



Juin 2021

GUIDE DE GESTION DE L'AZOTE POUR L'ATTEINTE D'UNE HAUTE PERFORMANCE AZOTÉE

Réalisé dans le cadre du projet **Agro-éco-Syst'N**
financé par le CASDAR et les organismes partenaires

Agro-éco-Syst’N

Guide de gestion de l’azote pour l’atteinte d’une haute performance azotée

Table des matières

1.	Vers des systèmes à Haute Performance Azotée (HPN)	4
a)	Les enjeux des faibles pertes d’azote.....	4
b)	Le nitrate et sa lixiviation	4
c)	L’ammoniac et sa volatilisation	8
2.	Comment évaluer cette performance.....	11
a)	Quels indicateurs pour évaluer la performance azotée.....	11
b)	Observer et mesurer aux champs pour estimer la performance azotée	12
c)	Estimer la performance azotée par simulation avec Syst’N.....	12
3.	Description de systèmes à haute performance azotée.....	12
a)	Démarche d’évaluation des performances azotées du projet Agro-éco-Syst’N	13
b)	Présentation des systèmes de culture étudiés.....	13
i.	Localisation et contexte des différents systèmes étudiés	13
ii.	Principales caractéristiques des systèmes de culture	14
iii.	Des milieux plus ou moins vulnérables.....	14
c)	Classement des systèmes par niveau de performance azotée	15
d)	Description et analyse des systèmes doublement performants.....	18
i.	Système de culture raisonné amélioré de la Saussaye.....	18
ii.	Système légumier de plein champ « Basses fuites d’azote » (Finistère)	27
e)	Description et analyse du système performant du point de vue du nitrate mais pas du point de vue de l’ammoniac	33
i.	Système de culture de Champagne crayeuse de « référence »	33
f)	Description et analyse des systèmes performants ou très performants du point de vue de l’ammoniac, mais pas performants du point de vue du nitrate.....	38
i.	Systèmes de culture bio de La Saussaye.....	38
ii.	Système bio « fertilité » de Corbas.....	39
iii.	Système bio « diversité » de Corbas.....	42
iv.	Système légumier de plein champ «pratiques habituelles» (Finistère)	44

v.	Système céréalier avec fumier de volailles du Morbihan.....	46
vi.	Système de culture raisonné « initial » de la Saussaye	49
vii.	Système céréalier du Berry : rotation courte en sol argilo-calcaire superficiel et moyen.....	52
viii.	Système céréalier du Berry : rotation courte en sol limon-sableux.....	53
ix.	Système céréalier du Berry : système innovant en sol argilo-calcaire superficiel et moyen.....	55
x.	Système céréalier du Berry : système innovant en limon sableux	56
4.	Gestion de l'azote pour la performance en nitrate :.....	59
5.	Gestion de l'azote pour la performance en ammoniac.....	62
	Annexe : Vulnérabilité du milieu où se situent les différents systèmes étudiés	64



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



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



Résumé

Les pertes d'azote au champ posent des problèmes économiques et climatiques comme des problèmes environnementaux. Dans le projet Agro-éco-Syst'N, la haute performance azotée a été considérée sous l'angle des faibles pertes d'azote au champ cultivé, en se focalisant sur les pertes de nitrate et la qualité de l'eau (lixiviation) d'une part, et les pertes d'ammoniac dans l'air (volatilisation). La volatilisation de l'ammoniac est un phénomène consécutif aux apports d'azote, c'est une question d'efficacité de la fertilisation de synthèse et organique. La lixiviation du nitrate est un phénomène plus complexe qui dépend des excès hydriques, comme de nombreuses pratiques réalisées dans les semaines, les mois voire les années précédant les épisodes de drainage de l'eau au-delà des racines des cultures. Dans 6 sites de France métropolitaine, nous avons estimé les pertes d'azote au cours des rotations par des simulations avec l'outil Syst'N calées le plus souvent avec des mesures d'azote minéral dans le sol. La grande performance en pertes d'ammoniac (volatilisation de moins de 5 % des apports) a été atteinte dans 5 sites sur 6, tandis que la performance en pertes de nitrate (lixiviation entre 5 et 10 kg N pour 100 mm drainés) est au rendez-vous dans seulement 3 systèmes de culture issus de 3 sites différents. Dans les sols acides ou peu basiques, la grande performance en volatilisation a le plus souvent été obtenue via le choix de formes d'engrais de synthèse riches en nitrate (ammonitrate, nitrate de chaux, sulfonitrate) ; ce qui n'a pas suffi dans les sols crayeux de Champagne. La performance en nitrate a été obtenue généralement par un piégeage de nitrate en été et automne en interculture courte comme en interculture longue, piégeage qui s'avère essentiel dès lors qu'il y a des apports d'azote organique ou de synthèse en été et automne, une forte minéralisation de l'azote ou des fertilisations azotées de printemps qui ne sont pas économes.

