

GESTION DE L'AZOTE EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

FICHES THÉMATIQUES



LEVIERS MOBILISABLES POUR LA GESTION DE L'AZOTE EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

L'azote joue un rôle déterminant sur le rendement des cultures et sur la qualité des productions. Les plantes puisent cet élément dans le sol sous forme minérale ou dans l'air pour le cas des légumineuses.

En Agriculture Biologique, l'enjeu est d'utiliser au mieux les processus naturels pour apporter de l'azote aux cultures : fixation de l'azote de l'air par les légumineuses, piégeage de l'azote en interculture par les couverts végétaux... Cet enjeu est prégnant dans les systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage, où les possibilités d'apporter des produits organiques sont limitées. La connaissance du cycle de l'azote est ainsi essentielle afin d'identifier les leviers pour introduire de l'azote dans les parcelles et en limiter les pertes.

Cycle de l'azote

Les processus en jeu sur une parcelle, décrits ci-après, produisent de l'azote sous différentes formes et concourent à rendre cet élément mobilisable par la plante ou au contraire à le rendre indisponible.

La fixation libre et la déposition atmosphérique ①

Ces processus permettent de capter une partie de l'azote de l'air :

- par les bactéries du sol qui le fixent et permettent ainsi son incorporation dans des composés organiques
- par les pluies et les particules se déposant au sol.

La fixation symbiotique ②

Il s'agit de la fixation du diazote de l'air (N_2) par les légumineuses.

La minéralisation ③

La minéralisation transforme l'azote organique (apporté par les fertilisants, les résidus de cultures ou issu de l'humus du sol) en ammonium (NH_4^+) sous l'effet de l'activité microbienne. Cependant, l'ammonium est moins facilement assimilable par la

plante que le nitrate (NO_3^-) car il se fixe sur les minéraux du sol alors que le nitrate est très mobile dans l'eau. Le nitrate va être produit par la nitrification ④ de l'ammonium par les bactéries du sol.

En l'absence d'oxygène (compactage du sol ou eau stagnante), des phénomènes de dénitrification ⑤ ont lieu, produisant du protoxyde d'azote (N_2O), du monoxyde d'azote (NO) ou du diazote (N_2) à partir de l'ammonium.

Un tiers de la minéralisation de l'azote du sol se produit à l'automne lorsque le sol est peu couvert. Cela entraîne un risque de perte d'azote important sur cette période.

La lixiviation ⑥

L'eau du sol peut entraîner le nitrate en profondeur, surtout en hiver lorsque la pluviométrie est importante.

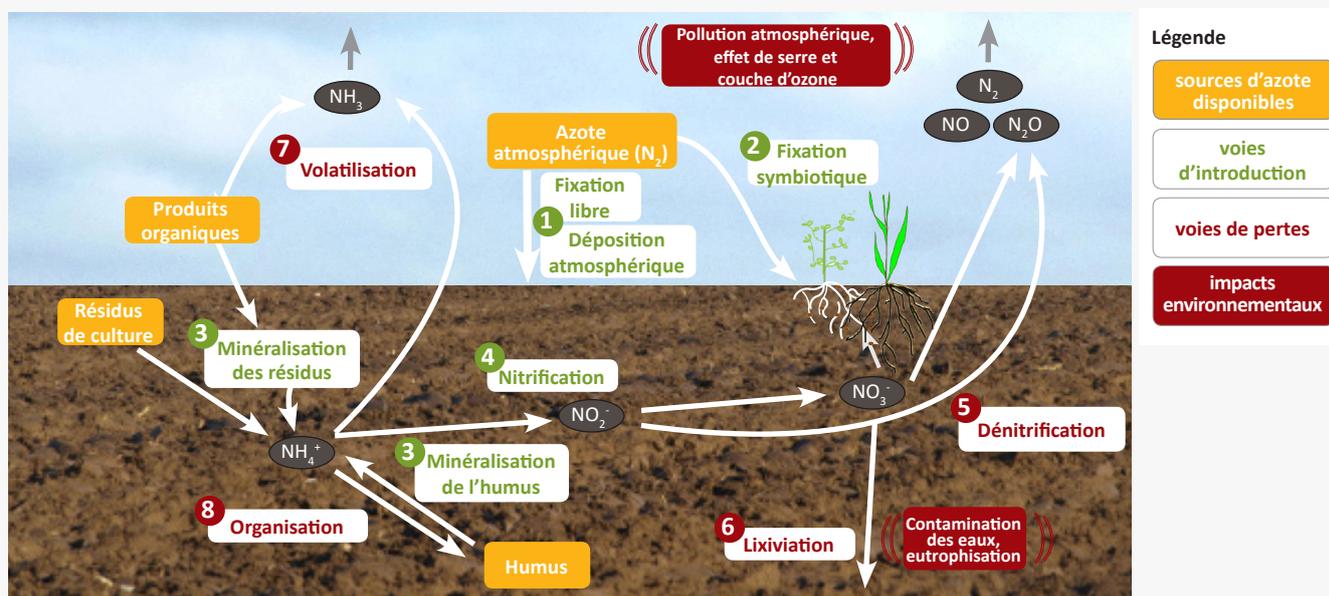
La volatilisation ⑦

Des pertes par voie gazeuse (NH_3) peuvent avoir lieu lors de l'application. Cela concerne en moyenne 20 % de l'azote ammoniacal des fumiers et des lisiers. Ce processus est favorisé par un pH du sol élevé et par un climat chaud.

L'organisation ⑧

Il s'agit de l'absorption de l'ammonium par les bactéries du sol. L'azote fixé sera reminéralisé sur des temps plus ou moins longs.

Le cycle de l'azote : voies d'introduction, de transformation et de pertes en Agriculture Biologique d'après le COMIFER, 2013



Avec le soutien financier en 2016 :



Projet coordonné par Agro-Transfert Ressources et Territoires en partenariat avec :

En association avec :

Quelques ordres de grandeur (kg N/ha/an)

Fixation libre : 10 à 30 kg	Volatilisation : quelques kg en fonction des conditions d'application
Dépôts atmosphériques : 5 à 15 kg	Dénitrification : 0 à 20 kg (sols bien drainés)
Fixation symbiotique : des dizaines voire des centaines de kg	
Minéralisation nette (minéralisation - organisation) : une centaine de kg	Minéralisation des produits organiques : des dizaines de kg
	Lixiviation : quelques dizaines de kg en fonction de la gestion de l'interculture

Impacts environnementaux

Les fuites d'azote vers l'environnement peuvent avoir des conséquences importantes sur les milieux.

- L'ammoniac (NH_3) joue un rôle dans l'**eutrophisation** et l'**acidification des milieux** et dans la formation de particules atmosphériques responsables de la **pollution de l'air**. 95 % des émissions d'ammoniac seraient d'origine agricole.
- Le protoxyde d'azote (N_2O) est un puissant **gaz à effet de serre**. 80 % de ces émissions seraient dues à l'agriculture.
- Le monoxyde d'azote (NO) participe à la **pollution de l'air**.
- Le nitrate (NO_3^-) contribue à l'**eutrophisation des eaux** et à l'émission de N_2O .

Leviers mobilisables

En Agriculture Biologique, l'objectif est de maintenir un bon niveau de fertilité azotée des sols en introduisant de l'azote dans le système et en minimisant les pertes aux différents moments du cycle.

Introduire de l'azote

- **Légumineuses** en cultures pluriannuelles (luzerne, trèfles...) ou annuelles (pois, féverole...) / en interculture (trèfles, vesce...) pour favoriser la fixation de l'azote de l'air (fiches « *légumineuses* »)



Luzerne

- **Apport de produits organiques** (compost, fumier, fientes, vinasses...) pour augmenter la teneur en matière organique du sol et donc le pool d'azote potentiellement minéralisable (fiches « *engrais organiques* » et « *long terme* »)



Compost

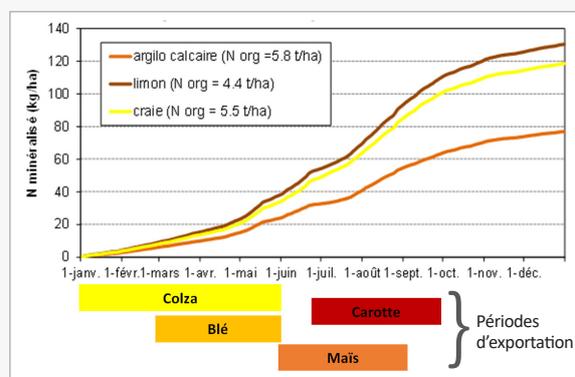
- **Gestion des résidus de cultures** et de **cultures intermédiaires** pour augmenter la teneur en matière organique du sol (fiches « *légumineuses* », « *long terme* »)

Limiter les pertes

- **Enfouissement des engrais organiques** (fumiers, fientes...) rapidement après épandage ou **fertilisation localisée** pour limiter les pertes par voie gazeuse (fiche « *engrais organiques* »)
- Gestion adaptée de l'interculture pour **limiter les pertes par lixiviation** (fiche « *pertes* »).

Ces leviers sont à combiner judicieusement à l'échelle du système de culture pour faire concorder besoins des cultures et disponibilité de l'azote, minimiser les pertes et ainsi favoriser l'autonomie en azote des systèmes de grande culture biologiques (fiches « *systèmes* »).

Périodes d'exportation des cultures rapportées à la minéralisation nette de l'azote organique du sol



D'après SAS Laboratoire, données issues de modélisation à partir des paramètres d'AZOFERT® pour un climat moyen Centre France.

Du fait de la dynamique de minéralisation de l'azote organique, les cultures implantées au printemps valorisent mieux l'azote du sol que les cultures d'automne.

© Agro-Transfert Ressources et Territoires

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

J. A. Bertholon ; 2015. Agriculture biologique et qualité des ressources en eau dans le bassin de la Seine : caractérisation des pratiques et applications territorialisées. Sciences de la Terre. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
COMIFER ; 2013. Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales - Cultures annuelles et prairies.

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer ; 2015. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Impacts-sante-et-environnement,41865.html>
J.-L. Peyraud, P. Cellier, C. Donnars, O. Réchauchère (éd.) ; 2012. Les flux d'azote liés aux élevages - réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, INRA.

LES LÉGUMINEUSES POUR APPORTER DE L'AZOTE DANS LA ROTATION

Les légumineuses sont des espèces intéressantes en Agriculture Biologique car elles permettent de fixer l'azote de l'air, introduisant ainsi des quantités non négligeables d'azote dans les systèmes agricoles à moindres coûts.

En France en 2009, ce processus a ainsi apporté l'équivalent du quart des engrais chimiques utilisés tous types de production confondus.

Cette capacité à fixer l'azote leur est conférée par leur association avec des bactéries du genre *Rhizobium* via la formation de nodosités.



Nodosités sur féverole d'hiver (avril 2016)

Favoriser la fixation symbiotique

Facteurs en jeu

- **Présence des bactéries dans le sol**

Les bactéries capables de s'associer avec les légumineuses sont naturellement présentes dans le sol pour le pois et la féverole, mais **des inoculations de bactéries sont nécessaires dans certains cas** : première implantation de soja, implantation de luzerne en sols acides, parcelle n'ayant pas reçue de légumineuses depuis une longue période...

- **Quantité d'azote minéral présent dans le sol**

La formation de nodosités n'a lieu que lorsque l'azote du sol devient limitant (moins de 50 kg/ha). Dans le cas inverse, les légumineuses absorbent préférentiellement l'azote du sol car ce processus est moins coûteux en énergie pour la plante que la fixation de l'azote de l'air.

Le nombre de nodosités produit est proportionnel aux besoins en azote de la plante pour sa croissance. **Pour valoriser au mieux leur rôle, les légumineuses sont donc à planter lorsque l'azote est peu disponible.**

- **Teneur en oligo-éléments dans le sol**

Le phosphore est un élément indispensable car impliqué dans le processus de fixation de l'azote de l'air.

D'autres éléments tels que le bore, le molybdène, le fer et le manganèse sont à apporter si des manques sont détectés dans les analyses de sol.

Le potassium favorise quant à lui la circulation de la sève contenant les éléments nutritifs nécessaires au *Rhizobium*, et est donc indispensable au bon fonctionnement de la symbiose.

