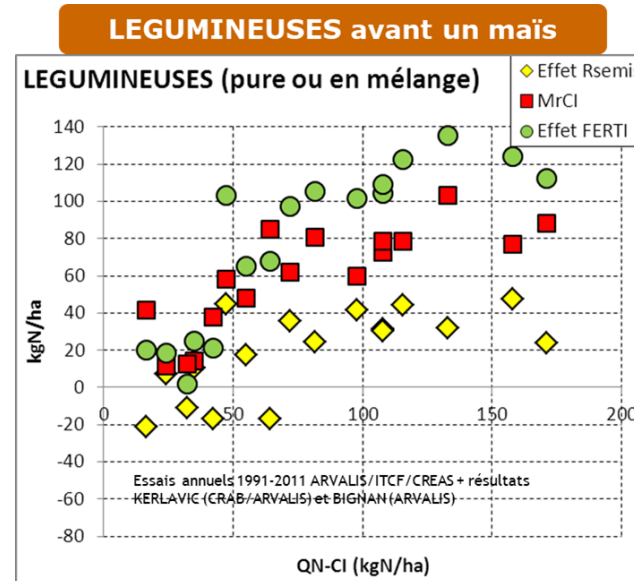
	Fréquence régionale (%)	Dose N (kg/ha)	IFT total	Marge brute (€/ha)	Travail (heures/ha)
Successions avec colza et céréales à paille	53	157 -15% ↓	3,81 -10% ↓	621 == ↓	3,85 == ↓
Successions avec protéagineux	5	134	3,42	622	3,87

La diversification des cultures pour diminuer la dépendance aux engrais N

Intérêt des légumineuses en interculture :



Diminution du stock d'N minéral dans le sol au début du drainage, par rapport à une situation maintenue en sol nu (effet CIPAN), en fonction de la quantité d'N contenue dans les parties aériennes du couvert d'interculture



Quantité d'azote restituée par une culture intermédiaire à un maïs qui suit. L'effet total (effet FERTI, en vert) est dû (i) à la quantité d'azote issue de la minéralisation du couvert (MRCI) et (ii) au reliquat azoté présent au semis (effet Rsems).

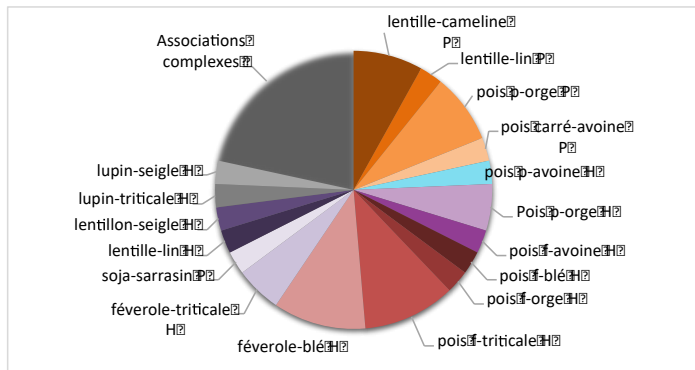
Résultats ARVALIS et Chambres d'Agriculture, 1991-2011.

La diversification des cultures pour diminuer la dépendance aux engrais N

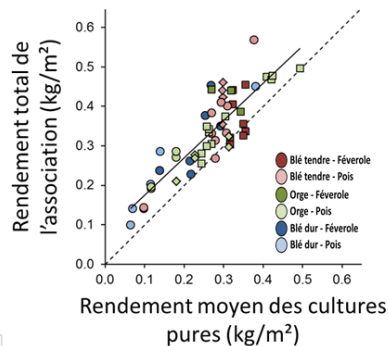
Intérêt des légumineuses en association pluri-spécifique



15 agriculteurs –
36 associations

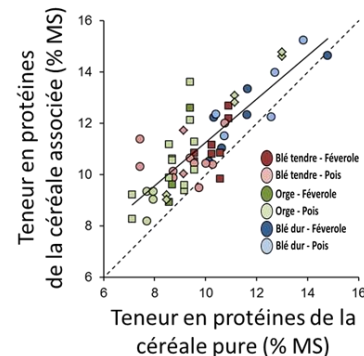


(Lamé et al., 2015)

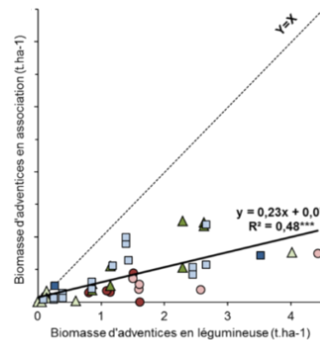


Rendement total de
l'association (kg/m²)