Coordinateurs de la rédaction : M. Bedu¹, S. Gaillard¹ et R. Reau¹

Co-auteurs : F. Celette², A. Guezengar³, L. Guillomo⁴, M. Heurtaux⁵, D. Le Hir³, V. Parnaudeau¹, A. Schneider⁶, P. Tauvel⁷, M. Thirard⁴, J-F. Vian²

¹INRAE, ²Isara, ³CRAB, ⁴EPLEFPA, ⁵Chartres-La Saussaye, ⁶Acta, ⁷Terres Inovia, ⁷ITB

Modalités de citation de cet ouvrage :

Reau R., Bedu M., Gaillard S. et al., 2021. Guide de gestion de l'azote pour l'atteinte d'une haute performance azotée. Projet CASDAR Agro-éco-Syst'N N° 5611. <http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=146>

Licence d'utilisation :



Creative Commons CC-BY-NC (possibilité de copier, partager, modifier ce document et créer de nouvelles ressources à partir de ses éléments, sous réserve de citer les auteurs et de n'en faire aucun usage commercial sans autorisation de l'auteur)

Glossaire

Reliquat entrée d'hiver : Quantité d'azote minéral présent dans le sol en entrée d'hiver

Quantité d'azote absorbé à l'entrée d'hiver : Azote absorbé par la culture en place en entrée d'hiver (culture principale ou culture intermédiaire) entre sa levée et l'entrée d'hiver

Quantité d'azote absorbé pendant l'hiver : Azote absorbé par la culture entre l'entrée et la sortie de l'hiver

Azote en jeu : Somme du reliquat entrée d'hiver et de la quantité d'azote absorbé à l'entrée d'hiver

Pertes par lessivage : Quantité d'azote lixiviée sous la forme de nitrate au cours de l'hiver

1. Vers des systèmes à Haute Performance Azotée (HPN)

a) Les enjeux des faibles pertes d'azote

Avoir de faibles pertes dans les champs cultivés, est devenu un enjeu important d'un triple point de vue :

- Pour les agriculteurs, c'est d'abord un enjeu **économique** compte tenu du coût économique croissant des engrais : une bonne façon d'économiser sur le poste fertilisation, est d'éviter que leurs champs en perdent,
- Consommer peu d'engrais azoté de synthèse est un enjeu pour **l'atténuation du réchauffement climatique**, au même titre que les faibles émissions de protoxyde d'azote, car leur fabrication et leur utilisation sont sources de production de gaz à effet de serre,
- Une eau peu polluée en nitrate et de faibles émissions d'ammoniac dans l'atmosphère, sont des enjeux **environnementaux et sanitaires**.

Pour contribuer à ces enjeux, les travaux du projet Agro-éco-Syst'N ont choisi de se concentrer sur les pertes d'azote issues du champ cultivé, les plus importantes en volume : la lixiviation du nitrate et la volatilisation de l'ammoniac qui peuvent se comptabiliser en dizaines de kilogrammes d'azote par hectare et par an.

Nous commençons par rappeler les phénomènes à l'origine de ces pertes d'azote dans le champ cultivé. Puis nous analysons les performances obtenues dans une série de situations où les partenaires du projet ont évalué les pertes d'azote à partir de 6 sites où l'on expérimente des systèmes de culture plus ou moins innovants, en nous focalisant ici sur les situations qui s'avèrent performantes pour le nitrate et/ou l'ammoniac. Enfin, nous en faisons une synthèse sur les perspectives d'une gestion des systèmes de culture pour une haute performance azotée.

b) Le nitrate et sa lixiviation¹

Les processus à l'origine des pertes d'azote sont souvent complexes. Ils sont à la fois sous la dépendance du climat et des pratiques culturales, récentes et plus anciennes. Ils sont surtout interdépendants. La lixiviation² est le processus au cours duquel l'eau passe au travers des pores du sol en entraînant les éléments très solubles dans l'eau comme le nitrate, par percolation en profondeur.

L'action clé du climat : l'excédent climatique d'eau

Cette circulation de l'eau démarre lorsque l'eau a saturé la capacité de rétention d'eau par le sol : c'est le début de la percolation ou du drainage dans le sol au-delà de la profondeur d'enracinement. Le volume d'eau total qui percole au cours d'une campagne au-delà du niveau des racines par exemple est appelée « lame d'eau drainante ».

¹ Ce chapitre b) ainsi que le chapitre c) suivant est issu du « Guide pratique du diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture » proposé également par le projet Agro-éco-Syst'N.

² En toute rigueur, on utilise ici le terme de « lixiviation » pour le nitrate qui est en solution dans l'eau. Le terme de lessivage est en effet réservé aux éléments solides comme l'argile.

Sous le climat de la moitié nord de la France métropolitaine, cela se produit principalement en automne sous l'effet de la pluie, comme au printemps sous l'effet de la pluie combinée aux premières irrigations.