Valeurs d'exportation des récoltes (d'après COMIFER, 2013)

	Phosphore	Potassium	Magnésium
Pois (grain)	0,80	1,15	0,18
Féverole (grain)	1,20	1,30	0,23
Lupin	0,75	1,05	0,25
Soja (grain)	1,00	1,60	
Luzerne (déshydratation)	5,80	31,80	2,20

- **Conditions de sol**

Le tassement défavorise l'enracinement de la légumineuse et les nodosités. Par ailleurs, les légumineuses se développent mieux en pH neutre ou alcalin, le pH acide défavorisant l'activité des bactéries associées à la plante.

Seule exception, le lupin qui est très sensible à la présence de calcaire actif. Il préfère donc les sols acides qui en sont moins pourvus.

De manière générale, tout élément pouvant perturber la croissance de la plante (ravageurs, maladies, concurrence des adventices, excès ou déficit hydrique...) a un impact sur l'installation des nodosités ou leur fonctionnement, et donc la quantité d'azote fixée.

Différences entre espèces

Le taux de fixation symbiotique correspond à la part d'azote de l'air fixée par rapport à celle qui est prélevée dans le sol. Il diffère d'une légumineuse à l'autre, comme l'illustre le tableau suivant :

	Taux de fixation symbiotique
Haricot	40 %
Pois, lentille, soja	60 - 70 %
Féverole, lupin	75 %
Légumineuses fourragères (trèfle, luzerne, prairies)	90 %

Avec le soutien financier en 2016 :



Projet coordonné par Agro-Transfert Ressources et Territoires en partenariat avec :



En association avec :



Valoriser au mieux l'azote après une légumineuse

Variabilité du surplus azoté

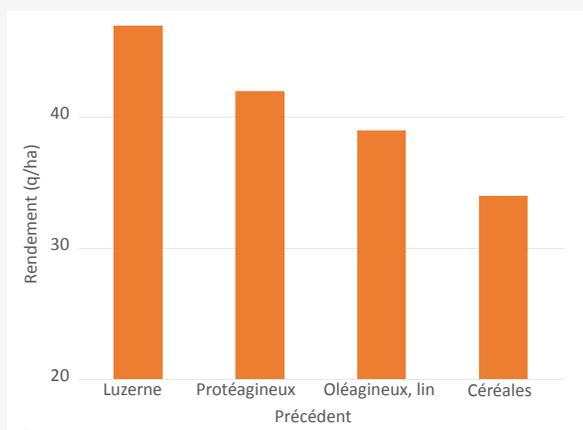
L'azote de l'air fixé par les légumineuses est restitué à la culture suivante via la **décomposition des résidus de culture (parties aériennes et souterraines)**. Les résidus les plus facilement dégradables (feuilles, tiges peu ligneuses au rapport C/N faible), vont se décomposer et libérer de l'azote en quelques semaines, alors que les parties ligneuses (tiges, racines) vont minéraliser plus lentement.

La quantité d'azote libérée au cours de la campagne suivant la destruction d'une légumineuse annuelle est très variable : la méthode des bilans chiffre le surplus lié à un **précédent légumineuse annuelle à 30 kg N/ha** par rapport à un précédent céréale, mais il peut monter à **80 kg N/ha** dans les situations optimales.

Après **une luzerne ou un trèfle**, la minéralisation peut se prolonger sur 2 années et entraîner un surplus de **plusieurs dizaines voire centaines de kg**.

Compte-tenu de la variabilité de ce surplus, **la réalisation d'un reliquat sortie hiver est nécessaire pour estimer les quantités d'azote réellement disponibles** pour la culture suivante.

Cet azote supplémentaire se traduit par des rendements accrus derrière légumineuses et de meilleurs taux de protéines.



Rendements du blé en AB en fonction du précédent

D'après les résultats technico-économiques pluriannuels des chambres d'agriculture de Seine-et-Marne et d'Île-de-France. Taux de protéines en moyenne supérieurs sur blés de légumineuses (12 % soit 0,5 % de plus).

Limitation de la lixiviation

Le surplus d'azote engendre un **risque de lixiviation** important, d'autant plus que l'enfouissement des résidus se fait précocement par rapport aux besoins de la culture suivante. Un travail du sol réduit peut néanmoins permettre de ralentir la minéralisation des résidus. **L'agencement des cultures dans la succession** apporte des leviers supplémentaires : implantation d'une culture intermédiaire rapidement après récolte ou destruction, implantation de cultures exigeantes en azote (colza, betterave rouge...) après légumineuses...

Raisonner l'introduction des légumineuses dans la rotation

Diversité des modes d'implantation des légumineuses dans la rotation



En culture principale
(Ex. : féverole en pur)



En interculture, semée sous-couvert ou après moisson
(Ex. : trèfle blanc semé sous-couvert)



En plante de service
(Ex. : lentille dans le colza)



En association avec une non légumineuse
(Ex. : pois + triticale)



En culture pluriannuelle
(Ex. : luzerne)

L'introduction de légumineuses dans la rotation doit s'accompagner de **précautions** : l'abondance de légumineuses à graines peut entraîner une « fatigue des sols », due à des pathogènes communs à ces cultures (champignons, nématodes...).

De plus, les légumineuses sont des cultures exigeantes en phosphore et potassium. Dans les systèmes avec des légumineuses pluriannuelles exportées telles que la luzerne, il est donc nécessaire de **surveiller les taux de ces éléments dans le sol** et de compenser les exportations par des apports quand nécessaires.

© Agro-Transfert Ressources et Territoires

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agridea; 2011. Dossier fumure azotée des grandes cultures bio sans bétail.
A. Schneider, C. Huyghe, coord. ; 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Ed. Quae COMIFER; 2007. Teneur en P, K, Mg des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ et les principaux fourrages.

F. Vertès, M.-H. Jeuffroy, E. Justes, P. Thiébeau, M. Corson ; 2010. Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation. Innovations Agronomiques 11, 25-44.

APPORTER DE L'AZOTE DANS LA ROTATION GRÂCE À LA LUZERNE

La luzerne est une légumineuse fourragère et fixe l'azote de l'air par symbiose. Son implantation dans les systèmes de grande culture biologiques présente des intérêts multiples, dont la fourniture d'azote pour les cultures qui la suivent dans la rotation.

Conduite de la luzerne

Implantation

En tête de rotation, délai de retour de 5-6 ans

Sols :

- Éviter les sols acides (pH<6), ou chauler avant implantation et inoculer la semence en rhizobium
- Éviter les sols très hydromorphes ou trop compactés

Association à d'autres espèces possible pour une meilleure adaptation aux conditions climatiques

Graminées : dactyle, fétuque élevée, brome
Légumineuses : trèfle violet, incarnat, blanc

Périodes de semis :

- Au printemps (sous couvert)
- En fin d'été, planter au plus vite après récolte et au plus tard mi-septembre

=> **En fonction des conditions locales et des conditions de l'année, favoriser l'une ou l'autre pour que la luzerne démarre rapidement.**

Modalités de semis :

- Au semoir à céréales (semis classique) / avec le dernier passage de herse étrille sous couvert au printemps et avant le stade redressement de la céréale
- Semer à 1 cm et rappuyer la terre (rouleau)

Amendements

Besoins : pour 1 T de matière sèche, 30 kg de calcium, 30 kg de potasse, 6 kg de phosphore, 3 kg de magnésium

=> **Apports à ajuster en fonction des analyses de sol sur la succession de cultures.**

Destruction

- 3 ans après implantation, notamment pour la maîtrise des adventices
- Détruire le plus tard possible par rapport à l'implantation de la culture suivante pour réduire les pertes d'azote par lixiviation
- Scalper la luzerne sous le collet pour éviter les repousses, par exemple avec des outils à dents en pattes d'oie.

Effet de la luzerne dans la succession de cultures

Pertes d'azote sous luzerne en place

Des mesures par bougies poreuses ont montré des pertes de l'ordre de 5 mg N/L sous luzerne, contre 40 mg N/L pour un blé par exemple (hors blé de luzerne). La luzerne prélève en effet l'azote du sol avant de fixer l'azote de l'air.

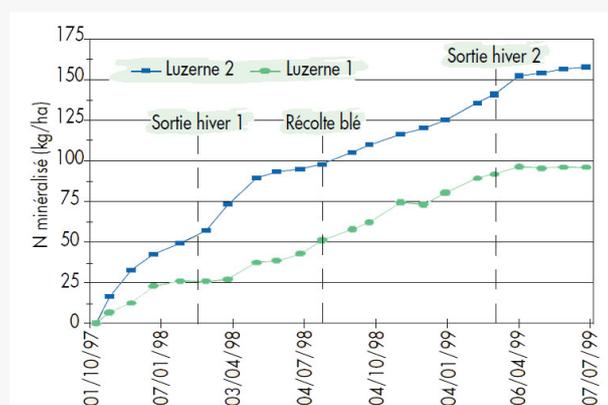
Fourniture d'azote après destruction

60 % de l'azote contenu dans la luzerne à sa destruction sont minéralisés dans les 18 mois suivants, soit 90 kg N/ha en moyenne pour les sols calcaires profonds de Champagne. La libération d'azote peut se prolonger **jusque 4 ans après la destruction de la luzerne** (essai longue durée INRA Clermont-Ferrand).

Cette libération lente s'explique par la minéralisation de l'azote contenu dans les pivots racinaires, à rapport C/N élevé et représentant jusque 2/3 des résidus enfouis. La quantité totale d'azote libérée est plus importante si les résidus incorporés comprennent les parties foliaires.

Cumul d'azote minéralisé après luzerne par rapport à un sol témoin sans résidus (Justes et al., 2001)

Luzerne 1 : luzerne fauchée avant destruction - Luzerne 2 : luzerne détruite 4 semaines après la dernière fauche



Optimiser la mobilisation de l'azote libéré par la luzerne

Les quantités d'azote disponibles après luzerne imposent un raisonnement de la succession des cultures après luzerne pour ne pas perdre l'azote ainsi fixé.

- **Limiter le délai entre destruction de la luzerne et implantation de la culture / du couvert**
- **Optimiser la succession de cultures** sur au moins 2 années culturales après luzerne
- **Implantation de couverts** de type crucifères dans l'interculture suivant la destruction de la luzerne et celle d'après
- **Implantation d'une culture gourmande en azote** après destruction à l'automne (exemple : colza) ou au printemps (maïs, betterave rouge, pomme de terre).

Valoriser la luzerne comme fertilisant ?

Des tests d'utilisation de luzerne comme fertilisant sous forme de bouchons ou d'ensilage ont été réalisés. Ils montrent un gain de rendement sur céréales, mais avec une efficacité moindre par rapport aux fientes de volaille. La pratique n'est rentable que si la luzerne ne peut être valorisée autrement (l'analyse n'intègre pas des économies en fertilisants P et K). Le test de différentes formes d'apport et l'optimisation de leur fabrication restent à réaliser.

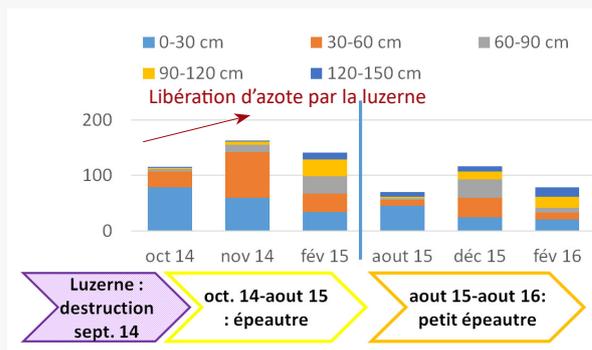
Évolution des reliquats azotés après différentes dates de destruction de la luzerne et dans différentes successions de cultures

Résultats obtenus dans le cadre du projet ENBIO (INRA)
a. Reliquats d'azote mesurés et b. résultats de simulation (LIXIM) d'azote lixivié et absorbé pendant la période de drainage.

La pratique «classique» qui consiste à implanter des céréales après luzerne ne permet pas une valorisation optimale de l'azote libéré. Des cultures telles que le colza à l'automne ou le maïs au printemps seraient plus pertinentes.