Rendement moyen des cultures
pures (kg/m²)



Taux fixation :
73% vs 61%



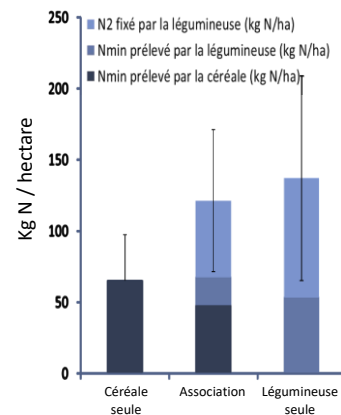
(Bédoussac et al., 2015)

Blé pur:

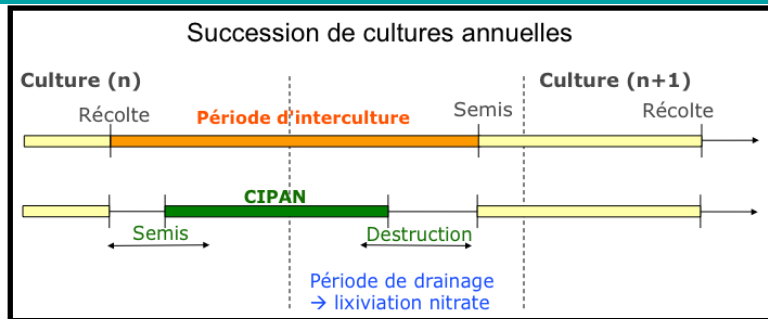
Moy 140 kg N/ha
2,49 kgN/t blé

Blé associé:

Moy 60 kg N/ha
1,36 kgN/t blé

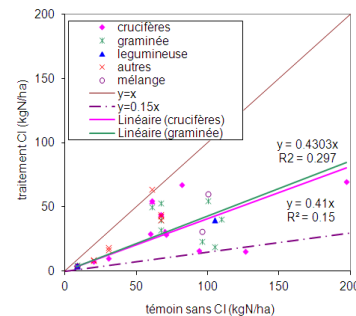


La diversification des cultures pour diminuer la dépendance aux engrais N

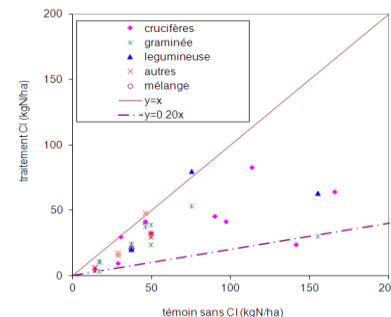


Réduire les pertes nitriques en gérant les intercultures

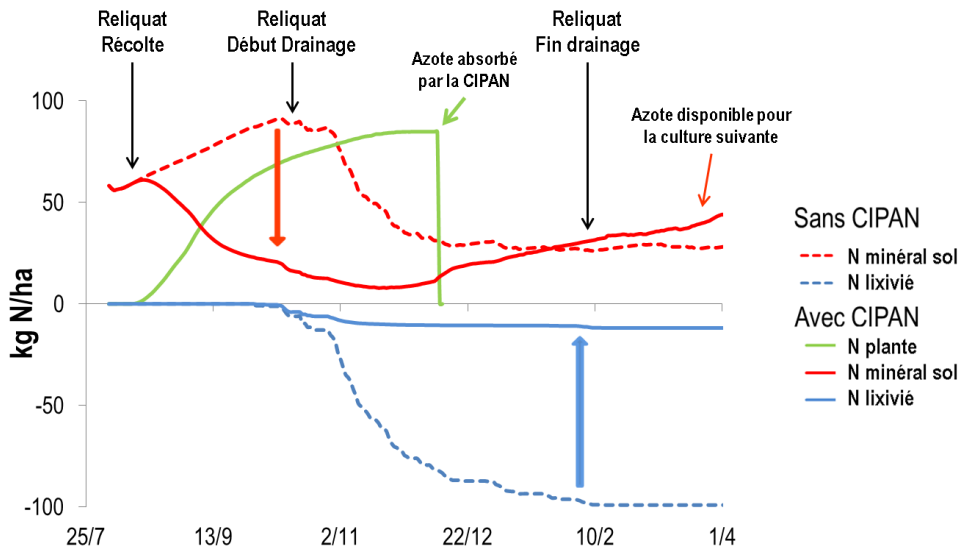
Lixiviation



Concentration en nitrate



Les cultures intermédiaires (CIPAN) sont efficaces pour réduire la lixiviation et la concentration nitrique de l'eau de drainage (taux d'abattement moyen de 53%) mais avec une large gamme d'efficacité due au climat, sol et SdC (Justes et al., 2012)

