



Synthèse thématique

Comment insérer de l'azote dans les systèmes de culture ?



UNION EUROPEENNE

REGION
BOURGOGNE
FRANCHE
COMTE

avec le Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER)
L'Europe investit dans les zones rurales.

Octobre 2021

**Synthèse réalisée par le
Groupe Opérationnel PROTEINS
porté par la Chambre Régionale d'Agriculture
de Bourgogne-Franche-Comté.**

Auteurs :

Hélène GAUCHEZ (CRA BFC)
Christophe LECOMTE (INRAE)
Delphine de FORNEL (Terres Inovia)
Marie-Sophie PETIT (CRA BFC)

Co-auteurs :

Maé GUINET (Institut Agro Dijon)
Cécile REVELLIN (INRAE)
Florent LEVAVASSEUR (INRAE)
Marc MORAINÉ (INRAE)

Claudine FERRANÉ (Centre de Ressources Captages - UMR Agronomie-INRAE AgroParisTech)

Table des matières

I.	L'azote dans les cultures, un sujet d'actualité	2
II.	Comment insérer efficacement de l'azote dans les systèmes de culture grâce aux légumineuses ?	2
1)	Ce qu'il faut savoir sur la fixation symbiotique & l'effet précédent (Guinet (Institut Agro Dijon), Webinaire GO PROTEINS, 2021)	2
2)	Ce qu'il faut savoir sur l'inoculation (Revellin (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021)	4
III.	Comment insérer efficacement de l'azote dans les systèmes de culture grâce aux produits organiques ?	5
1)	Quel produit organique choisir ? (Levasseur (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021)	5
2)	Faciliter la fourniture de produits organiques en favorisant les échanges entre culture et élevage (Moraine (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021).....	6
IV.	Des pistes pour conserver l'azote acquis en réduisant les pertes dans l'air et vers les eaux	7
1)	Comment limiter les pertes d'azote vers les eaux (Ferrané (Centre de Ressources Captages), Webinaire GO PROTEINS, 2021).....	7
2)	Comment limiter les pertes d'azote ammoniacal vers l'air (Levasseur (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021).....	8
V.	Conclusion – Comment insérer de l'azote dans les systèmes de culture ?	9
VI.	Références bibliographiques et sources	10

I. L'azote dans les cultures, un sujet d'actualité

Depuis le début de l'année 2021, l'augmentation du prix des engrais azotés a dépassé 150% pour atteindre 600 €/t à la fin de cette même année.

Ces enjeux économiques poussent à diversifier les sources d'azote grâce aux légumineuses ou aux produits organiques et aussi à optimiser l'usage de cet azote. Les enjeux sont aussi d'ordre écologique avec la pollution des eaux de surface et des nappes phréatiques provoquée par les engrais azotés.

Les webinaires du 6 juillet et 27 septembre 2021 (GO PROTEINS, 2021), proposés par le Groupe Opérationnel (GO) PROTEINS, ont eu pour objectif **d'apporter des leviers pour minimiser les apports d'azote minéral et utiliser au mieux les apports effectués...**

- **à l'échelle de la parcelle : la culture des légumineuses (fourragères et à graines)** prend une place de plus en plus importante dans les assolements notamment à cause des impasses sanitaires rencontrés pour la culture du colza dans les secteurs de production dits « historiques » comme les plateaux bourguignons. Les rendements pour les cultures de légumineuses obtenus ces dernières années sont très impactés par les aléas climatiques (gel, sec, chaud) et elles se révèlent par conséquent plus aléatoires que ceux obtenus par le colza auparavant. En revanche, l'avantage de ces cultures est qu'elles **restituent de l'azote aux cultures suivantes** et donc permettent d'économiser sur les apports d'engrais azotés au niveau de la rotation.
 - **à l'échelle des territoires** : des pistes nouvelles existent avec **l'azote d'origine organique et les opportunités d'échanges entre céréaliers et éleveurs** permettant également d'économiser sur les apports d'engrais minéral azoté.
- Ce document résume les points principaux évoqués lors de ces événements et met en avant les pistes pour favoriser l'introduction d'azote, autre que minéral, dans les systèmes de culture.