(1) Destruction à l'automne et succession céréale d'automne-céréale d'automne

a. Reliquats d'azote mesurés



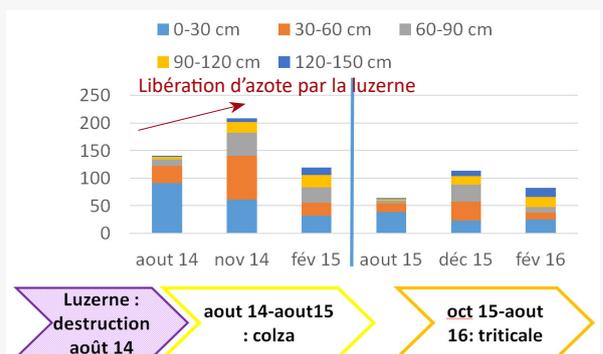
b. Résultats de simulation

65 mg/L d'azote lixiviés	56 mg/L d'azote lixiviés
15 kg/ha absorbés par l'épeautre	1 kg/ha absorbés par le petit épeautre

Quantités d'azote libérées par la destruction de la luzerne élevées sur les deux intercultures qui suivent mais mal valorisées par les céréales => risque important de pertes d'azote par lessivage (simulation).

(2) Destruction à l'automne suivie d'un colza puis d'un triticale

a. Reliquats d'azote mesurés



b. Résultats de simulation

63 mg/L d'azote lixiviés	43 mg/L d'azote lixiviés
121 kg/ha absorbés par le colza	15 kg/ha absorbés par le triticale

Quantités importantes d'azote libérées par la luzerne sur deux intercultures, risques de pertes par lixiviation, bonne valorisation de l'azote par le colza mais moindre par le triticale (simulation).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agridea; 2011. Dossier fumure azotée des grandes cultures bio sans bétail.
Chambre d'agriculture de Seine-et-Marne ; 2013. La luzerne, la fertilisation de demain ? Diaporama de présentation
N. Beaudoin, D. Denys, J.C. Muller, M.D. Monbrun, C. Ledain ; 1992. Influence d'une culture de luzerne sur le lessivage du nitrate dans les sols de Champagne crayeuse. Fourrages 129, 45-57
F. Vertès, M.H. Jeuffroy, E. Justes, P. Thiébeau, M. Corson; 2010. Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation. Innovations Agronomiques 11, 25-44

- A. Schneider, C. Huyghe, coord. ; 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Ed. Quae
E. Justes, P. Thiébeau, G. Cattin, D. Larbre, Syndicat National des Déshydrateurs de France, B. Nicolardot ; 2001. Perspectives Agricoles 264, 22-28
M. Benoît ; 2014. Les fuites d'azote en grandes cultures céréalières : Lixiviation et émissions atmosphériques dans des systèmes biologiques et conventionnels du bassin de la Seine (France). Sciences de la Terre. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2014.

OPTIMISER LA CONDUITE DES LÉGUMINEUSES À GRAINES EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

LÉGUMINEUSES
EN CULTURE

Les légumineuses à graines sont des cultures annuelles bénéficiant de la fixation de l'azote de l'air par symbiose. Trois groupes d'espèces se distinguent : les protéagineux (pois sec, féverole, lupin), le soja, classé parmi les oléagineux et les légumes secs (lentille, pois chiche). Cette fiche concerne surtout le pois et la féverole, protéagineux les plus représentés en région Hauts-de-France.

Légumineuses en culture pure

Intérêts des légumineuses à graines

Les légumineuses à graines présentent de nombreux intérêts agronomiques, dont l'apport d'azote au système. Leurs effets sont toutefois variables. Cela se traduit par des rendements plus élevés derrière ces cultures : on observe en moyenne après un précédent pois 6 à 12 q/ha de plus sur blé et jusqu'à 3 q/ha de plus sur colza, par rapport à un précédent blé.

Surplus d'azote attendus après légumineuses (COMIFER, 2013)

Féverole	+ 30 kg N/ha
Pois, haricot et soja	+ 20 kg N/ha

Les légumineuses en culture pure : points-clés D'après les fiches techniques de l'ITAB.

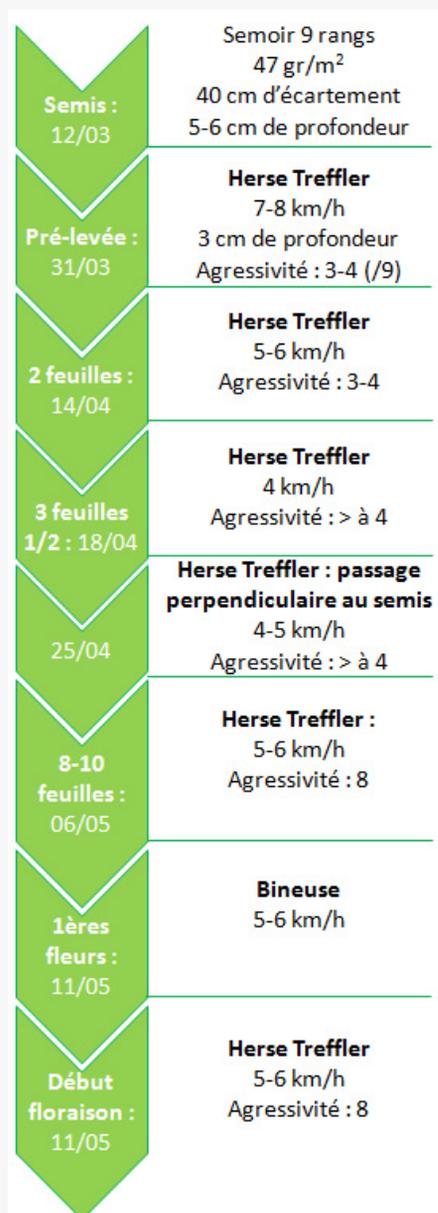
- Délai de retour d'au moins 5 ans
- Implantation en situation à faibles reliquats pour optimiser la fixation de l'azote de l'air
- Implantation sur sol bien structuré pour favoriser les nodosités
- Des variétés d'hiver plus sensibles aux maladies et au gel que les variétés de printemps, mais moins sensibles aux stress thermique et hydrique
- Profondeur de semis de 5 à 8 cm pour la féverole d'hiver pour limiter les dégâts de gel
- Passages de désherbage mécanique répétés : à l'aveugle puis plusieurs passages en fonction du salissement. Binage possible sur féverole (écartement 30-45 cm).

Dans le contexte « Nord » de la France, l'enjeu est de maîtriser l'enherbement. Les légumineuses sont en effet peu couvrantes au démarrage. Le désherbage mécanique apporte des solutions, mais demande de revenir *a minima* 3 fois sur la parcelle pour être efficace et nécessite une bonne maîtrise technique.

Conduite du désherbage mécanique de la féverole en culture pure

Observations 2014 sur une parcelle du réseau Agri-Bio dans une situation avec une pression en adventices forte.

Moyenne sur les années précédentes : 4 interventions.



Règle de décision :
intervenir tant
qu'il y a des levées

Vue de la féverole
en juillet 2015



© G. Salitot

Efficacité globale
du désherbage :
Renouées > 98 %
Folle avoine > 95 %

Avec le soutien financier en 2016 :



Projet coordonné par Agro-Transfert Ressources et Territoires en partenariat avec :



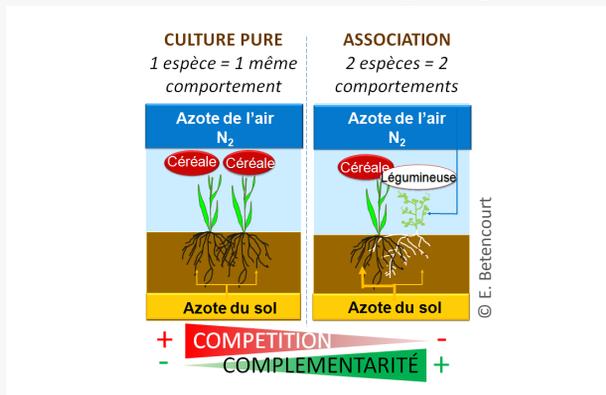
En association avec :



Les associations de cultures, une solution alternative pour la maîtrise du désherbage

Le principe d'une association de cultures est de **maximiser les interactions entre les plantes pour favoriser leur complémentarité** : utilisation de ressources différentes pour la nutrition azotée, modes d'exploration du sol, de couverture du sol et d'accès à la lumière contrastés... La conduite de l'association de cultures va jouer sur cette complémentarité.

Complémentarités pour l'alimentation azotée : cas d'une association céréale + protéagineux



Intérêts des associations de cultures

- Une **diminution de la pression adventices** par rapport à la légumineuse pure, due à une couverture du sol plus rapide et à une compétitivité accrue du couvert.
- Une **productivité plus élevée** : il faudrait en moyenne 1,3 ha de cultures pures pour obtenir la même production qu'1 ha en association.
- Des **taux de protéines en moyenne plus élevés** sur la céréale associée (11,1 % contre 9,8 %).
- Une **sécurisation du revenu** : la présence de la culture associée permet une récolte lorsque le climat est défavorable au protéagineux.



Couverture du sol sur féverole
Observations dans l'Oise en mai 2015

Féverole pure
8 à 10 % de vert



Féverole associée avec de l'avoine en plein
44 % de vert

© Gilles Saltot

Conduite des associations protéagineux + céréales pour sécuriser la production des protéagineux

Premières recommandations tirées des expérimentations sur la conduite des cultures associées.

Place dans la rotation	Privilégier les situations à faibles reliquats pour limiter le développement des céréales Peu de références sur les délais de retour (réduit par rapport au protéagineux pur ?)
Choix des espèces	Favoriser les céréales les moins compétitives pour le protéagineux : triticale ou blé avec féverole, orge ou blé avec pois.
Choix variétal	Variétés de céréales précoces, dont la maturité correspond à celle du protéagineux Variétés de protéagineux qui vont pouvoir attendre sans grainer/germer.
Semis	Dates : mêmes préconisations que sur protéagineux purs. Densités : au moins 80 % de la densité habituelle du protéagineux ; 30 % de la densité habituelle des céréales (à adapter : 20 % si RSH élevé; 40 % si pression adventices élevée) Modalités : semis simultané sauf sur féverole d'hiver pour enterrer la graine. En région Hauts-de-France : Féverole : hiver 30 gr/m ² , printemps 40 gr/m ² Pois protéagineux : hiver 60 gr/m ² , printemps : 70 gr/m ² Orge : 100 gr/m ² - Triticale : 100 gr/m ² Blé : 120 gr/m ²
Désherbage	1 à 2 passages de houe et/ou de herse étrille selon le salissement
Tri	Pour valoriser la récolte plus facilement, certains producteurs effectuent un pré-tri voire le tri à la ferme. Quelques coopératives collectent toutefois la production non triée.

Quelques limites aux associations de cultures

- Pour un même mélange, **la part de chaque culture à la récolte varie selon l'année**. Des ajustements au semis en fonction du reliquat azoté permettent d'orienter *a minima* la composition de la récolte.
- Le reliquat azoté suivant une association est en général plus faible que suivant un protéagineux pur, voire équivalent à une céréale pure en fonction des proportions à la récolte. L'intérêt de l'association réside dans la réponse à la demande de la filière en protéagineux et dans les taux de protéines plus élevés chez la céréale associée.

© Agro-Transfert Ressources et Territoires

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

L. Bedoussac, E.P. Journet, H.Hauggaard-Nielsen, C. Naudin, G. Corre-Hellou, E. S. Jensen, L. Prieur, E. Justes ; 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercropping in organic farming. A review. Agron. Sustain. Dev. COMIFER; 2013. Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales - Cultures annuelles et prairies.

ITAB ; 2011. Fiches La culture des associations céréales/protéagineux en AB ; La culture de la féverole en AB ; Le pois protéagineux en AB.
Réseau APCA Grandes Cultures ; 2016. Sécuriser la culture des protéagineux en agriculture biologique.
A. Schneider, C. Huyghe, coord. ; 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Ed. Quae.