La lixiviation est très influencée par :

- les textures et la pierrosité des horizons du sol qui sont déterminants de ses capacités de rétention de l'eau: elle est minimale dans les sols sableux et maximale dans les sols argileux.
- la profondeur d'enracinement détermine aussi cette capacité de rétention. Dès que le nitrate descend par percolation au-delà de la profondeur d'enracinement, il devient très difficilement absorbable.

La lame d'eau drainante est ainsi maximale lorsque :

- Le cumul de pluie est élevé,
- Les sols ont une faible capacité volumique de rétention d'eau (texture sableuse ; beaucoup de pierres, faible profondeur du sol colonisable par les racines),
- La profondeur d'enracinement est nulle (sol nu en interculture, culture pas encore levée), ou faible (culture peu avancée dans son cycle, culture dont l'enracinement est gêné par un obstacle structural).

L'intensité de la lixiviation du nitrate est une combinaison de la lame d'eau drainante et de la quantité de nitrate présente dans le sol au moment où le drainage se produit. Plus celles-ci sont élevées, plus le risque d'en perdre via son entraînement au-delà de la zone d'enracinement est important.

La quantité d'azote minérale présente dans le sol au début de la phase de drainage est un indicateur intéressant pour caractériser « l'azote potentiellement lessivable » là où le drainage a lieu en automne et en hiver principalement. C'est une mesure facile à réaliser au champ.

Sous le climat de la France métropolitaine, la lixiviation a lieu majoritairement en automne et en hiver, mais pas seulement. Pour les cultures de printemps et d'été, des épisodes supplémentaires peuvent avoir lieu plus tard, alors que la culture n'est pas encore semée ou qu'elle a encore un très faible enracinement. Durant ces périodes, un scénario courant de pertes de nitrate au printemps est le suivant : après une irrigation ou des pluies d'orage, le sol se sature en eau et provoque un drainage. Celui génère de la lixiviation d'autant plus importante que le sol contient beaucoup d'azote minéral (fertilisation au semis et/ou minéralisation de printemps).

Les pratiques clés pour expliquer les pertes de nitrate :

De nombreuses pratiques influencent les pertes de nitrate. Cependant certaines d'entre elles ont un rôle majeur, parce qu'elles permettent d'expliquer l'essentiel de la variabilité de la quantité d'azote minéral du sol présente au début du drainage, au sein d'un champ cultivé, pour une année donnée.

Ces pratiques clés se résument au nombre de quatre pratiques essentielles³ :

- la culture précédente (*sa nature et la façon dont elle a été cultivée, fertilisée et récoltée*) qui est une composante de l'azote disponible en été et en automne,
- la culture suivante (*sa nature, sa date de levée, sa croissance*) dont dépend le potentiel de piégeage de nitrate ; ainsi le couple précédent-suivant conditionne l'utilisation de l'azote « laissée » par la culture précédente
- la fertilisation organique depuis la récolte de la culture précédente jusqu'en automne,

³ Pour les cultures de printemps irriguées, on pourrait ajouter une cinquième pratique-clé : l'irrigation. En effet, quand l'irrigation coïncide avec un épisode pluvieux (ex. orage juste un passage d'irrigation), elle accroît le volume de la lame drainante et par conséquent le risque de lixiviation du nitrate.

- la fertilisation azotée de synthèse appliquée en été et en automne, en interculture ou sur la culture d'hiver déjà semée.

i. La culture précédente

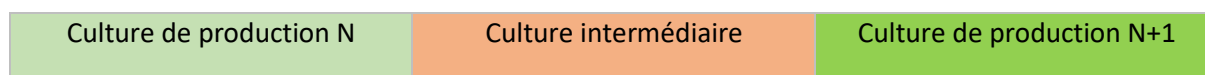
La quantité d'azote minérale laissée par la culture précédente varie grandement en fonction de la culture considérée. Le COMIFER a mis cela en évidence et ces tendances ont aussi été confirmées par de récents travaux, menés en Belgique et en France. Ces différences s'expliquent majoritairement par (i) la quantité de résidus aériens et souterrains retournés au sol, (ii) leur teneur en azote (feuilles de colza riches en azote ou au contraire pailles de céréales pauvres en azote...) et (iii) leur date de récolte (plus la date de récolte est précoce, plus la minéralisation en sol nu est longue, plus il y a d'azote disponible dans le sol à l'automne ; ainsi, après les cultures récoltées en automne comme la betterave, il y a très peu d'azote disponible, alors qu'après des récoltes de juillet, il y en a beaucoup).