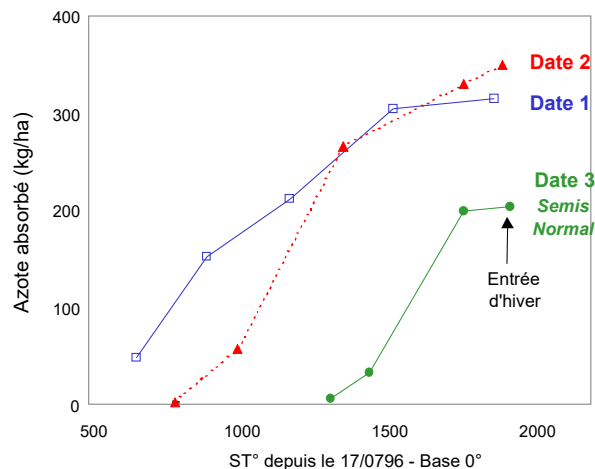


La diversification des cultures pour diminuer la dépendance aux engrais N

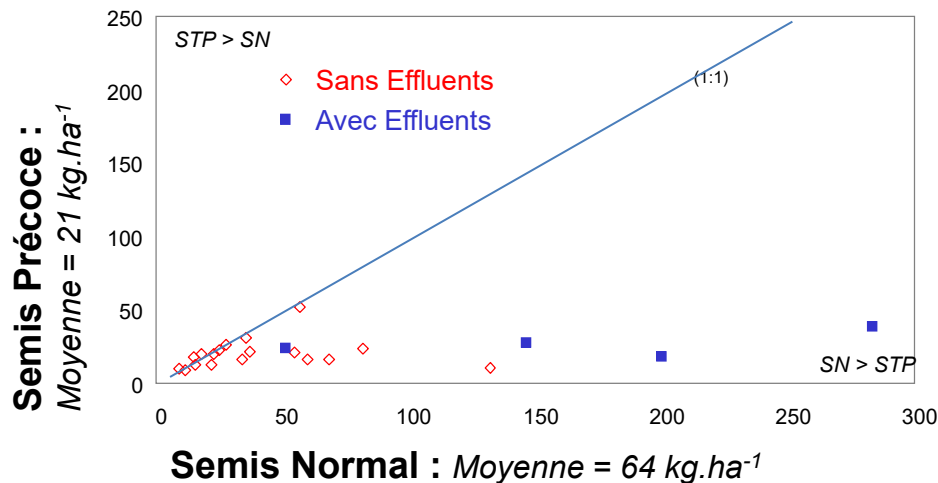
Réduire les pertes nitriques en gérant les intercultures

Les semis très précoces de colza : un moyen efficace pour réduire la lixiviation grâce à la forte capacité d'absorption de cette culture à l'automne
(Dejoux et al., 2003)

Quantité d'N absorbé (kg N/ha)
par un colza à l'automne



Quantité d'N minéral dans le sol (kg N/ha)
Sous colza; Entrée hiver ; 0-90 cm



1/ Les pratiques de fertilisation N des cultures : d'une approche de pronostic vers une approche de diagnostic

2/ La diversification des rotations culturales avec des légumineuses : un moyen de diminuer la dépendance des systèmes de culture à la fertilisation

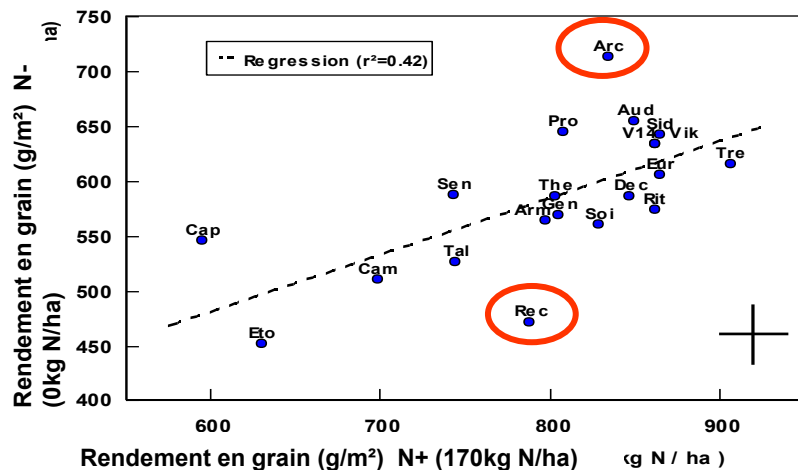
3/ Des variétés pour diminuer la dépendance aux engrais azotés