GESTION DE L'AZOTE EN INTERCULTURE PAR DES COUVERTS DE LÉGUMINEUSES

Les légumineuses permettent de mettre à profit la période d'interculture pour introduire des nutriments, notamment de l'azote, dans les systèmes de culture.

Différentes espèces peuvent être utilisées : pois, vesce, féverole, trèfle, lentille, gesse...

Intérêts des légumineuses en interculture



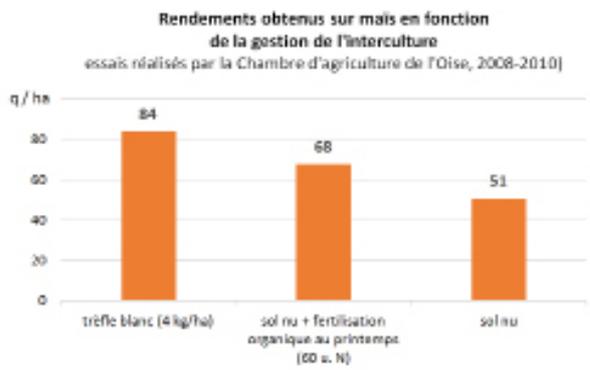
Trèfle incarnat

Apport d'azote au système (effet « engrais vert »)

Une tonne de biomasse de légumineuses en interculture restitue en moyenne 10 à 30 unités d'azote après destruction, contre 10 à 20 unités pour les crucifères et 5 à 15 unités pour les graminées (GREN, 2013).

Cette restitution peut s'élever à plus de 100 kg N/ha en cas d'implantation précoce et de destruction tardive. Cela se traduit par un **rendement accru pour la culture suivante**.

L'insertion de couverts a également un effet sur le long terme : une expérimentation de 13 ans en Champagne crayeuse intégrant des couverts chaque année a montré une **augmentation de la teneur en azote organique** de l'horizon labouré et un **surplus de minéralisation** de plus de 36 kg N/ha/an au terme de l'essai. Cette augmentation est toutefois moins rapide pour les légumineuses en lien avec le rapport C/N plus faible de leurs résidus.



Intérêts des pesées de biomasse du couvert

Les quantités d'azote disponibles pour la culture suivante peuvent être estimées à partir d'une mesure de la biomasse de chaque espèce du couvert à sa destruction. L'outil MERCI (Chambre d'Agriculture de Poitou-Charentes) a été conçu dans cet objectif.

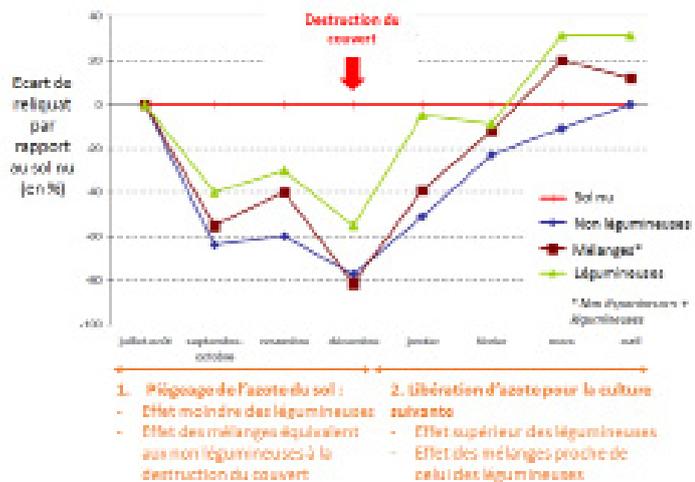
Limitation des fuites de nitrate (effet « piège à nitrate »)

Avant de fixer l'azote de l'air, les légumineuses captent l'azote du sol : cela permet de **réduire le stock d'azote** lixiviable d'au plus 50 kg N/ha. Leur effet est cependant moindre que celui d'autres espèces (90 kg N/ha pour les crucifères).

Les **mélanges** de légumineuses avec des crucifères ou des graminées sont intéressants car ils ont un effet équivalent aux non légumineuses pour le piégeage de l'azote et un apport d'azote à hauteur de 80-90 % d'une légumineuse pure.

Évolution du stock d'azote minéral du sol au cours du temps pour différents couverts en interculture longue

D'après G. Vériel, 2009, compilation d'essais



Avec le soutien financier en 2016 :



Projet coordonné par Agro-Transfert Ressources et Territoires en partenariat avec :



En association avec :



LÉGUMINEUSES
INTERCULTURE

Éléments de conduite

La conduite du couvert peut être optimisée pour maximiser les services rendus par les légumineuses.

Choix du couvert

- **En fonction de l'historique de la parcelle** : pas de pois, de vesce ou de lentille si historique aphanomyces ; délai de 2 à 3 ans entre légumineuses en interculture et légumes pour minimiser le risque sclérotinia (recommandations FIBL/BioSuisse)
- **En fonction de la durée de l'interculture** : en interculture courte (par exemple de juillet à octobre), favoriser les espèces à développement rapide (vesce, trèfle d'Alexandrie, pois). Inversement, en interculture longue, les espèces ayant un cycle de développement long (trèfles blanc, violet) sont intéressantes pour éviter les grenaisons.

En zone vulnérable (directive cadre sur l'eau), les légumineuses ne sont autorisées qu'en mélange. Des dérogations sont possibles en Agriculture Biologique.

Période de semis

Pour optimiser la fourniture d'azote à la culture suivante, privilégier un **semis précoce** favorisant le développement du couvert.

- **Semis sous-couvert** : après ou avec le dernier passage de désherbage mécanique, au stade tallage/début de montaison. Adapté uniquement pour les espèces à développement lent, qui ne vont pas monter à graines dans la culture, et pour des espèces à petites graines ne germant pas en profondeur (cas du trèfle blanc nain). Attention aux plantes trop concurrentielles. A éviter si climat sec au printemps (risque de mauvaises levées).

- **Semis d'été** : travailler le sol rapidement après la moisson puis semer aussitôt pour éviter le dessèchement et permettre un développement suffisant du couvert. Plutôt pour les légumineuses à grosses graines (vesce, pois, féverole, lentille) ou trèfles à installation rapide (trèfle d'Alexandrie). Au Nord de la Loire, semis **autour du 15 août** pour un développement correct.

Profondeur de semis

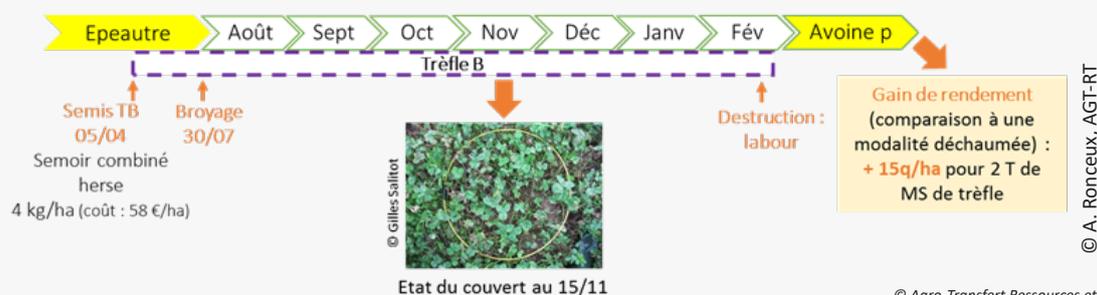
Les espèces à grosses graines (vesce, pois, féverole, lentille) doivent être enfouies à 3-4 cm de profondeur pour favoriser leur germination. Les espèces à petites graines (trèfles blanc et violet) peuvent être semées à la volée, avec cependant un risque de développement non homogène du couvert.

Modalités de destruction

- **Éviter la lignification du couvert** pour ne pas avoir d'effet dépressif (« faim d'azote ») sur la culture suivante. S'il est trop vigoureux, le faucher lorsqu'il atteint le stade bourgeon ou première fleur.
- **Date de destruction à raisonner pour faire correspondre la minéralisation des résidus avec l'absorption de la culture et limiter les pertes.** Dans le cas d'une légumineuse, la minéralisation se fait rapidement : **favoriser une destruction tardive** (1 à 2 mois avant le semis).
- **Adapter la date de destruction au type de sol** : sur sol lourd, la minéralisation est ralentie, une destruction précoce est donc recommandée, et inversement sur sols légers.

Remarque : comme la luzerne, le trèfle blanc et le trèfle violet libèrent de l'azote jusqu'à deux ans après la destruction. Des précautions sont à prendre pour gérer le surplus d'azote généré (voir fiche «pertes»).

Conduite d'un trèfle blanc nain semé sous couvert - Observations sur le réseau Agri-Bio en 2014



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agridea ; 2011. Dossier fumure azotée des grandes cultures bio sans bétail.
ITAB ; 2013. Choisir et réussir son couvert végétal pendant l'interculture en AB.
A.Schneider, C.Huyghe, coord. ; 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Ed. Quae.
ITAB/Arvalis Institut du végétal ; 2009. Actes de la journée technique «Grandes Cultures biologiques».

G. Véricel ; 2013. Utilisation de légumineuses comme couverts pendant la période d'interculture : étude de leurs impacts environnementaux, agronomiques et économiques. Mémoire de fin d'études.
E. Justes, N. Beaudoin, P. Bertuzzi, R. Charles, J. Constantin, et al. ; 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Ed. Quae.

OPTIMISER LES APPORTS D'ENGRAIS ORGANIQUES EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

Les produits résiduels organiques (PRO) constituent une source importante d'azote en AB. Ils ont diverses origines : effluents d'élevage (fumier, lisier), co-produits de l'industrie agro-alimentaire (farines de viande ou de plumes; vinasses; digestats de méthanisation), déchets urbains (composts de déchets verts, d'ordures ménagères). Ils peuvent avoir subi des traitements : compostage, conditionnement sous forme de bouchons pour les fientes... et sont soumis à des procédures de contrôle (guide de lecture INAO).

L'enjeu en AB est d'optimiser les apports des PRO pour répondre aux besoins de la culture, ce qui est d'autant plus complexe que la quantité d'azote réellement présente dans l'engrais et sa dynamique de libération sont difficiles à estimer. En effet, dans les PRO, une part de l'azote est sous forme organique nécessitant d'être minéralisée pour être utilisable par la plante. La proportion d'azote ammoniacal, facilement assimilable, varie de 0 à 80 % en fonction des produits.

Engrais ou amendements organiques ?

Effet long terme ou court terme

Les produits organiques peuvent être distingués en fonction de leurs effets sur la parcelle. Les **engrais organiques** libèrent de l'azote à **court terme** : 30 à 80 % de l'azote du produit sera utilisable l'année qui suit l'apport. Les **amendements organiques** ont des effets fertilisants sur le **long terme**, ainsi que des effets positifs sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. La fraction azotée est fortement organisée et ne se libère que très progressivement (10 à 15 % l'année de l'apport). Ces produits ont donc des **effets complémentaires**, à combiner à l'échelle de la rotation.

Les produits organiques introduisent dans les parcelles en AB des éléments autres que l'azote : phosphore, potassium et autres oligoéléments. Des apports raisonnés en fonction de la rotation permettent d'éviter les carences.

Caractérisation des produits

Pour évaluer la valeur amendante ou fertilisante d'un produit, le rapport C/N total est couramment utilisé. Il n'est pas le seul indicateur à retenir car il ne prend pas en compte les formes dans lesquelles le carbone et l'azote se trouvent. Deux autres caractéristiques sont ainsi à considérer pour expliquer la vitesse de minéralisation :

- la **stabilité de la matière organique du produit**, liée à sa teneur en lignine, cellulose, hémicellulose et en sucres solubles

- sa **teneur en azote organique et minéral**

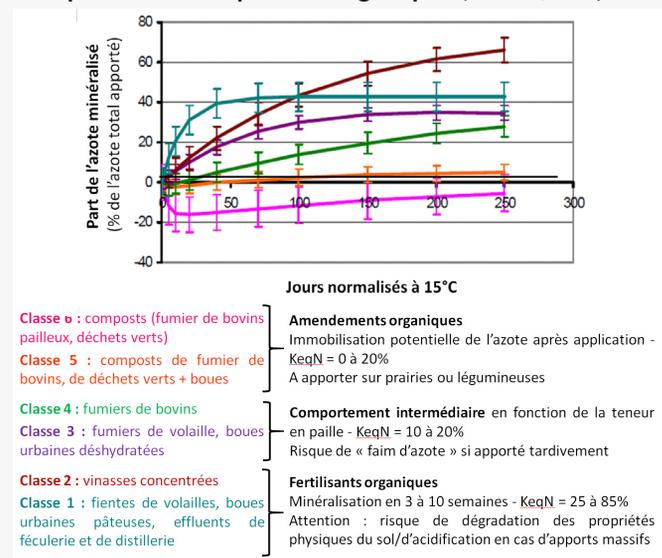
La connaissance de la **dynamique de minéralisation** est essentielle pour optimiser la gestion de la fertilisation.