L'effet de la culture précédente sur l'azote disponible en été et en automne est ici considéré pour des cultures à l'équilibre de fertilisation. Un déséquilibre de la fertilisation azotée engendre un surplus de fertilisation qui rajoute un surplus d'azote disponible à l'effet précédent expliqué ci-dessus.

ii. La culture suivante

La culture suivante conditionne la capacité de piégeage de l'azote minéral entre la récolte du précédent et le début du drainage. Cette culture peut être une culture principale de production, une culture intermédiaire, une culture dérobée ou une culture intermédiaire à valorisation énergétique. Elle permet de piéger de l'azote disponible en été et automne, et contribue ainsi à avoir de faibles reliquats d'azote en entrée d'hiver. Cette capacité d'absorption des cultures dépend de leur nature et de leur durée de croissance. Par exemple, du fait de son semis précoce et de sa croissance importante sur la phase automnale, le colza a une grande capacité de piégeage de l'azote du sol, tandis qu'une céréale d'hiver a une capacité faible.

Le couplage 2 à 2 de cultures successives d'une rotation est une clé de compréhension du potentiel de lixiviation. Par exemple, après une culture précédente annonçant une importante quantité d'azote minéral dans le sol, le potentiel de lixiviation repose sur la capacité de la culture suivante de piéger une grande partie de cette quantité importante d'azote avant le début du drainage ; et si la culture de production suivante dans la rotation présente de faibles capacités (cas majoritaire en dehors du colza d'hiver) ou bien que son semis intervient après la période majoritaire de drainage à l'automne /hiver (cas des cultures de printemps et d'été), l'insertion d'une culture intermédiaire contribue à compenser ce faible piégeage. En pratique, cette succession de culture peut être décrite par le triplet :



iii. La fertilisation organique d'été et d'automne

La troisième pratique clé est la fertilisation organique depuis la récolte de la culture précédente. Souvent, les fertilisants organiques sont appliqués en période d'interculture pour éviter d'abimer les cultures en place ou de passer sur les sols en conditions humides. Ils sont placés après les récoltes de début d'été quand le sol est sec, donc portant, pour éviter de dégrader sa structure. Ces apports agissent directement et à court terme sur l'azote disponible dans le sol à cette période, car une partie

du fertilisant est déjà sous forme minérale, et que la minéralisation de l'azote organique du produit peut être rapide. Ils conduisent à un fort potentiel de lixiviation, à chaque fois que cet azote minéral n'est pas piégé rapidement par la culture suivante⁴.

Une autre pratique vient influencer le stock d'azote en entrée drainage ; nous ne la développons pas ici dans la mesure où elle agit à long terme. La fertilisation organique réalisée régulièrement sur la rotation, comme la pratique de prairies de longue durée dans le passé de la parcelle, via leur action sur la minéralisation de l'humus, contribuent à avoir beaucoup d'azote disponible en été et en automne dans le sol de ces champs cultivés.

iv. La fertilisation azotée de printemps

Cette fertilisation azotée, de synthèse ou organique, a longtemps été présentée comme la première pratique à maîtriser pour faire de l'eau de qualité. Son effet est réel, la surfertilisation au printemps entraîne un surplus d'azote disponible à sa récolte et par conséquent en été et en automne ; cette fertilisation de printemps agit sur le moyen terme. D'ailleurs, elle agit indirectement via l'effet de la culture précédente, une pratique qui a été mise en avant comme la première pratique clé ci-dessus

La figure 1 présente les principales pratiques clés des pertes survenant en automne et en hiver, pour des cultures annuelles, et la façon dont elles interagissent sur les variables d'état clés.