II. Comment insérer efficacement de l'azote dans les systèmes de culture grâce aux légumineuses ?

1) *Ce qu'il faut savoir sur la fixation symbiotique & l'effet précédent (Guinet (Institut Agro Dijon), Webinaire GO PROTEINS, 2021)*

Le rendement du blé est supérieur quand il est précédé par une légumineuse, comparée à un précédent céréale. La fixation symbiotique et l'effet précédent sont différents selon l'espèce de légumineuse. Comme montré sur la Figure 1, les féveroles, lentilles, vesce de Narbonne ont conduit au meilleur rendement du blé suivant.

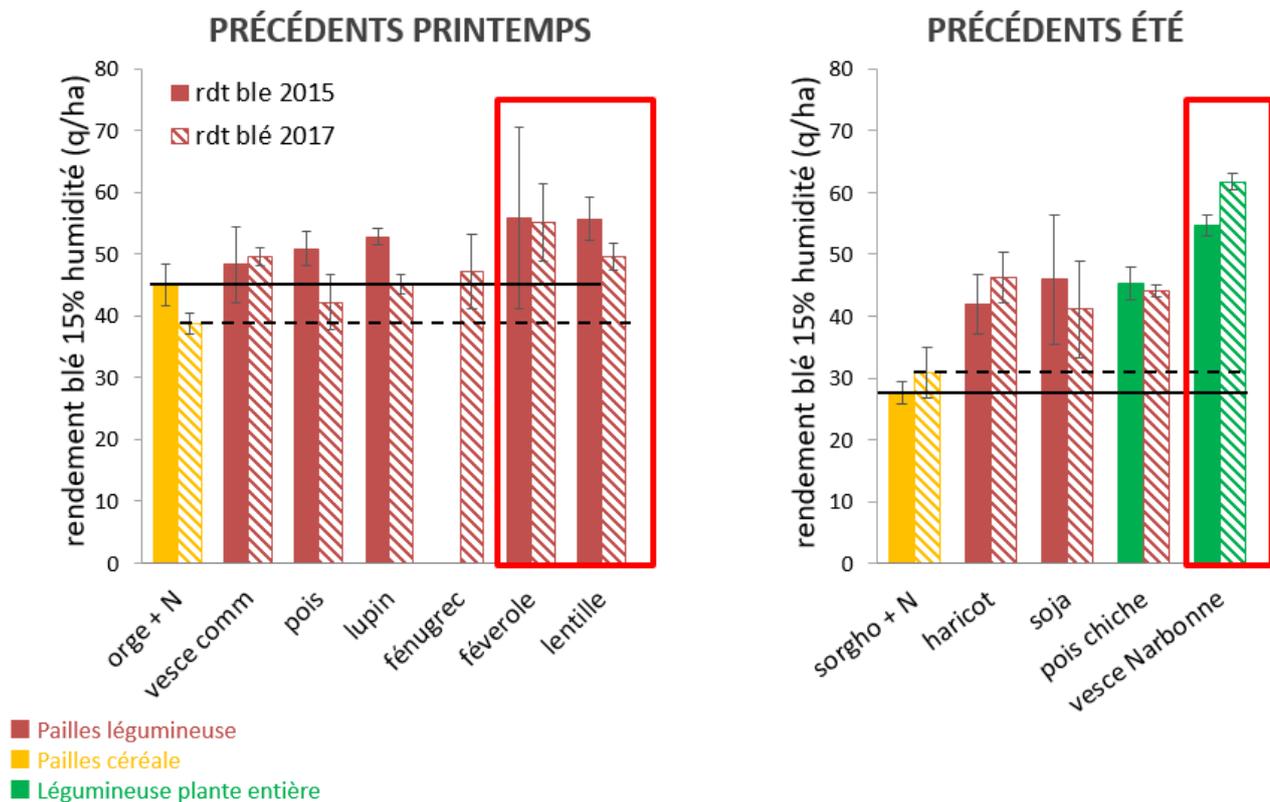


Figure 1 - Comparaison de l'effet précédent de différentes espèces de légumineuses sur du blé (calcul du rendement en q/ha) en 2015 et 2017 (Guinet (Institut Agro Dijon), Webinaire GO PROTEINS, 2021)

Globalement, pour toutes les espèces de légumineuses, **plus le niveau d'azote minéral dans le sol augmente, plus la fixation symbiotique diminue**. Ainsi on maximise la fixation symbiotique quand il y a pas ou peu d'azote minéral.