Si des courbes de référence existent (voir ci-dessous), **seule une analyse permettra de déterminer les caractéristiques réelles du produit.**

L'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO)

Cet indice a été étalonné sur un large panel de produits. En plus de la caractérisation biochimique du produit, il prend en compte sa minéralisation après trois jours d'incubation en conditions contrôlées. Il permet de prédire le comportement de la plupart des amendements organiques.

Dynamique de minéralisation de l'azote pour différents produits organiques (Bouthier, 2009)



Mesures réalisées au champ sous sol nu - KeqN : coefficient d'équivalence engrais azotés.

Les produits de classes 1 et 2 se minéralisent rapidement dans les deux mois suivant application, alors que les produits de classes 5 et 6 minéralisent sur plus d'une année et ont tendance à immobiliser l'azote du sol. Par ailleurs, certains produits contiennent des quantités d'azote proches mais ont des cinétiques de minéralisation différentes ; de ce fait l'azote libéré sera disponible à des moments différents (cas des fientes par rapport aux fumiers de volaille).

Optimiser la fertilisation par les engrais organiques

L'effet fertilisant du produit dépend de ses caractéristiques, mais aussi du contexte pédoclimatique et des conditions d'application.



Compost

Caractéristiques du sol

Les sols argileux et/ou calcaires possèdent des potentiels de minéralisation de l'azote plus faibles que les sols limoneux et sableux. Les dates et formes d'apport sont donc à raisonner en fonction du type de sol. De plus, les pH inférieurs à 5,5 inhibent la minéralisation de l'azote. La **correction de l'acidité du sol** permet de solutionner ce problème.

Forme d'apport

Plus l'engrais est fin, plus sa minéralisation sera rapide : les formes liquides minéralisent plus vite que les farines qui elles-mêmes minéralisent plus vite que les granulés. Par ailleurs, le séchage, la déshydratation ou les traitements des digestats diminuent la valeur fertilisante du produit : pertes d'ammonium dans la phase liquide, par volatilisation et organisation de l'azote au cours du compostage.

Période d'apport

Elle est à optimiser pour **faire concorder le pic de minéralisation avec les besoins de la culture** : application des produits à libération rapide au printemps, application précoce des fumiers (à la fin de l'été sur couverts, au printemps sur cultures à implantation tardive), composts à appliquer plutôt sur prairie ou légumineuses (risque d'immobilisation de l'azote).

Matériel d'épandage

Privilégier la **précision du matériel** pour obtenir la dose voulue sur la parcelle et avoir une répartition homogène. Une certification « éco-épandage » existe depuis 2014 pour garantir la précision du matériel et la protection du sol contre le tassement. Elle reste toutefois peu répandue.

Incorporation du produit

Les fumiers, lisiers et digestats liquides sont à incorporer immédiatement après épandage pour ne pas perdre d'azote par **volatilisation** (pertes allant jusqu'à 60 % en 8 jours).

Les fumiers et composts appliqués post-récolte doivent également être incorporés pour limiter le risque de pollution par **ruissellement**. Sur les sols compactés, privilégier une incorporation superficielle pour éviter une asphyxie du sol.

Gestion post-récolte

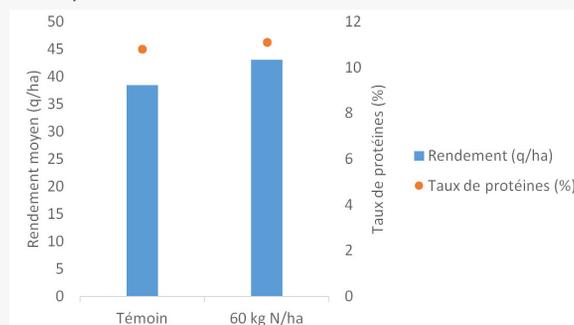
L'implantation d'un **couvert** sur l'interculture suivant l'application d'un produit organique est nécessaire pour éviter de perdre l'azote minéralisé. La minéralisation se poursuit en effet jusqu'à l'automne et les quantités d'azote libérées à l'interculture sont importantes, surtout si le printemps a été sec.

Intérêt économique de la fertilisation

L'utilisation de fertilisants organiques n'apporte pas systématiquement de gains de rendements. Il est nécessaire d'intégrer dans le raisonnement des apports les facteurs limitants comme la présence des adventices. Le gain de rendement, s'il existe, ne compense pas forcément le prix d'achat des engrais organiques. Par ailleurs, l'augmentation du taux de protéines suite aux apports reste limitée. La minéralisation des précédents comme les légumineuses constitue une source d'azote plus accessible pour les plantes.

Effet moyen d'un apport d'azote sur blé au tallage

Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne, synthèse de 49 essais en AB de 1999 à 2014



L'outil Decid'Org, conçu la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne, aide à évaluer l'intérêt d'un apport de produit organique sur blé : en fonction du contexte de la parcelle (sol, climat, reliquat sortie hiver, pression adventice) et du coût des engrais organiques, il estime la rentabilité d'un apport au printemps et la dose à apporter. Il est adapté aux sols limoneux et argilo-calcaire sans irrigation.

© Agro-Transfert Ressources et Territoires

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agridea ; 2011. Dossier fumure azotée des grandes cultures bio sans bétail.

L. Fontaine, A.-L. Toupet (coord.) ; nov-déc 2015. Dossier : Optimiser l'azote en Grandes cultures Bio, AlterAgri.

INAO, MAAF ; avril 2016. Guide de lecture des règlements communautaires européens n° 834/2007 et du RCE n° 889/2008.

S. Houot, M.-N. Pons, M. Pradel, E. Savini, A. Tibi ; 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier - Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Synthèse de l'expertise scientifique collective. INRA, DEPE.

ITAB/Arvalis Institut du végétal ; 2009. Actes de la journée technique «Grandes Cultures biologiques».

Document issu du projet Agri-Bio : de la connaissance à la performance

GÉRER LA FOURNITURE D'AZOTE SUR LE LONG TERME

La minéralisation de l'humus présent dans le sol constitue une source non négligeable de l'alimentation azotée des cultures en Agriculture Biologique (une centaine de kg par an). L'entretien de la fertilité du sol est donc essentiel pour assurer la fourniture d'azote pour les cultures sur le long terme.

L'humus, élément clé pour la fertilité des sols

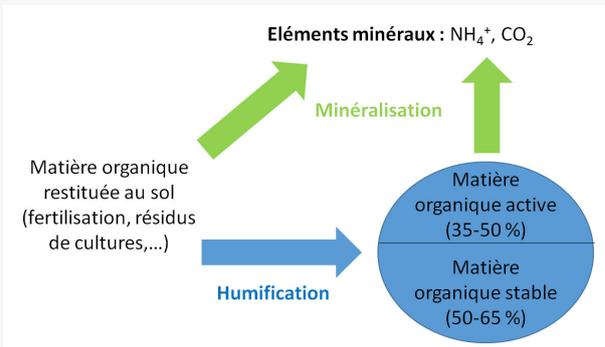
Définition

Le terme humus désigne la matière organique du sol résultant de la décomposition et de la transformation des résidus de végétaux et des produits organiques apportés au sol.

Constitution de l'humus du sol et contribution à la fourniture du sol en azote (d'après le modèle AMG)

Matière organique active : renouvellement rapide (sur quelques dizaines d'années)

Matière organique stable : renouvellement sur plusieurs siècles voire sur plus de 1000 ans



© A. Ronceux, AGT-RT

Rôle de l'humus dans le sol

- **Fertilité physique** : réduction de la battance et de la compaction de sols, facilitation de l'infiltration et de la rétention de l'eau, réduction de l'érosion des sols
- **Fertilité biologique** : alimentation de la vie du sol (bactéries, champignons,...)
- **Fertilité chimique** : augmentation de la capacité du sol à stocker des éléments nutritifs

Tous ces éléments concourent à faciliter l'enracinement des cultures dans le sol et à augmenter la disponibilité de l'azote et des autres éléments pour la plante.

La matière organique du sol a également des fonctions environnementales : rétention des polluants, séquestration du carbone,...

Entretenir la fertilité du sol...

L'objectif est d'avoir un bilan humique équilibré : il s'agit de compenser la minéralisation naturelle de l'humus par différents apports.

... par la succession des cultures

• Diversifier les cultures et les restitutions au sol

La décomposition des résidus de récolte lignifiés contribue à l'entretien de la matière organique stable du sol.

Le maïs grain, le colza, les protéagineux et les céréales à paille sont des cultures qui restituent beaucoup de biomasse au sol et contribuent fortement à l'entretien du stock d'humus du sol. Dans les successions de cultures à dominante céréalière, l'exportation des pailles doit donc être raisonnée pour éviter un bilan humique déficitaire.



Chaumes de blé

En revanche, les pommes de terre et les cultures légumières restituent peu de matière au sol et contribuent donc peu au renouvellement du stock d'humus. Les céréales à pailles non exportées ont donc un rôle important dans les rotations légumières.

Les prairies pluriannuelles jouent un rôle important dans la succession de cultures de par leur importante biomasse racinaire, qui contribue après leur destruction à l'alimentation du stock d'humus. Pour optimiser leur effet sur la structure du sol et sur la maîtrise des adventices, elles doivent être dans l'idéal en place sur plus d'une année.

LONG
TERME

Des essais de rotation céréalière biologique **sans élevage** (pas d'apport de fertilisants organiques) ont été menés sur la ferme pilote de Mapraz (Genève). Les résultats montrent que dans une rotation céréalière avec un an de prairie fauchée et restitution de toutes les pailles, le bilan humique est tout juste positif. Les pistes d'amélioration concernent l'augmentation de la durée de la prairie à 2 ans et l'apport de composts de déchets verts.

• Rôle des couverts d'interculture

Les couverts d'interculture et surtout ceux développant une forte biomasse foliaire et racinaire contribuent à alimenter le sol en résidus végétaux : 30 % du carbone contenu dans les couverts sont intégrés à l'humus du sol.

Les résultats d'essais de longue durée avec des cultures intermédiaires implantées régulièrement montrent une augmentation du stock de carbone organique du sol de 150 à 300 kg/ha/an. Cela se traduit également par un accroissement de la minéralisation de l'azote du sol : au bout de 13 ans, le surplus est chiffré à 36 kg N/ha dans une expérimentation en Champagne crayeuse.

... par les fertilisants organiques

(voir fiche « engrais organiques »)

• **L'apport de matière organique active** (lisier, engrais vert,...) permet d'entretenir la vie du sol et ainsi favoriser le recyclage des nutriments et la décomposition de l'humus.

• **L'apport de fumiers, de composts d'origine animale ou végétale** constitue une source de matière organique stable qui contribue à entretenir la teneur en humus du sol.

... par la réduction du travail du sol

La réduction du travail du sol et notamment la réduction de la profondeur du labour permet une augmentation de la teneur en humus dans l'horizon labouré. Elle favorise également l'activité biologique et à terme une meilleure structuration du sol, à condition que des moyens préventifs soient mis en oeuvre pour limiter les tassements qui se régénèrent plus lentement dans les horizons non travaillés.

En revanche, la maîtrise des adventices annuelles et surtout des vivaces reste difficile dans ces systèmes où le sol est peu perturbé.

Contribution de produits organiques à l'augmentation de la teneur en matière organique du sol

D'après Houot et al., moyenne sur des essais de longue durée.

Produit organique	Part du carbone apporté intégrant le stock d'humus du sol
Composts de déchets verts, d'effluents d'élevage	Environ 40 %
Fumiers de bovins	Environ 25 %
Lisiers	Environ 21 %

Comment évaluer la fertilité du sol ?