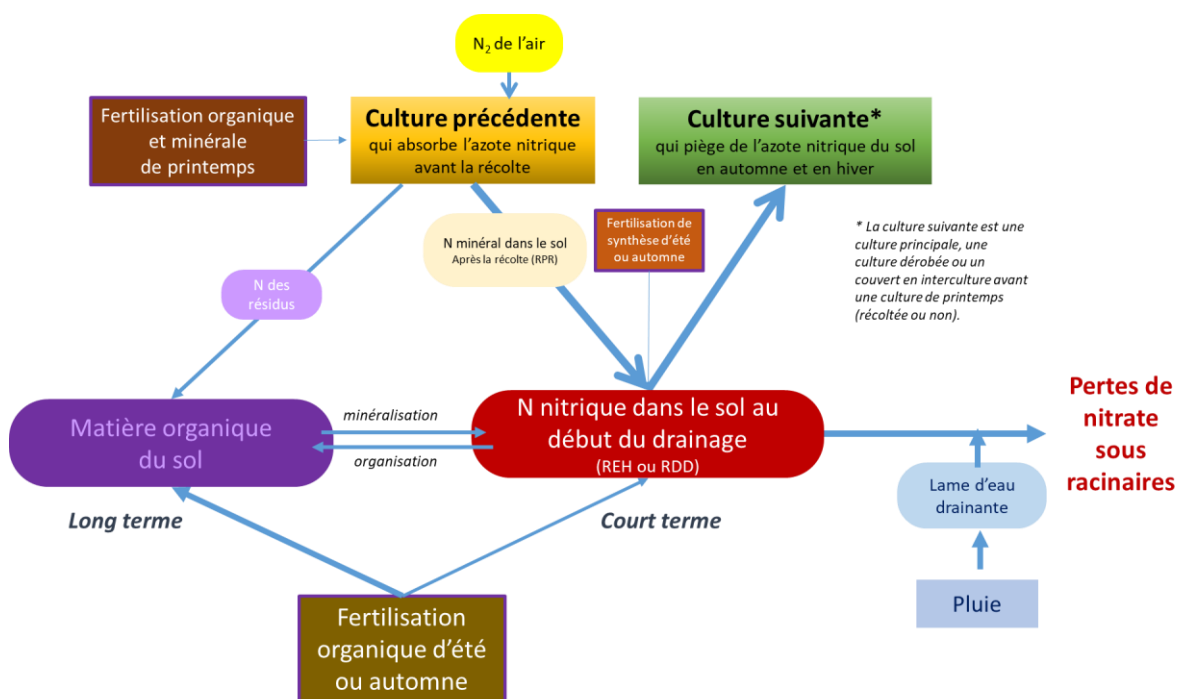


Figure 1 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes de nitrate en automne-hiver sous une culture annuelle

⁴ Les pailles de céréales qui sont enfouies peuvent contribuer à piéger par organisation 10 à 30 unités seulement.

Les pertes de nitrate sont la résultante de nombreuses interactions entre les pratiques clés et les états clés. Ces interactions sont différentes d'une situation à l'autre, c'est pourquoi il est important d'analyser spécifiquement chaque situation. La clé pour aboutir à un système avec de faibles risques de pertes de nitrate, est d'avoir une faible quantité d'azote nitrique disponible dans le sol avant tout épisode de drainage. Les voies pour y parvenir sont multiples.

c) L'ammoniac et sa volatilisation

La volatilisation d'ammoniac (NH_3) est le transfert vers l'atmosphère de l'ammoniac gazeux présent de la surface du sol vers la couche d'air située juste à la surface du sol. Cet ammoniac en phase gazeuse est issu de la transformation de l'azote présent sous forme d'ammonium (NH_4^+) à la surface du sol. Tout cela se passe en surface du sol du champ cultivé. L'ammonium situé dans le sol au-delà de 5 cm de profondeur, il est généralement consommé dans le sol avant son passage à la surface.

Les pertes par volatilisation surviennent très rapidement après les apports d'engrais azotés et les enfouissements de résidus organiques quand ils sont riches en azote : la majorité de la volatilisation se produit ainsi dans les heures qui suivent, et elle est pratiquement achevée au bout d'un délai de 3 semaines.

Ces processus sont très dépendants du sol et du climat du champ cultivé :

- La capacité d'échange cationique (CEC) du sol agit sur la fraction du cation d'ammonium qui peut être soumise à volatilisation. En effet, pour que l'ammonium soit transformé en ammoniac, il faut qu'il soit dissout dans la solution présente en surface du sol ; si la CEC de l'horizon de surface est importante (cas des sols riches en argile et matière organique), l'ammonium est adsorbé sur les particules de sol et ne se dissout pas dans cette solution. Ainsi plus la CEC est faible, plus le risque de volatilisation est important.
- Le pH du sol en surface agit sur l'équilibre chimique qui conditionne la transformation de l'ammonium en ammoniac. Plus le pH est élevé, plus l'équilibre se déplace vers la production d'ammoniac au détriment de l'ammonium⁵.
- La température agit également sur cet équilibre chimique. Plus la température est élevée, plus l'équilibre penche vers la production d'ammoniac.

Pour qu'il y ait transfert de l'ammoniac depuis la solution du sol vers l'air, il faut qu'il y ait une différence de concentration entre la surface du sol et la couche d'air environnante : avec peu de vent, cette couche d'air est peu renouvelée et vite « saturée » en ammoniac et le transfert est vite stoppé ; dans le cas contraire, le transfert se poursuit longtemps et la quantité d'ammoniac volatilisée est importante.

Les pratiques clés pour comprendre les pertes d'ammoniac :

De nombreuses pratiques influencent les pertes par volatilisation. Cependant certaines d'entre elles ont un rôle majeur, parce qu'elles agissent directement sur les états-clés et les flux d'azote ou indirectement en modifiant l'état du champ cultivé, sol et microclimat en surface compris... Ces pratiques clés sont au nombre de cinq : la fertilisation de synthèse appliquée en surface, la fertilisation organique appliquée en surface, le travail du sol après l'apport, l'irrigation, et la culture en place.

⁵ Le pH de l'engrais est tout aussi important. Par exemple, l'hydrolyse de l'urée conduit à une augmentation du pH autour des granulés, ce qui favorise très nettement la production d'ammoniac.

i. La fertilisation azotée de synthèse

L'un des déterminants de la quantité d'ammonium en surface après un apport est la quantité d'azote apporté sous forme d'ammonium et de son précurseur l'urée. A ce titre, le choix de la forme d'engrais apporté est crucial. En effet, plus l'engrais est riche en ammonium (NH_4^+) et en urée, plus le risque de volatilisation est fort.