4/ La méthanisation pour valoriser les intercultures/CIVES, produire digestat et énergie

5/ La ré-association entre « agriculture et élevage » à l'échelle territoriale

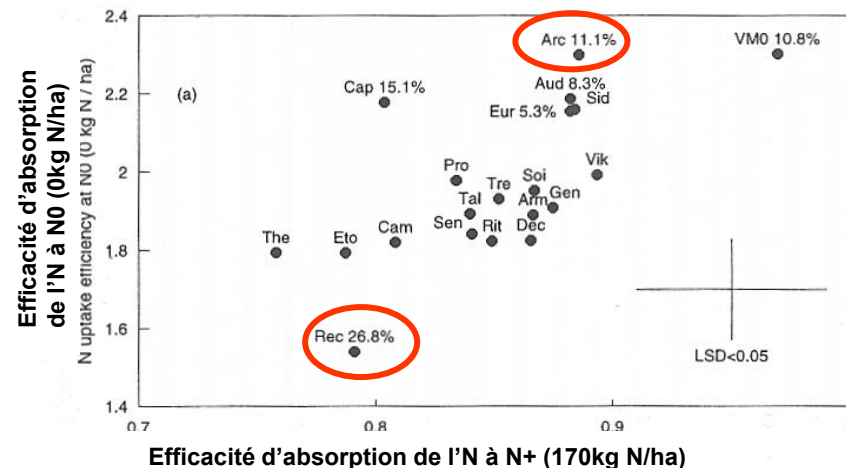
6/ Conclusion : reconnexion culture-élevage et intégration des systèmes alimentaires pour une gestion durable des agro-écosystèmes

Des variétés pour diminuer la dépendance aux engrais azotés



Arche : rendement diminue de 11%
Récital : rendement diminue de 39%

Le Gouis et al., 2000



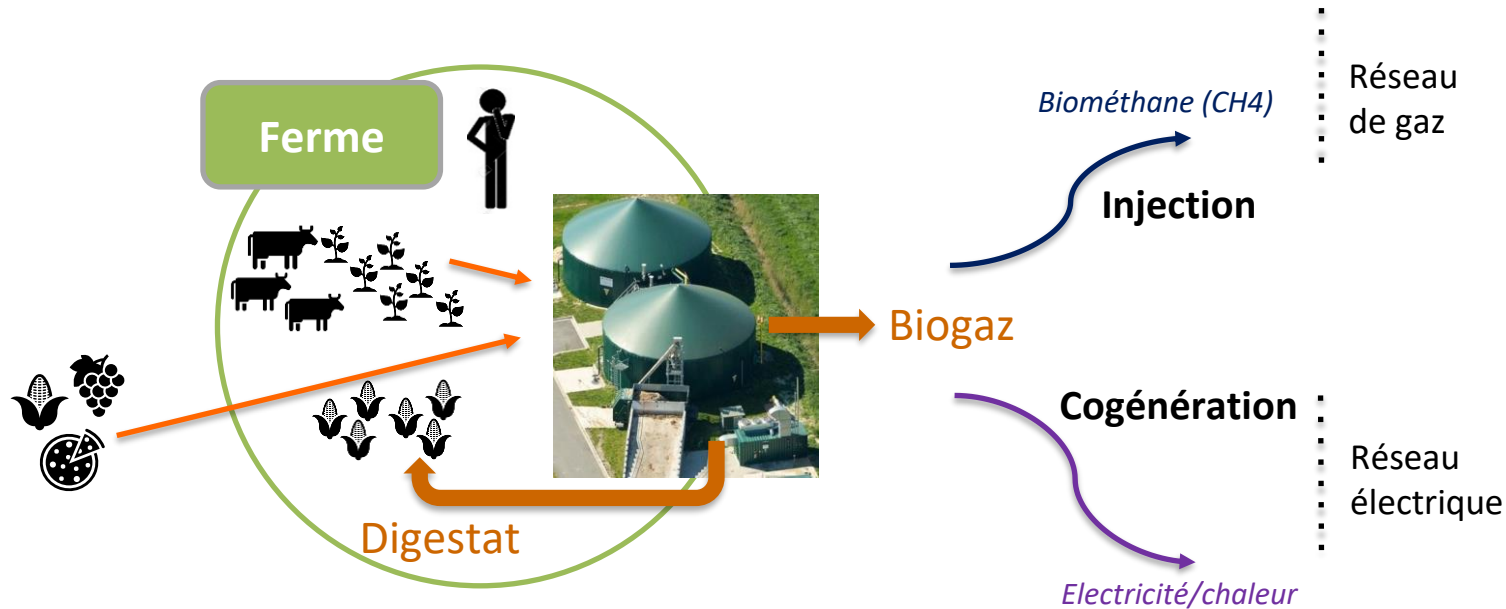
Caractéristiques des variétés à faible dépendance :