• Observer :

- Les cultures : vigueur, développement racinaire,...
- Le sol : présence de vers de terre ou d'autres organismes tels que les collemboles ou de signes de leurs activités (turricules, galeries,...), vitesse de décomposition des résidus, test bêche, profil cultural, mini-profil 3D au télescopique...



Mini-profil 3D au télescopique

Ces observations peuvent alerter sur un dysfonctionnement du sol et déboucher sur des analyses plus approfondies.

• Faire des analyses

Mesures des teneurs en matière organique, du pH, analyse ADN,...

Réaliser des analyses de sol à intervalles réguliers (par exemple tous les 5 ans) permet d'évaluer l'impact des pratiques culturales et de les corriger si nécessaire.

• Évaluer l'impact sur le long terme

Le taux d'humus du sol évolue sur de nombreuses années, que ce soit à la hausse ou à la baisse. L'outil SIMEOS-AMG permet d'évaluer l'impact de la succession des cultures et des pratiques mises en oeuvre sur l'évolution des taux de matière organique du sol sur 30 ans.

Graphisme : C. Czerjba, AGT-RT - Crédit photos : AGT-RT

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A. Andriulo, B. Mary et J. Guérif; 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*. 19. 365-377
 E. Justes, N. Beaudoin, P. Bertuzzi, R. Charles, J. Constantin, et al. ; 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Ed. Quae.
 FIBL/BioSuisse ; 2013. Les principes de la fertilité des sols.

ITAB/Arvalis Institut du végétal ; 2010. Actes de la journée technique « Gestion de la fertilité des sols ».

S. Houot, M.-N. Pons, M. Pradel, A. Tibi; 2016. Recyclage de déchets organiques en agriculture - Effets agronomiques et environnementaux de leur épandage. Ed. Quae.

V. Tomis ; 2012. Gestion de l'état organique des sols avec SIMEOS-AMG. Techniques culturales simplifiées n°68.

LIMITER LES PERTES D'AZOTE PAR LIXIVIATION POUR EN DISPOSER POUR LES CULTURES SUIVANTES

Les sources d'azote dans les systèmes en agriculture biologique sont limitées. Réduire les pertes par lixiviation (plus communément appelé lessivage) est un enjeu fort pour recycler l'azote présent dans la parcelle et le rendre disponible pour les cultures.

Facteurs impactant la lixiviation

La lixiviation de l'azote dépend de plusieurs facteurs :

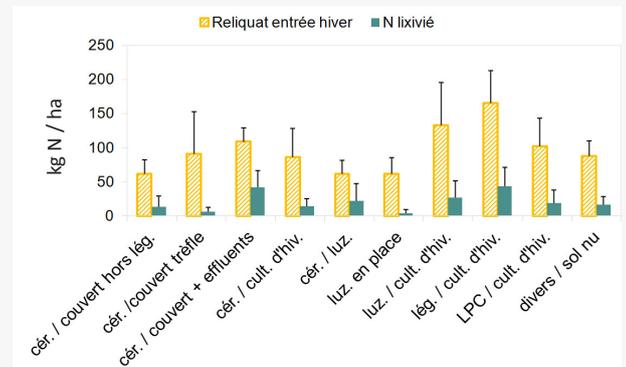
- **La présence d'azote dans le sol en entrée hiver** : il résulte de la fertilisation organique, de la minéralisation des résidus de cultures, notamment des légumineuses et de la minéralisation de l'azote organique du sol.
 - **Une absorption d'azote faible ou nulle** : absence de culture ou de couvert, culture aux besoins faibles (cas du blé tendre en automne).
 - **Un drainage de l'eau dans le sol**, qui dépend du déficit en eau du sol à la récolte et du cumul de pluviométrie de la moitié de l'automne au début du printemps.
 - **Le type de sol** (texture et profondeur d'enracinement). Les quantités d'azote lixiviées en sols superficiels et sableux sont ainsi 2 à 3 fois supérieures à celles des sols limoneux profonds pour un même reliquat entrée hiver et un même drainage hivernal.
- La lixiviation de l'azote a donc généralement lieu en hiver, période où la pluviométrie est importante et le prélèvement d'azote par les plantes faible.

Le reliquat d'azote en entrée hiver permet d'apporter une information quant au risque de lixiviation d'azote pendant l'hiver, mais un reliquat élevé n'entraîne pas systématiquement une forte quantité d'azote lixiviée. Dans les sols profonds, la lixiviation est souvent réduite d'une part par la profondeur élevée d'enracinement des cultures qui permet de récupérer l'azote disponible dans les horizons profonds et d'autre part par la faiblesse du drainage en lien avec la réserve utile élevée.

Quantités d'azote lixiviées pour différents couples précédent-suivant

Quantifications réalisées sur la base de mesures de reliquats azotés sur 35 parcelles en AB de la région Hauts-de-France, projet ENBIO (INRA).

Résultats obtenus principalement sur limons profonds



Cér. : céréales ; lég. : légumineuses ; cult. d'hiv. : culture d'hiver ; luz. : luzerne ; LPC : légumes de plein champ

Situations à risque :

- après légumineuses ou précédents à résidus riches en azote (pomme de terre, colza)
- après fertilisation organique d'automne avec produits facilement minéralisables
- sol non couvert entre récolte d'été et cultures de printemps

Le risque est d'autant plus élevé en sols superficiels.

Leviers permettant de réduire la lixiviation

Limiter le reliquat d'azote minéral disponible à l'automne

Fertilisation

Éviter l'application de fertilisants organiques facilement minéralisables à l'automne (lisiers, fientes de poules...) sauf sur culture en cours (exemple : colza).

• Gestion des résidus de culture

L'enfouissement des pailles permet de limiter la minéralisation à l'automne à 20 kg/ha contre 45 kg/ha pour des pailles exportées, grâce au piégeage de l'azote du sol lors de leur décomposition.

• Retournement des prairies temporaires au printemps

La minéralisation intervient 1 mois et demi à 2 mois après retournement. Pour un retournement en février, la minéralisation se fait donc en avril, période d'absorption d'azote par les cultures. **Il est toutefois nécessaire de rester vigilant sur les deux intercultures suivant le retournement de prairies avec légumineuses** (voir fiche luzerne).

Piéger l'azote dans les situations à fort reliquat azoté à l'automne

• **Planter des cultures fortement consommatrices en azote et à enracinement profond** (exemple : colza à l'automne, à planter le plus précocement possible)

• Planter des couverts en interculture (CIPAN)

- Privilégier les **non légumineuses**, notamment les crucifères, absorbant plus d'azote dans les situations à fort reliquat

- Planter le couvert le plus rapidement possible après récolte (autour du 15 août) pour avoir une **levée précoce** et optimiser le prélèvement de l'azote du sol par le couvert

- **Détruire le couvert le plus tard possible** pour éviter une libération trop précoce de l'azote contenu dans les résidus du couvert en sortie hiver : si une destruction mécanique en fin d'hiver semble optimale, cette date est à adapter en fonction de la culture qui suit et du type de sol.



Couvert vesce + avoine

Date de destruction du couvert recommandée en fonction de la culture suivante, du type de sol et de la technique d'implantation (d'après Arvalis-Institut du Végétal et al., 2011)

Culture suivante			
Culture d'hiver		Culture de printemps précoce (céréale de printemps)	Culture de printemps tardif (maïs...)
Limon sain, craie, sable	Juste avant le semis	Mi-novembre à mi-décembre	Novembre à début mars au plus tard
Limon argileux, sol argilo-calcaire			Labour : dès mi-novembre Non-labour : mi-novembre à début février
Sol argileux	Non labour : juste avant le semis Labour : anticiper la date de destruction et de labour	Non labour : mi-novembre Labour : anticiper la date de destruction et de labour	Non labour : mi-novembre à mi-décembre Labour : anticiper la date de destruction et de labour

Limitier les risques à l'échelle de la rotation par les prairies temporaires

La présence de la luzerne ou de prairies temporaires limite les pertes à l'échelle de la rotation du fait de l'absorption continue d'azote par les espèces prairiales en place (voir fiche luzerne).

Réduire le travail du sol

Le non labour permettrait une diminution de la minéralisation du sol du fait de la réduction des perturbations du sol, et donc celle des quantités d'azote potentiellement lixiviable. Cependant, cette pratique tend à concentrer les stocks d'azote organique sur l'horizon travaillé, et induit donc sur le long terme un surplus de minéralisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arvalis-Institut du végétal, Cetiom, ITB ; 2011. Cultures intermédiaires : impacts et conduite.

M. Benoît ; 2014. Les fuites d'azote en grandes cultures céréalières : Lixiviation et émissions atmosphériques dans des systèmes biologiques et conventionnels du bassin de la Seine (France). Sciences de la Terre. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2014.

N. Beaudoin, JK Saad, C. Van Laethem et al. (2005) Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. Agric Ecosyst Environ 111:292-310

J. Anglade Bertholon. Agriculture biologique et qualité des ressources en eau dans le bassin de la Seine : caractérisation des pratiques et applications territorialisées. Sciences de la Terre. Université Pierre et Marie Curie- Paris VI, 2015.

E. Justes, N. Beaudoin, P. Bertuzzi, R. Charles, J. Constantin, et al. ; 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Ed. Quae.

COMBINER DIFFÉRENTS LEVIERS À L'ÉCHELLE DE LA SUCCESSION CULTURALE POUR OPTIMISER LA GESTION DE L'AZOTE

Les sources d'azote disponibles en Agriculture Biologique (légumineuses, fertilisants organiques) imposent une gestion pluriannuelle de l'azote à la fois pour anticiper les besoins des cultures qui vont se suivre dans la parcelle et pour réduire les risques de pertes d'azote en interculture.

Principes de la construction de la rotation

Est-ce que j'ai de l'élevage sur mon exploitation ?

Oui / Non

Est-ce que mon voisin est éleveur ?



Est-ce que je peux implanter de la luzerne ?

Oui / Non

Je peux mobiliser...

- **Prairies temporaires, luzerne** en tête de rotation
- **Apports de produits organiques** : fumier, compost, lisier,... pour compléter en cours de rotation et pour apporter d'autres éléments minéraux (P, K,...)
- **Légumineuses en culture ou en interculture** pour réintroduire de l'azote en cours de rotation (féverole, trèfle blanc,...)

J'ai de la chance !

Possibilités d'échanges pailles/fumier, luzerne/fumier, de vendre la luzerne sur pied

Je peux mobiliser...

- **Légumineuses** en culture, en interculture
- **Apports de produits organiques du commerce** sur les cultures exigeantes

Je peux mobiliser...

- **Luzerne en tête de rotation**
- **Légumineuses** en culture/ en interculture
- En complément : **apports de produits organiques** du commerce sur les cultures exigeantes

Je fais attention...

- **Risques de pertes d'azote** derrière prairies temporaires/ luzerne et après apport de produits organiques
- **Concordance entre disponibilité de l'azote** libéré par les prairies/ les produits organiques **et besoins des cultures**
- **Équilibre entre exportations des pailles/ restitutions de matière organique** pour la fertilité des parcelles sur le long terme
- **Compensation des exportations de phosphore et de potassium** dues à la luzerne et aux légumineuses par des apports de fertilisants organiques

Je fais attention...