Pour les principaux engrais de synthèse utilisés en France, l'urée est l'engrais le plus « à risques » car 100% de la quantité apportée devient de l'ammonium (après hydrolyse de l'urée, qui se fait très rapidement). La solution azotée qui contient 50% d'urée, 25% d'ammonium (soit à terme 75% d'ammonium) et 25% de nitrate présente un risque intermédiaire. Et l'ammonitrate qui contient 50% de nitrate et 50% d'ammonium est moins à risque.

La figure 2 propose une hiérarchie des risques de volatilisation suivant la forme d'engrais.

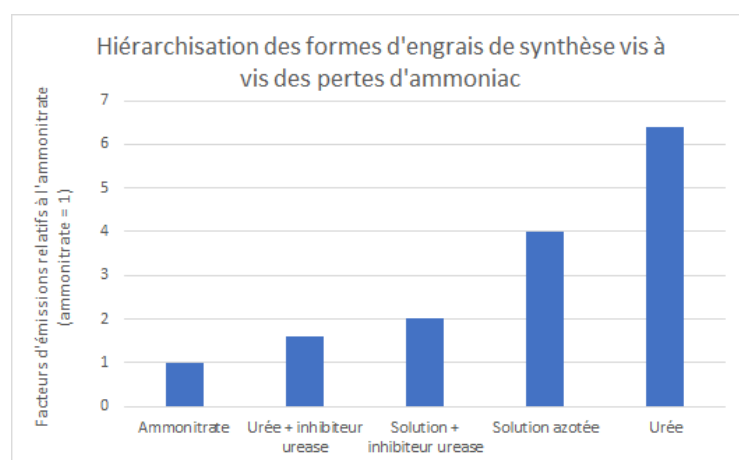


Figure 2 – Hiérarchie des risques de volatilisation suivant les engrais de synthèse par comparaison avec l'ammonitrate (EMEP, 2016)

On considère ainsi que l'urée risque d'émettre 6.5 fois plus d'ammoniac que l'ammonitrate.

La dose d'engrais apporté est bien évidemment aussi un facteur non négligeable : plus la quantité apportée est importante, plus le risque de volatilisation augmente. Le risque de volatilisation dépend des quantités d'ammonium et d'urée apportées : ainsi 100 kg d'ammonitrate ne vont apporter « que 50 kg » d'ammonium alors que 100 kg d'urée apporteront in fine 100 kg d'ammonium, soit le double. Enfin, le choix du positionnement de l'application est également crucial. Si l'apport est positionné juste avant une pluie (ou une irrigation), les risques de volatilisation sont réduits.

ii. La fertilisation azotée organique

Comme les produits de synthèse, les produits organiques apportent en surface une quantité plus ou moins importante d'ammonium, ou de son précurseur, l'acide uréique. **Pour la volatilisation, l'état-clé est la concentration en ammonium et acide uréique à la surface du sol juste après l'apport.** En effet, la minéralisation de la matière organique du produit, et la production d'ammonium qui en résulte, se fait sur des pas trop longs pour influencer la volatilisation.

Les produits à plus forte concentration en ammonium ou acide uréique sont les plus risqués en termes de volatilisation (lisiers, fientes, etc). Par ailleurs, la quantité d'azote volatilisé est plutôt plus forte pour les produits solides que pour les produits liquides (facteur d'émissions autour de 0.8 au lieu de 0.5).

Comme pour les engrais de synthèse, la date d'application est cruciale : le positionnement de l'apport avant une pluie favorise l'infiltration de l'ammonium et limite la volatilisation.

iii. Le travail du sol au moment de l'épandage et après

Les pratiques culturales de travail du sol qui permettent d'appliquer l'engrais en profondeur ou de retourner la surface du sol après l'application contribuent à faire passer l'urée et l'ammonium en profondeur et à diminuer leur concentration en surface. Elles concernent :

- L'épandage de l'engrais combiné à un travail du sol: les injecteurs permettent d'injecter l'engrais à 15 ou 20 cm de profondeur ; les dispositifs d'épandage d'engrais de synthèse sur les outils de travail du sol ou de binage permettent de localiser l'engrais plus en profondeur.
- Le travail du sol postérieur à l'épandage : un passage d'outil de travail du sol permet d'enfouir une grande partie de l'engrais apporté. Cette technique est efficace dans la mesure où elle est réalisée avant que la volatilisation de l'engrais azoté ait lieu ; dans la pratique il est recommandé de réaliser cet enfouissement moins de 6 heures après l'apport d'engrais.