Le rapport Carbone / Azote (C/N) des résidus est différent selon la légumineuse. En effet, dans l'étude la vesce de Narbonne a un rapport C/N de 15 : ce résultat est dû à l'absence de production de graines. Pour la féverole et la lentille, le ratio C/N est d'environ 30-35 et pour le soja 70. **Plus le rapport C/N est faible, plus la minéralisation des résidus est importante et donc libère de l'azote pour la culture suivante**. Ceci explique la variation des effets précédents entre les espèces de légumineuses.

Cependant, **plus l'effet précédent est important, plus le risque de perte par lessivage est élevé**. Il faut donc être vigilant pour que cet azote soit valorisé par la culture suivante (voir partie « Comment limiter les pertes d'azote vers les eaux ? »).

Zoom sur les autres services rendus par les légumineuses

- Production de graines riches en protéines
- Régulation du climat via la réduction des fertilisants azotés et la diminution d'émission de N₂O
- Diversification des systèmes de culture : régulation des bioagresseurs et service de pollinisation
- Moyen de multiplier les microorganismes d'intérêt et de leur fournir de l'énergie « gratuitement ». Utiliser une légumineuse pour multiplier les microorganismes plutôt que d'introduire des biostimulants représente un intérêt économique.

2) Ce qu'il faut savoir sur l'inoculation (Revellin (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021)

Il existe un **dialogue moléculaire spécifique entre la légumineuse et les bactéries de type rhizobia**. Les rhizobia sont naturellement présents dans tous les sols mais toutes les souches ne sont pas présentes partout, il faut donc parfois inoculer, c'est-à-dire introduire les rhizobia dans le sol.

Quand la légumineuse n'est pas présente à l'état spontané dans les sols, les rhizobia qui permettent la nodulation sont généralement absents : c'est le cas du soja et du pois chiche en région Bourgogne-Franche-Comté.

De plus, **les caractéristiques physico-chimiques des sols ont également un impact sur les espèces de rhizobia**. Par exemple, ces dernières n'ont pas la même sensibilité au pH (Tableau 1).

Espèces de rhizobia	Légumineuse	pH 4	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	
<i>Bradyrhizobium lupini</i>	Lupin						
<i>Bradyrhizobium diazoefficiens</i>	Soja	Absent des sols européens					
<i>Rhizobium leguminosarum</i> bv <i>trifoli</i>	trèfle						
<i>Rhizobium leguminosarum</i> bv <i>viciae</i>	Pois, lentille, vesce						
<i>Mesorhizobium ciceri</i>	Pois chiche						
<i>Ensifer meliloti</i>	Luzerne, medique						

pH optimal (vert foncé) → rhizobium présent en quantité optimale pour nodulation

pH défavorable (rouge) → rhizobium absent des sols

Tableau 1 - Sensibilité de différentes espèces de rhizobia au pH du sol (Drew, E. A. et al., Eds., 2012)

➤ Choix des souches :

Toutes les souches nodulantes de rhizobia n'ont pas la même efficacité pour fixer l'azote atmosphérique. **Les souches qui entrent dans la fabrication des inoculums sont sélectionnées sur leur capacité à fixer l'azote** avec la légumineuse considérée et sur leur compétitivité pour la nodulation (aptitude à former des nodosités en présence d'autres souches).

Il peut arriver que des souches soient abondantes naturellement mais inefficaces, il est donc nécessaire d'inoculer une souche **efficace et compétitive pour la nodulation**.

De plus, si les souches spécifiques sont absentes dans le sol, l'inoculation est nécessaire avec une souche efficace. A noter que dans ce cas la compétitivité pour la nodulation n'est pas recommandée afin de pouvoir la remplacer si besoin dans le futur par des souches encore plus efficaces. C'est le cas du soja en France : la souche utilisée de *Bradyrhizobium diazoefficiens* G49 est peu compétitive mais efficace.