- **Risques de pertes d'azote** derrière luzerne
- **Concordance** entre disponibilité de l'azote et besoins des cultures
- **Compensation des exportations de phosphore et de potassium** dues à la luzerne et aux légumineuses
- **Délais de retour des légumineuses**

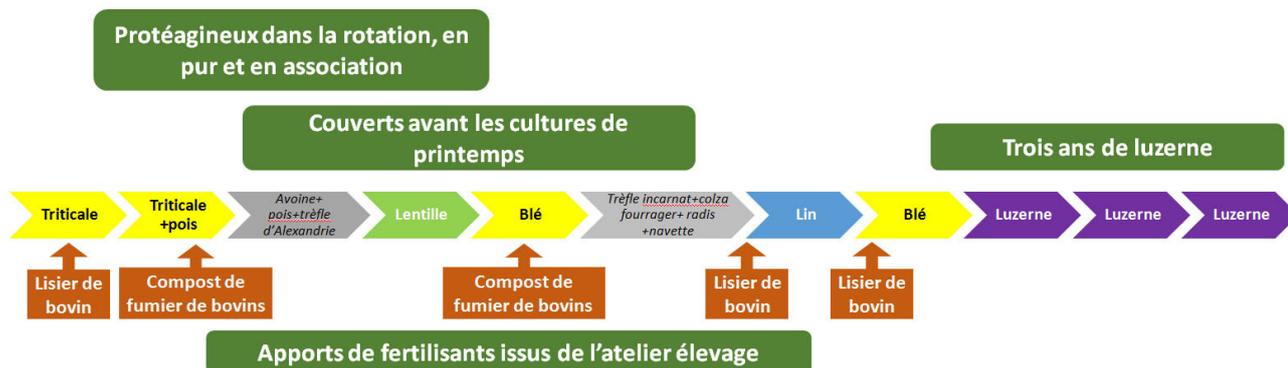
Je fais attention...

- **Délais de retour des légumineuses**
- **Autonomie** de l'exploitation pour l'azote
- **Fertilité long terme** : enfouir les pailles, apporter au moins une fois du compost dans la rotation (compost de déchets verts ?)
- **Gestion du chardon** : mobiliser d'autres leviers, par exemple des déchaumages répétés d'été ou de printemps.

Exemple 1 : gestion de l'azote en grandes cultures avec élevage

Résultats obtenus sur une parcelle de craie suivie dans le cadre du projet Agri-Bio

Historique des pratiques de gestion de l'azote mises en œuvre sur la parcelle



Gestion de l'azote dans la succession de cultures

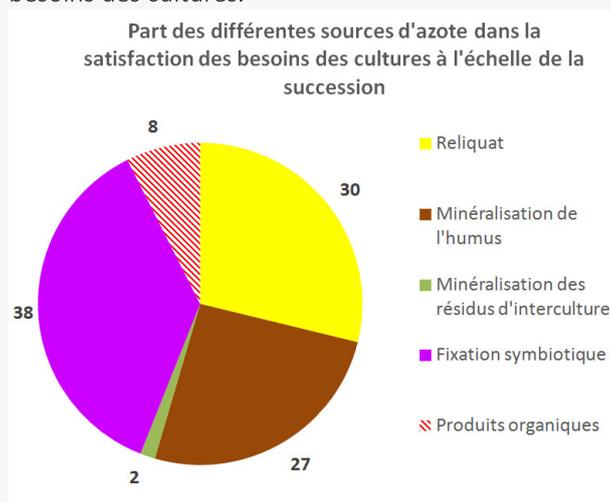
• Satisfaction des besoins des cultures

En moyenne sur la succession, **100 % des besoins des cultures pour atteindre le rendement potentiel sont satisfaits**. Cependant, l'indicateur utilisé (bilan CORPEN) ne permet pas de juger de la disponibilité de l'azote au bon moment pour les cultures.

La dynamique de minéralisation de l'azote est en effet difficile à prévoir car très dépendante du climat.

• Autonomie azotée

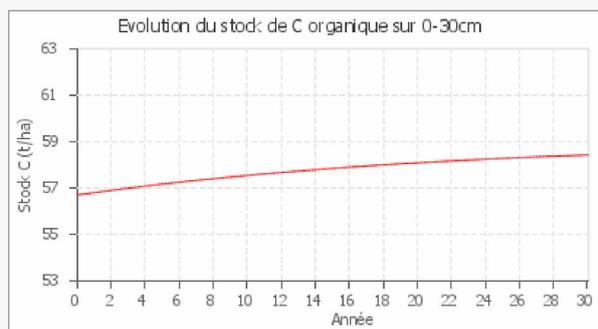
Les pratiques mises en œuvre permettent à l'agriculteur d'être autosuffisant pour l'azote tout en satisfaisant les besoins des cultures.



• Fertilité long terme

Résultat de simulation sur SIMEOS-AMG

Les pratiques mises en œuvre, répétées sur 30 ans, permettent d'augmenter le stock de matière organique sur la couche travaillée. Cela est permis par la luzerne, par l'apport régulier de fertilisants organiques et par les couverts d'interculture.



Points de vigilance

• Pertes d'azote en interculture

- Peu de pertes sous la luzerne en place et sous les couverts en interculture longue, risque ponctuel après luzerne.
- Apports répétés de matière organique entraînant un risque modéré mais présent avant céréale d'hiver.

Résultats obtenus sur des systèmes de culture similaires dans le projet Agri-Bio

Résultats similaires sur les systèmes de culture avec élevage du réseau Agri-Bio, avec toutefois des bilans en potassium pouvant être déficitaires lorsque les exportations de la luzerne ne sont pas compensées par des apports de fertilisants riches en potassium (sulfate de potassium, vinasse,...).

Graphisme : C. Czernyba, AGT-RT - Crédit photos : AGT-RT

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agro-Transfert Ressources et Territoires, INRA. SIMEOS-AMG, Outil de Simulation de l'Etat Organique des Sols- www.simeos-amg.org/
COMIFER ; 2007. Teneur en P, K, Mg des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ et les principaux fourrages

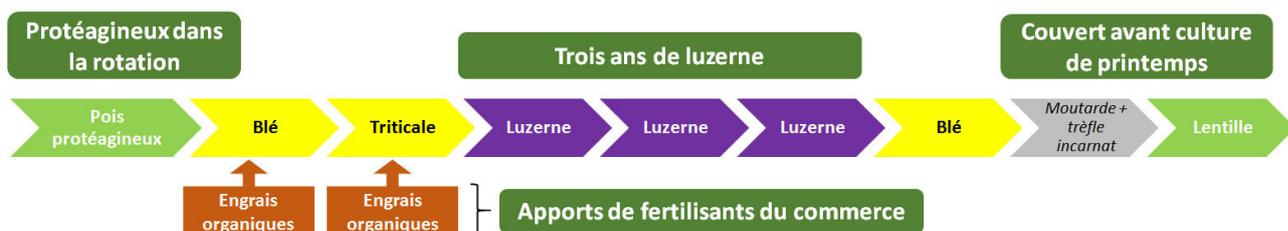
COMIFER ; 2013. Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales- Cultures annuelles et prairies
M. Laurent, S. Minette ; 2005. Guide d'utilisation de la méthode MERCI v2., Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes

COMBINER DIFFÉRENTS LEVIERS À L'ÉCHELLE DE LA SUCCESSION DE CULTURES POUR OPTIMISER LA GESTION DE L'AZOTE

Exemple 2 : gestion de l'azote en grandes cultures avec luzerne et sans élevage

Résultats obtenus sur une parcelle de limon suivie dans le cadre du projet Agri-Bio

Historique des pratiques de gestion de l'azote mises en œuvre sur la parcelle



Gestion de l'azote dans la succession de cultures

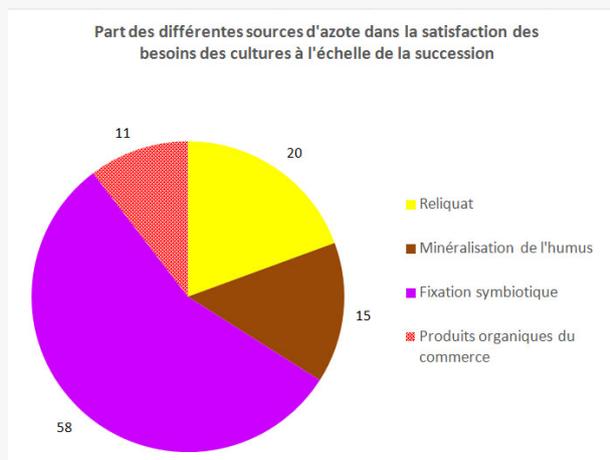
• Satisfaction des besoins des cultures

En moyenne sur la succession, **100 % des besoins des cultures pour atteindre le rendement potentiel sont satisfaits**. Cependant, l'indicateur utilisé (bilan CORPEN) ne permet pas de juger de la disponibilité de l'azote au bon moment pour les cultures.

La dynamique de minéralisation de l'azote est difficile à prévoir car très dépendante du climat de l'année.

• Autonomie azotée

Dans cet exemple, 11 % de l'azote apporté provient de fertilisants du commerce.

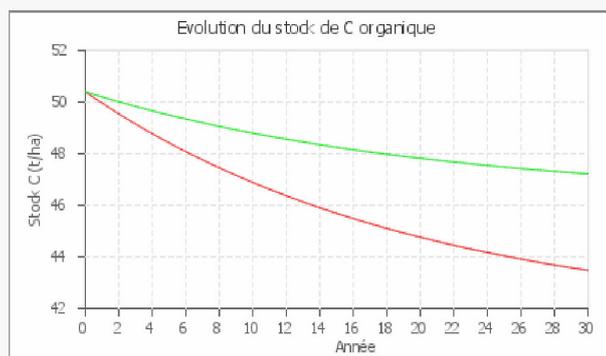


• Fertilité long terme

Résultat de simulation sur SIMEOS-AMG

Ces pratiques, répétées sur 30 ans, diminuent le stock de matière organique sur la couche travaillée, initialement élevé (courbe rouge).

Un apport de compost dans la rotation et l'ajout d'un couvert en interculture permettent d'atténuer cette tendance (courbe verte) et de maintenir le taux de matière organique à plus de 2 % dans l'horizon travaillé.



Points de vigilance

• Pertes d'azote en interculture

Risque limité sous la luzerne et couverts en interculture longue ; risque ponctuel après destruction de la luzerne et après protéagineux.

• Fertilité P et K

Quantités importantes de phosphore et de potassium exportées par la luzerne, non compensées par des apports d'engrais : bilan phosphore (-118 kg P/ha) et surtout potassium (-1099 kg K/ha) très déficitaires.

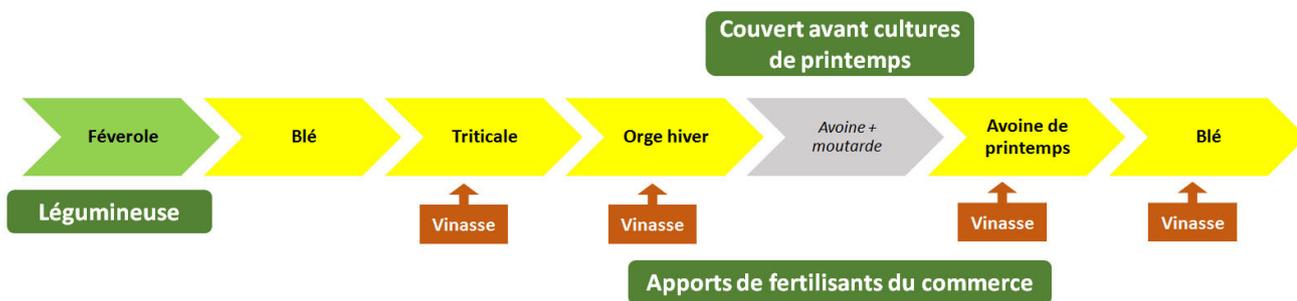
=> En fonction du stock initial de la parcelle, des apports d'éléments fertilisants appropriés (vinasse, sulfate de potassium,...) sont à envisager.

Résultats identiques obtenus sur les systèmes de culture similaires suivis dans le projet Agri-Bio

Exemple 3 : gestion de l'azote en grandes cultures sans luzerne

Résultats obtenus sur des terres de marais, parcelle suivie dans le cadre du projet Agri-Bio

Historique des pratiques de gestion de l'azote mises en œuvre sur la parcelle



Gestion de l'azote dans la succession de cultures

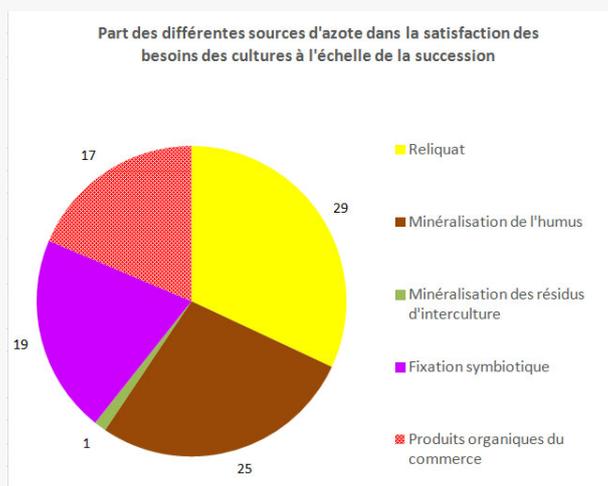
• Satisfaction des besoins des cultures

En moyenne sur la succession, **80 % des besoins des cultures pour atteindre le rendement potentiel sont satisfaits**. La présence d'une légumineuse et les apports de vinasse ne suffisent pas à satisfaire entièrement les besoins des cultures, et notamment du blé et du triticale.