iv. L'irrigation

Une pluie qui a lieu dans les 24h après l'application permet de faire percoler l'azote au-delà des premiers centimètres du sol et de le soustraire à la volatilisation. Comme une pluie, l'irrigation sature la surface du sol et l'eau qui percole peut entraîner l'ammonium au-delà de 5 cm. De plus, elle contribue à créer un microclimat humide en surface du champ cultivé défavorable à la volatilisation. Positionner ainsi des irrigations après l'application des engrais azotés peut aider à maîtriser les risques de volatilisation.

v. La culture en place

La culture en place influence la volatilisation :

- de manière directe : la volatilisation est très faible pour les cultures qui ne reçoivent pas d'engrais azoté. C'est le cas de la plupart des légumineuses comme une partie des cultures à faibles besoins en azote qui ne sont pas fertilisées dans certaines situations,
- de manière indirecte, par le biais du microclimat qu'elle va engendrer en réduisant la volatilisation de l'azote apporté par les engrais. En effet, si la végétation en surface est régulière et dense lors de l'application, elle fait baisser la température et la vitesse du vent à l'intérieur du couvert : les risques de volatilisation sont ainsi réduits. Pour des applications d'engrais réalisés sur une végétation dense, une partie de l'ammoniac émis peut être piégé par le couvert et absorbé au niveau des stomates de la plante. . A l'inverse, quand l'application d'engrais est réalisée sur sol nu avant le semis ou avant la levée, les risques de volatilisation sont accrus

La figure 3 résume le lien entre les pratiques, les états clés et les pertes d'ammoniac après un apport.

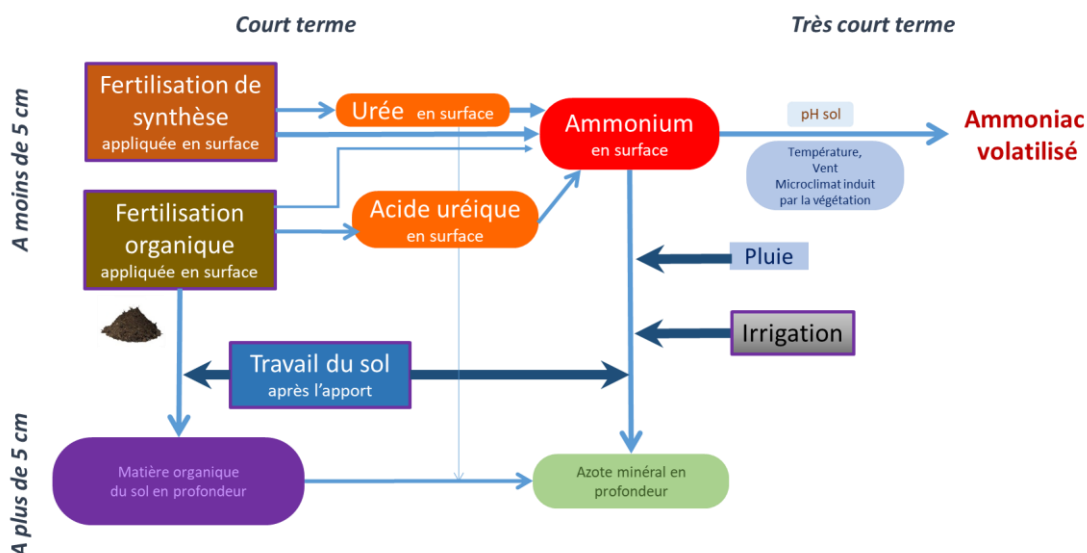


Figure 3 - Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes par volatilisation de l'ammoniac dans un champ cultivé

Comme indiqué plus haut, l'état clé principal est la quantité d'ammonium en surface à partir de l'apport. Cette quantité dépend en premier lieu de la fertilisation réalisée, et en particulier de la forme d'engrais utilisée qui – à dose égale – peut faire varier du simple au triple la quantité d'ammonium mis en surface. Cette quantité d'ammonium apporté en surface via les engrais correspond à « l'azote potentiellement volatilisable » (APV).

Les pertes d'ammoniac sont des évènements fugaces, en lien direct avec la quantité d'ammonium présent à la surface du sol. Les deux clés pour réduire les pertes par volatilisation sont (i) d'appliquer une quantité d'azote potentiellement volatilisable faible et/ou (ii) de l'entraîner au-delà de 5 cm le plus rapidement possible.

2. Comment évaluer cette performance

a) Quels indicateurs pour évaluer la performance azotée

Les objectifs en termes de pertes étant variables d'un territoire à un autre du fait de contextes et d'enjeux différents, des seuils communs ont été choisis ici afin d'évaluer l'atteinte ou non d'une haute performance azotée concernant les pertes par lessivage et par volatilisation. Ces seuils sont exprimés en valeurs relatives : en fonction de la lame drainante pour le nitrate lixivié et en fonction de la dose moyenne d'azote exogène apportée. Les seuils sont les suivants :

- Lixiviation de nitrate : **moins 5 kg N/ha/an pour 100 mm d'eau drainée**
- Volatilisation : **moins de 5%** de l'apport d'azote moyen annuel

La haute performance azotée repose sur de faibles pertes de nitrate et d'ammoniac globalement en moyenne annuelle du système de culture.