➤ Les semences pré inoculées : une innovation avec des points de vigilance

Des semences pré inoculées avant commercialisation sont maintenant disponibles pour le soja et la luzerne. Ce sont de réelles innovations en termes de facilité de travail pour les producteurs. Néanmoins, quelques points de vigilance sont à souligner :

- les agriculteurs n'ont plus à gérer le poste inoculation mais, de ce fait, ils **ne peuvent plus utiliser leurs graines de ferme** et ont recours à des semences certifiées.

- quand les autorisations de mise sur le marché (AMM) se font par reconnaissance mutuelle entre les états européens, il n'y a **pas les mêmes garanties de qualité des inoculants, en particulier sur les critères de compétitivité et d'efficacité des souches**. En effet, ce type d'AMM est une procédure allégée qui peut être appliquée lorsque l'inoculant a déjà été officiellement autorisé par un état membre de l'Union Européenne. La limite est que l'évaluation des inoculants n'est pas basée sur les mêmes critères d'un pays à l'autre.

➤ **Point d'actualité sur l'inoculum pois chiche :**

Actuellement, aucun inoculum pour le pois chiche n'est disponible sur le marché Français. Il faut veiller à ne pas contaminer les sols avec des souches compétitives qui ne pourraient pas être remplacées à l'avenir. La sélection de souches est en cours à l'INRAE (Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) en collaboration avec Terres Inovia.

Zoom sur les autres services rendus par les inoculants multifonctions

- Réduction du gaz à effet de serre N₂O (protoxyde d'azote) en N₂ (projet ISITE-Industrie en Bourgogne-Franche-Comté NatadGES)
- Solubilisation des phosphates
- Stimulation des défenses de la plante
- Association des rhizobia avec des champignons mycorrhizogènes, biopesticides, micronutriments...

III. Comment insérer efficacement de l'azote dans les systèmes de culture grâce aux produits organiques ?

1) Quel produit organique choisir ? (Levasseur (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021)

Il existe une diversité de Produits Résiduaire Organiques (PRO) d'origines variées (agricole, urbaine, industrielle) qui ont une caractéristique commune : **ils sont souvent peu concentrés en éléments nutritifs par rapport aux engrais minéraux et une partie de l'azote contenue est sous forme organique**. L'azote sous cette forme n'est pas disponible pour les cultures et devra être minéralisé avant d'être absorbé par la plante.

Azote disponible = azote minéral (N-NO₃-NH₄) + azote organique rapidement minéralisable

La minéralisation nette d'azote dépend en partie du rapport C/N de la matière organique (MO) et de sa biodégradabilité (Tableau 2).

	MO facilement dégradable	MO difficilement dégradable
C _{org} /N _{org} bas	+ minéralisation N (fourniture de N)	Faible minéralisation ou immobilisation
C _{org} /N _{org} élevé	+ immobilisation N (prélèvement N minéral du sol par les microorganismes)	

Tableau 2 – Minéralisation de l'azote en fonction de l'état de la matière organique et du rapport C/N (Levasseur (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021)

Les teneurs en azote minéral et organique sont **très variables entre types de PRO** (agricole, urbain, industrie agroalimentaire) (CRAGE, 2019 ; données internes INRAE) mais aussi **au sein de chaque type de PRO** (par exemple : lisier de bovin, lisier de porcin, fumier de bovin...) (Houot *et al.*, 2014 ; données internes INRAE). La minéralisation de l'azote organique des PRO est également variable (Levavasseur *et al.*, 2021) :

- L'azote organique de certains PRO **est bien minéralisé** comme pour la fiente et le lisier porcin, les boues et d'autres produits spécifiques ;
- d'autres PRO présentent une minéralisation de leur azote organique généralement limitée, comme les composts et digestats ;
- et certains **immobilisent l'azote** comme le fumier de cheval.

En prenant en compte toutes ces variabilités, un classement des PRO est présenté dans le tableau 3 en fonction de l'azote disponible à des doses agronomiques classiques.