Un compromis est trouvé entre satisfaction des besoins des cultures, coût de la fertilisation et gestion des adventices annuelles, qui bénéficient aussi de l'azote disponible.

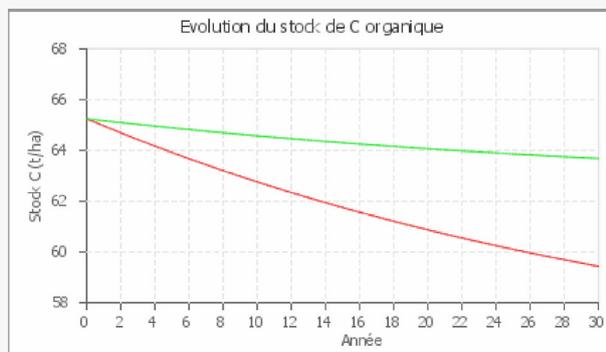
• Autonomie azotée

Dans cet exemple, 14 % de l'azote apporté provient de fertilisants du commerce.



• Fertilité long terme

Résultat de simulation sur SIMEOS-AMG



Ces pratiques, répétées sur 30 ans, diminuent le stock de matière organique sur la couche travaillée, initialement élevé sur cette parcelle. Un apport de compost dans la rotation et l'ajout d'un couvert en interculture permettent d'atténuer cette tendance et de stabiliser le taux de matière organique dans l'horizon travaillé à plus de 2 %.

Points de vigilance

• Pertes en interculture

Risques de pertes d'azote en interculture liés aux apports réguliers de vinasse et à la part de céréales d'hiver n'absorbant pas beaucoup d'azote en automne dans la succession.

• Fertilité P et K

- Bilan en phosphore déficitaire (-192 kg P/ha)
- Bilan en potassium excédentaire (998 kg K/ha), dû aux apports fréquents de vinasses.

Graphisme : C. Czeryba, AGT-RT - Crédit photos : AGT-RT

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agro-Transfert Ressources et Territoires, INRA. SIMEOS-AMG, Outil de Simulation de l'Etat Organique des Sols- www.simeos-amg.org/
COMIFER ; 2007. Teneur en P, K, Mg des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ et les principaux fourrages

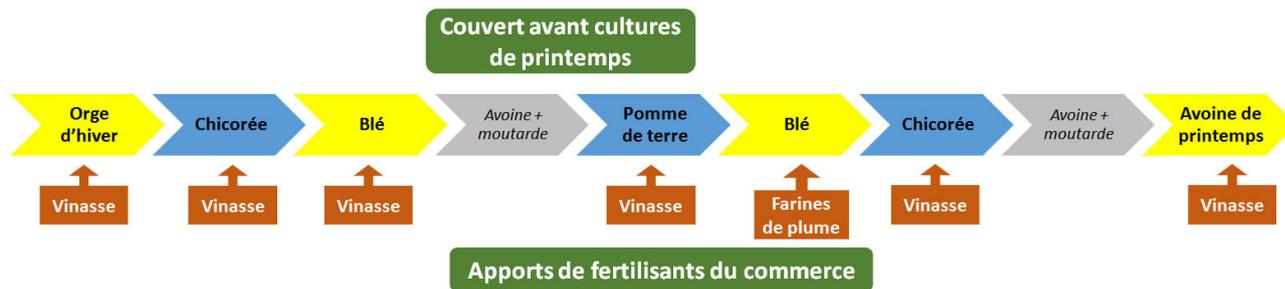
COMIFER ; 2013. Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales- Cultures annuelles et prairies
M. Laurent, S. Minette ; 2005. Guide d'utilisation de la méthode MERCI v2., Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes

COMBINER DIFFÉRENTS LEVIERS À L'ÉCHELLE DE LA SUCCESSION DE CULTURES POUR OPTIMISER LA GESTION DE L'AZOTE

Exemple 4 : gestion de l'azote en système de grandes cultures avec légumes

Résultats obtenus sur une parcelle de limons suivie dans le cadre du projet Agri-Bio

Historique des pratiques de gestion de l'azote mises en œuvre sur la parcelle



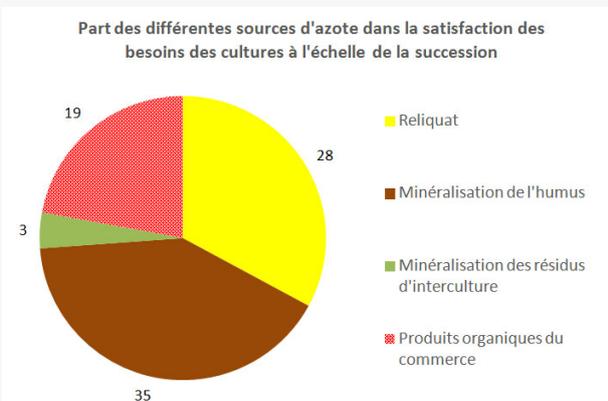
Gestion de l'azote dans la succession de cultures

• Satisfaction des besoins des cultures

En moyenne sur la succession, **80 % des besoins des cultures pour atteindre le rendement potentiel sont satisfaits**, dont 60 à 70 % des besoins du blé et de la pomme de terre. Les apports de fertilisants organiques ne suffisent pas pour satisfaire totalement les besoins des cultures, mais résultent d'un compromis entre objectif de production, coût de la fertilisation et gestion des adventices annuelles, qui bénéficient aussi de l'azote disponible.

• Autonomie azotée

19 % de l'azote apporté proviennent de fertilisants du commerce.



• Fertilité long terme

Résultat de simulation sur SIMEOS-AMG



Le retour fréquent des légumes tend à diminuer le stock de matière organique (courbe rouge) initialement élevé sur cette parcelle, malgré la restitution des pailles des céréales et les couverts en interculture. L'apport d'un compost dans la rotation permettrait de stabiliser le taux de matière organique du sol (courbe verte) et de stabiliser le taux de matière organique dans l'horizon travaillé à plus de 2 %.

Points de vigilance

• Pertes d'azote en interculture

Risque de pertes d'azote élevé : absence de couverts avant certaines cultures de printemps (chicorée, avoine) et restitutions d'azote élevées après pomme de terre.

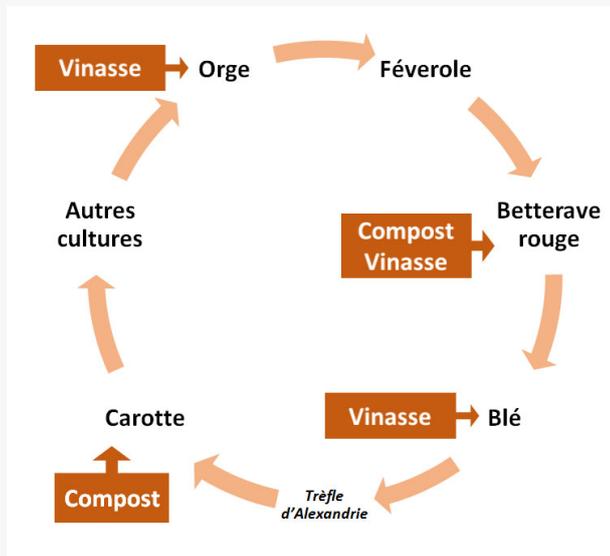
• Fertilité P et K

- Bilan en phosphore légèrement déficitaire (-76 kg P/ha)
- Apport de vinasse tous les ans engendrant un bilan excédentaire en potassium (plus de 1000 kg K/ha). Les observations sur cette parcelle montre un développement important du laitron, qui serait favorisé par cet excédent.

Résultats obtenus dans le projet Agri-Bio sur d'autres systèmes de culture avec retours fréquents de légumes

➤ Avec apports de composts

Exemple d'une succession de cultures sur une parcelle de limon suivie dans le cadre du projet Agri-Bio



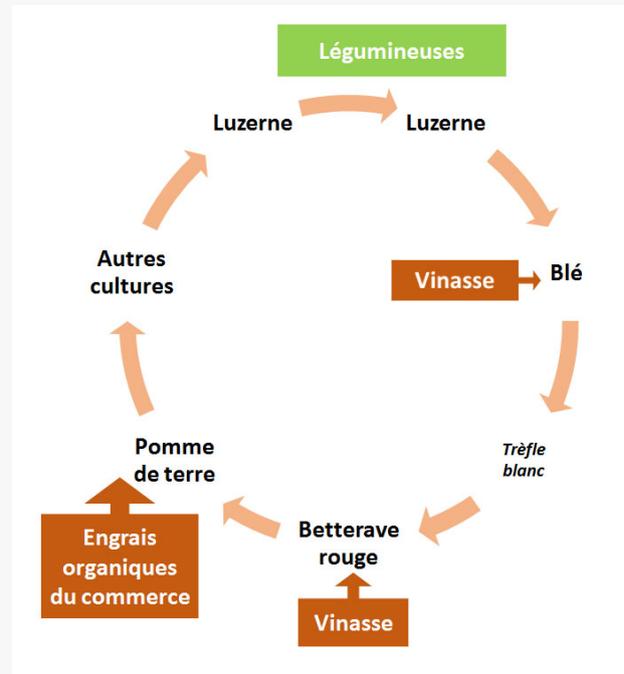
- Résultats identiques pour la satisfaction des besoins des cultures, l'autonomie azotée et le bilan P et K
- Meilleurs résultats sur la fertilité sur le long terme grâce à l'apport de composts



Carottes

➤ Avec luzerne

Exemple d'une succession de cultures sur une parcelle de limon suivie dans le cadre du projet Agri-Bio



- Augmentation de l'autonomie azotée
 - Déstockage de la matière organique du sol du fait de l'absence d'amendements organiques
 - Bilan déficitaire en phosphore et potassium car les exportations de la luzerne et des légumes ne sont pas suffisamment compensées
- ⇒ Piste d'amélioration identifiée par l'agriculteur : ne pas exporter la luzerne.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agro-Transfert Ressources et Territoires, INRA. SIMEOS-AMG, Outil de Simulation de l'Etat Organique des Sols- www.simeos-amg.org/
 COMIFER ; 2007. Teneur en P, K, Mg des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ et les principaux fourrages

COMIFER ; 2013. Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales- Cultures annuelles et prairies

M. Laurent, S. Minette ; 2005. Guide d'utilisation de la méthode MERLIN v2., Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes

Contacts

Agro-Transfert Ressources et Territoires

2, chaussée Brunehaut
80200 ESTREES MONS

Aïcha Ronceux

Chargée de projet
Tél. 03 64 35 00 12
a.ronceux@agro-transfert-rt.org

Élise Favrelière

Assistante chargée de projet
Tél. 03 22 85 35 21
e.favreliere@agro-transfert-rt.org

www.agro-transfert-rt.org



Ce document a été bâti dans le cadre du projet «Agri-bio : de la connaissance à la performance»

Démarré en 2011, le projet «Agri-bio : de la connaissance à la performance» conduit par Agro-Transfert Ressources et Territoires a pour objectifs de :

- ▶ Caractériser les facteurs de performance des systèmes de production en AB à dominante grandes cultures
- ▶ Capitaliser sur les solutions issues de la recherche et celles issues de l'expérience des agriculteurs

Avec le soutien financier de :



UNION EUROPÉENNE



Région
Hauts-de-France



Partenaires scientifiques et techniques :



• AGRICULTURE BIOLOGIQUE
EN PICARDIE



Les Agriculteurs **BIO** du Nord-Pas-de-Calais



Partenaires associés :