- INN élevé à Floraison
- Poursuite de l'absorption post-Flo (syst racinaire actif)
- Bonne remobilisation d'N sans forte sénescence (aspect vert)

- 1/ Les pratiques de fertilisation N des cultures : d'une approche de pronostic vers une approche de diagnostic
- 2/ La diversification des rotations culturales avec des légumineuses : un moyen de diminuer la dépendance des systèmes de culture à la fertilisation
- 3/ Des variétés pour diminuer la dépendance aux engrais azotés
- 4/ La méthanisation pour valoriser les intercultures/CIVES, produire digestat et énergie**
- 5/ La ré-association entre « agriculture et élevage » à l'échelle territoriale
- 6/ Conclusion : reconnexion culture-élevage et intégration des systèmes alimentaires pour une gestion durable des agro-écosystèmes

La méthanisation pour réduire l'usage d'engrais N minéraux

- La méthanisation : processus de fermentation anaérobie de matière organique dans une cuve, qui produit du **biogaz** et un résidu de fermentation, le **digestat** (riche en N)



Mise en pratique de la méthanisation par les agriculteurs (Cadiou, 2023)

Hypothèses couramment évaluées dans la littérature :

l'épandage de digestat permet des économies d'N minéral (effet GES positif) et une bonne maîtrise des risques de pollution, à condition de respecter de bonnes pratiques (*calendrier, doses, enfouissement, substitution*)

Résultats sur la gestion de l'N dans 22 fermes (entretiens): 3 groupes d'agriculteurs

G1 : Pas/peu de réduction	Epandage d'automne Fertilisation de nouvelles cultures	9/22 fermes	G1	« le problème c'est [la compaction]. (...) on ne peut pas y aller au printemps » (Agri E)
G2 : Entre -30% et -60% de l'engrais utilisé	Plus d'épandage au printemps que G1	7/22 fermes	G2	« les 100ha de blé, on a une semaine et demie pour les faire, que avec notre distributeur d'engrais et le pulvé, on y va 3 jours »
G3 : Entre -70% et -100%	Cas 1 : conversion en bio Cas 2 : épandage optimisé	6/22 fermes		

Limites:

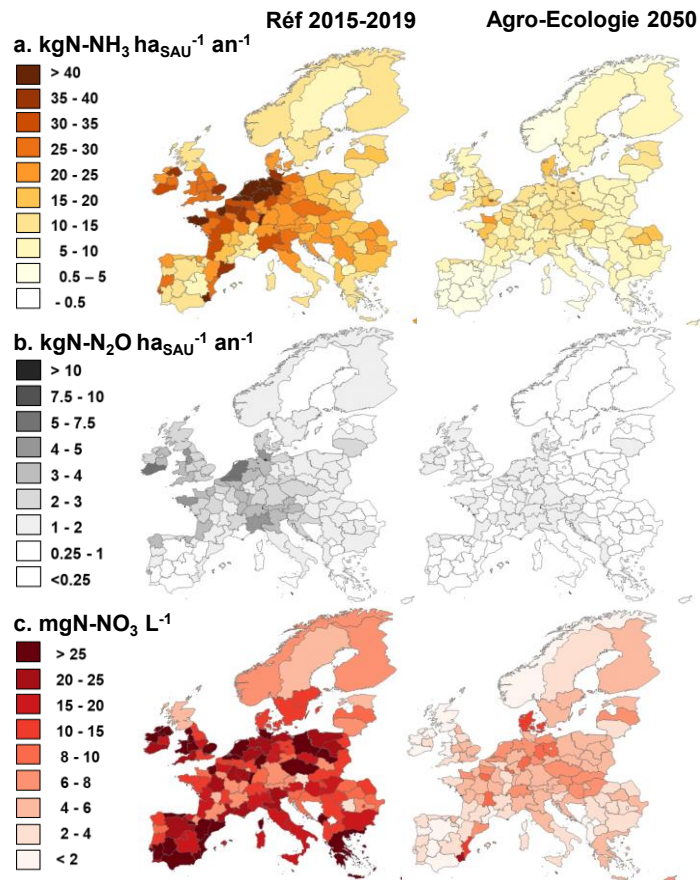
Compétition avec les produits de consommation/ Apport d'azote, de pesticides ou irrigation/ subvention de la production / promesse agroécologique non tenue / développement des méthaniseurs par des entreprises privées « puissantes » (Total, Shell etc.)