PRO	Dose classique (t/ha)	N total (kg/ha)	N-NH4 (kg/ha)	N organique (kg/ha)	Minéralisation Norg (%)	N disponible (kg/ha)
Compost de déchets verts	20	167	9	157	-1	8
Fumier de litière accumulée	30	174	22	152	3	26
Boues urbaines épaissies chaulées	10	93	1	92	32	31
Lisier non dilué	40	140	70	70	-1	69
Engrais organique	1	120	0	120	60	72
Fientes (séchées)	5	203	25	178	30	78
Lisier porcin mixte	40	144	108	36	20	115
Digestat brut de CIVE	40	196	112	84	9	120

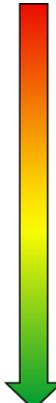


Tableau 3 – Classement des PRO en fonction de l'azote disponible à des doses agronomiques classiques (Source : Florent LEVAVASSEUR, INRAE, Webinaire GO PROTEINS 27/09/2021)

Finalement, aux doses agronomiques classiques, peu de Produits Résiduaire Organiques sont efficaces à court terme, excepté les digestats, lisier et fientes par exemple. Cependant, **il est intéressant d'effectuer des apports répétés dans le temps pour bénéficier de l'effet à long terme des PRO sur l'augmentation de la matière organique du sol et de la minéralisation de l'azote.**

Pour atteindre l'autonomie azotée dans des systèmes conventionnels, les gisements de PRO vont être limitants, il faudra donc actionner d'autres leviers pour rechercher l'autonomie, et notamment l'implantation de légumineuses.

2) Faciliter la fourniture de produits organiques en favorisant les échanges entre culture et élevage (Moraine (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021)

La situation actuelle présente un système où culture et élevage coexistent en étant déconnectés spatialement et dans le temps (Figure 2.a). L'idéal serait de tendre vers des **modèles de complémentarité, voire de synergies (locales ou territoriales) entre animaux, culture et prairie** : ceci peut se raisonner à l'échelle d'une ferme, d'un petit groupe de fermes (Figure 2.b) ou à l'échelle territoriale. Ces modèles sont plus complexes et demandent une coordination temporelle et spatiale pouvant nécessiter un accompagnement.

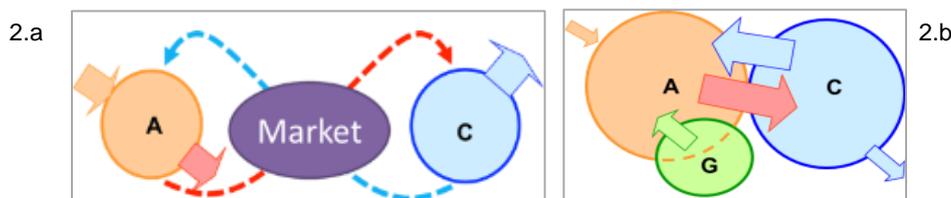


Figure 2 – Schémas représentant le système actuel de coexistence entre culture et élevage (2.a) et le système de complémentarité et synergie locales (2.b) (Moraine (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021)

Une piste pour amorcer cet accompagnement est le jeu sérieux Dynamix (Ryschawy et al., 2018). Cet outil permet de concevoir des scénarios d'intégration culture – élevage à l'échelle du territoire tout en prenant en compte les aspects techniques et organisationnels. Le modèle en ligne permet de simuler et évaluer les scénarios d'échange en estimant les performances techniques, économiques, environnementales, et la charge de travail.

Exemple d'un échange gagnant-gagnant entre un céréalier et un éleveur

Visionner le témoignage :
https://www.youtube.com/watch?v=6-bFsH7sZxI&list=PL9_xAakfBpen_NVlrMGzjsWf-JXiEfXOj&index=24

IV. Des pistes pour conserver l'azote acquis en réduisant les pertes dans l'air et vers les eaux

1) Comment limiter les pertes d'azote vers les eaux (Ferrané (Centre de Ressources Captages), Webinaire GO PROTEINS, 2021)

Les légumineuses peuvent laisser une quantité d'azote importante à la récolte (voir partie « Ce qu'il faut savoir sur la fixation symbiotique & l'effet précédent »). **Cet azote est susceptible d'être perdu par lixiviation** (vers les eaux) s'il n'est pas capté par un couvert végétal. Pour limiter ces pertes potentielles, **une attention particulière doit être donnée à la période d'interculture** (après la récolte de la légumineuse et avant l'implantation de la culture suivante).