- 1/ Les pratiques de fertilisation N des cultures : d'une approche de pronostic vers une approche de diagnostic
- 2/ La diversification des rotations culturales avec des légumineuses : un moyen de diminuer la dépendance des systèmes de culture à la fertilisation
- 3/ Des variétés pour diminuer la dépendance aux engrais azotés
- 4/ La méthanisation pour valoriser les intercultures/CIVES, produire digestat et énergie
- 5/ La ré-association entre « agriculture et élevage » à l'échelle territoriale**
- 6/ Conclusion : reconnexion culture-élevage et intégration des systèmes alimentaires pour une gestion durable des agro-écosystèmes

Synergies entre cultures et élevages pour réduire la dépendance aux engrais N

- **L'élevage pour augmenter la fixation symbiotique:**
 - Diversification permise par adaptation des FAB
 - Possibilité de valoriser les légumineuses dans l'industrie de FAB
 - Valorisation des légumineuses fourragères (pâture, foin) par les ruminants
- **Les effluents d'élevage = source de N qui peut se substituer en partie aux engrais minéraux**
 - Avec des performances similaires (production)
 - Les pertes supérieures (NH₃) peuvent être gérées par de bonnes pratiques
 - MAIS ressource répartie de manière très hétérogène sur le territoire ... liée à des optimisations économiques → séchage ou compostage des effluents pour exporter vers régions de grande culture !
- **La réintégration de troupeaux dans des territoires de grande culture**
 - Plus fréquent avec ovins (y c élevages itinérants)
 - Valorisant aussi les cultures intercalaires
 - Conçue et gérée localement par des collectifs à visée agroécologique

La ré-association entre « agriculture et élevage » à l'échelle territoriale



Distribution régionale des pertes environnementales d'azote pour la situation de référence (2015-2019, Ref), et le scénario à l'horizon 2050 (agroécologique).

Billen et al., 2024

Scénario agroécologique:

- reconnexion culture-élevage
- pas d'importation d'aliments du bétail
- rotations longues en AB
- modification du régime alimentaire humain (30% de protéines animales contre 58% actuel)

- 1/ Les pratiques de fertilisation N des cultures : d'une approche de pronostic vers une approche de diagnostic
- 2/ La diversification des rotations culturales avec des légumineuses : un moyen de diminuer la dépendance des systèmes de culture à la fertilisation
- 3/ Des variétés pour diminuer la dépendance aux engrais azotés
- 4/ La méthanisation pour valoriser les intercultures/CIVES, produire digestat et énergie
- 5/ La ré-association entre « agriculture et élevage » à l'échelle territoriale
- 6/ Conclusion : reconnexion culture-élevage et intégration des systèmes alimentaires pour une gestion durable des agro-écosystèmes**

- ➔ Il existe de nombreuses solutions pour améliorer le bouclage du cycle de l'N et réduire les pertes N : depuis l'amélioration de la fertilisation N jusqu'à la reconnexion culture-élevage,
- ➔ Ces solutions sont avant tout des pratiques culturelles, à raisonner de manière systémique (d'où la difficulté actuelle à les mobiliser...)
- ➔ Mobiliser l'ensemble des acteurs est INDISPENSABLE pour un changement en profondeur ... Cela prendra du temps et il faut y travailler collectivement !
- ➔ Construire, avec les acteurs locaux des territoires, des scénarios partagés d'évolution de l'agriculture moins dépendante des engrais N
- ➔ Développer les dispositifs pour ACCOMPAGNER les agriculteurs (et autres acteurs) dans la maîtrise de l'N dans les systèmes de culture



Groupe N



Vers une gestion intégrée de l'N dans les agrosystèmes

Marie-Hélène Jeuffroy, INRAE Saclay

Avec les contributions de :

Josette Garnier, Philippe Gate, André Gallais,
Jean-Louis Peyraud, Christian Rousseau, Philippe Viaux,

Séance du 15 Novembre 2025