La lixiviation est un phénomène saisonnier qui dépend du milieu et du système de culture.

En tendance climatique, le drainage commence fin octobre et 80% du drainage est observé avant février (Source : Arvalis de Boigneville - Essonne).

Les pertes d'azote varient selon le type de sol et la pluie de l'hiver. **La réduction des pertes d'azote vers les eaux est un enjeu important.**

Le Reliquat Début Drainage (RDD) dépend :

- de la quantité d'azote laissée à la récolte de la culture précédente
- de la minéralisation d'été et automne
- d'un apport estival éventuel d'azote en été ou automne
- de l'azote absorbé par les plantes présentes avant la période de drainage

Plusieurs pistes sont possibles pour limiter ce Reliquat Début Drainage :

- **Ajuster la fertilisation azotée et minérale de la culture précédente**
- **Apporter l'azote organique hors des périodes de lessivage**
- **Adapter l'apport d'azote organique ou minéral estival en fonction de ce que peut prélever la culture suivante ou la CIPAN (Culture Intermédiaire Piège à Nitrate)**
- **Mettre en place des cultures qui captent l'azote avant le lessivage** comme le colza qui a de fortes capacités d'absorption
- **Semer des CIPAN en particulier en interculture longue ou favoriser les repousses de la culture précédente (en interculture courte)**

L'interculture longue est celle qui est entre une culture récoltée en été et une culture suivante semée au printemps. **En interculture longue il est nécessaire de mettre en place des CIPAN pour piéger l'azote et ainsi diminuer sa perte.** Le choix des CIPAN va dépendre de la rotation et des autres services souhaités.

Il est important de semer la CIPAN le plus rapidement possible après la récolte du précédent afin de profiter de l'humidité restante en surface permettant à la CIPAN de s'installer.

2) Comment limiter les pertes d'azote ammoniacal vers l'air (Levavasseur (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021)

L'azote ammoniacal est très sensible à la volatilisation. **Ce phénomène peut entraîner une pollution de l'air et une perte de la valeur fertilisante du Produit Résiduaire Organique d'où l'importance de limiter cette volatilisation.**

Plusieurs pistes sont possibles pour limiter la volatilisation de l'azote ammoniacal :

- **Préférer l'épandage des matières organiques au pendillard plutôt qu'à la buse palette**
- **Réaliser un enfouissement le plus rapide possible après épandage quand cela est possible, ou injecter directement le PRO dans le sol**
- **Eviter les apports de PRO avec des météo défavorables (vent, fortes chaleurs), à l'inverse une pluie suivant l'épandage limitera la volatilisation**
- **Privilégier les produits liquides qui vont s'infiltrer rapidement dans le sol et donc être moins sensibles à la volatilisation**

Par exemple, le digestat liquide va s'infiltrer dans le sol et ainsi moins se volatiliser qu'un digestat brut qui va rester à la surface du sol (Figure 3).

Cependant, il faut préciser que ces produits liquides sont souvent plus concentrés en azote ammoniacal, ce qui peut contre balancer l'intérêt de ces produits.

- **Eviter les sols calcaires et les PRO au pH élevé**

La volatilisation dépend d'un équilibre acido-basique du sol et du produit qui est épandu. **Quand le pH du sol ou du produit est élevé, la volatilisation augmente** : c'est le cas des sols calcaires.

Les lisiers de bovin ont un pH en général plus faible que les digestats et sont donc moins sensibles à la volatilisation (Figure 3), à autres caractéristiques (teneur en ammonium, matière sèche) égales.

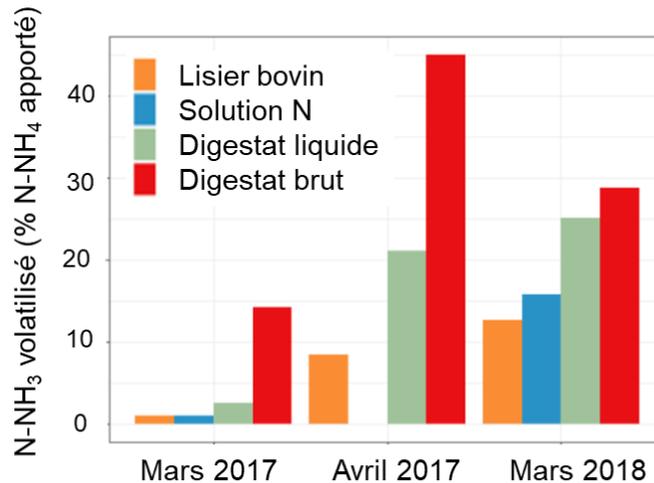


Figure 3 – Mesures de volatilisation sur différents essais d'épandage d'effluents d'élevage
(Données internes ECOSYS, Moinard, 2021)

V. Conclusion – Comment insérer de l'azote dans les systèmes de culture ?

Pour rappel, les pressions économique et écologique poussent à limiter l'utilisation d'azote minéral. Deux alternatives sont alors possibles :

- Insérer de l'azote via les légumineuses.
- Insérer de l'azote via les produits résiduaux organiques.

L'utilisation des légumineuses permet d'augmenter l'autonomie azotée de l'exploitation tout en diversifiant le système de culture et en renforçant l'autonomie protéique de l'exploitation ou du territoire.

L'utilisation des produits résiduaux organiques peut s'organiser à l'échelle du territoire avec des échanges entre céréalier et éleveur.

Insérer de l'azote n'est pas suffisant, il faut ensuite veiller de ne pas le perdre par lixiviation ou par volatilisation. L'enjeu est d'optimiser la valorisation et l'absorption de l'azote par les cultures.

VI. Références bibliographiques et sources

- CRAGE, 2019. Digestats de méthanisation : Optimiser le retour au sol pour profiter des bénéfices agronomiques et économiques. Résultats d'essais et suivis d'exploitations. Bilan de 4 années
- Drew, E. A., Denton, M. D., Sadras, V. O., & Ballard, R. A. (2012). Agronomic and environmental drivers of population size and symbiotic performance of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* in Mediterranean-type environments. *Crop and Pasture Science*, 63(5), 467-477.
- Ferrané C (Centre de Ressources Captages), Webinaire GO PROTEINS, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=F5whVasTtq4>
- GO PROTEINS, 2021 (replays du webinaire). <https://bourgognefranche-comte.chambres-agriculture.fr/recherche-innovation/groupe-operationnels-et-projet-du-pei-agri/go-proteins/introduction-dazote-dans-les-systemes-de-culture/>
- Guinet M (Institut Agro Dijon), Webinaire GO PROTEINS, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=huR5NiDOtyQ>
- Houot, S., Pons, M. N., & Pradel, M. (2014). Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Rapport final de l'expertise scientifique collective.
- Levavasseur, F., Lashermes, G., Mary, B., Morvan, T., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., & Houot, S. (2021). Quantifying and simulating carbon and nitrogen mineralization from diverse exogenous organic matters. *Soil Use and Management*, 38(1), 411–425. <https://doi.org/10.1111/sum.12745>
- Levavasseur F (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=fwC2wSDbqfY>
- Moinard, V. (2021). Conséquences de l'introduction de la méthanisation dans une exploitation de polyculture-élevage sur les cycles du carbone et de l'azote. Combinaison de l'expérimentation et de la modélisation à l'échelle de la ferme. PhD thesis, Université Paris-Saclay. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03485490>
- Moraine M (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=RmydOWDmaXk>
- Revellin C (INRAE), Webinaire GO PROTEINS, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=YSIAVEIcUSw>
- Ryschawy J, Charreau A, Pelletier A, Moraine M, Martin G, 2018. Dynamix, un "jeu sérieux" pour concevoir des scénarios d'échanges entre céréaliers et éleveurs. Une application en Ariège. Fourrages 235.

En partenariat avec :



**Espoir
Viande
Puisaye**



INRAE