Une situation est considérée comme très performante pour le nitrate si l'on obtient en moyenne moins de 5 kg N/ha/an de lixiviation de nitrate ; entre 5 et 10 kg N/ha/an, elle est considérée comme performante ; sinon elle est non performante.

Une situation est considérée comme très performante pour l'ammoniac si l'on obtient en moyenne moins de 5 % de volatilisation des apports réalisés ; entre 5 et 10 %, elle est considérée comme performante ; sinon elle est non performante.

b) Observer et mesurer aux champs pour estimer la performance azotée

Dans des dispositifs de recherche, les pertes d'azote se mesurent à l'aide de bougies poreuses ou de cases lysimétriques pour la lixiviation du nitrate, ou à l'aide de chambres de mesures pour la volatilisation de l'ammoniac.

Dans les champs agricoles et une partie des expérimentations, les dispositifs ci-dessus sont trop lourds. Pour estimer ces pertes malgré tout, on mesure le potentiel de pertes d'azote, sachant qu'ensuite le potentiel de pertes s'exprime plus ou moins selon les circonstances climatiques ; en effet, les pertes d'azote dépendent de l'action aléatoire du climat, via la pluviométrie et la lame d'eau drainante en automne et hiver pour le nitrate, via l'humidité de surface, le vent et la température dans les jours qui suivent chaque apport pour l'ammoniac.

Pour le nitrate, on estime le potentiel de lixiviation, par la mesure de la quantité d'azote minéral présent sur la profondeur du sol au début du drainage, que l'on appelle aussi reliquat d'azote de début du drainage ou d'entrée d'hiver. La lixiviation effective dépend ensuite de la pluviométrie de l'année et du sol : à partir de ce potentiel, on peut la calculer avec le modèle de Burns ou encore avec un modèle dynamique (Lixim par exemple). Nous recommandons de réaliser des mesures d'azote minéral au champ au début du drainage, car les calculs réalisés à partir des pratiques restent approximatifs, même lorsque l'ensemble des pratiques déterminantes de l'année est bien renseigné.

Pour l'ammoniac, le potentiel de volatilisation est estimé par la quantité d'azote apportée sous forme d'ammonium et d'urée qui est appliquée en surface et qui y reste après enfouissement éventuel de l'engrais. Ainsi, nous proposons de l'estimer à partir des pratiques de fertilisation azotée sachant que la volatilisation suit immédiatement les applications d'engrais.

c) Estimer la performance azotée par simulation avec Syst'N

L'outil Syst'N permet de simuler les pertes d'azote à partir d'une description des pratiques culturales, du sol et du climat. Grâce à son modèle dynamique déroulé au pas de temps journalier, il est plus précis que les modèles plus empiriques comme IN de Indigo, tout en étant plus complexe à renseigner.

Pour les estimations de pertes de nitrate, nous recommandons de les caler en procédant à une ou plusieurs mesures d'azote minéral dans le sol au début du drainage au cours de la rotation du système de culture.

Pour les estimations de la volatilisation de l'ammoniac, Syst'N peut être utilisé directement à partir des pratiques, en gardant en mémoire que le modèle actuel ne tient pas compte de la vitesse du vent.

3. Description de systèmes à haute performance azotée

Nous présentons ici l'analyse des performances azotées réalisées à partir de 6 sites, ou réseau de sites expérimentaux dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N, où une attention particulière est donnée aux situations qui performantes soit du point de vue du nitrate, soit du point de vue de l'ammoniac. Ces 6

sites concernent des cultures annuelles exclusivement : grandes cultures et légumes de plein champ sans irrigation.

a) Démarche d'évaluation des performances azotées du projet Agro-éco-Syst'N

Chaque responsable de site expérimental a réalisé une évaluation de la situation, c'est-à-dire le système de culture resitué dans le contexte du sol de chaque site comme dans les séries climatiques choisies. Pour caractériser les pratiques de culture et les performances azotées associées, nous avons privilégié le grain de la rotation des cultures en présentant les pertes en kilogrammes d'azote perdus par hectare et par an. Puis pour réaliser l'analyse des résultats, l'analyse des pertes a ensuite été décomposée au grain de la période de drainage annuelle pour le nitrate, et au grain de l'apport de fertilisant azoté pour l'ammoniac.

Généralement, chaque responsable a fait une évaluation avec Syst'N des pertes azotées sur la base du système de culture qui a effectivement été expérimenté, ce qui a permis de caler le paramétrage et de réaliser un premier diagnostic des pertes. Puis dans la moitié des sites, le responsable a réalisé de l'expérimentation « virtuelle » en évaluant a priori ce qu'auraient donné un ou plusieurs autres systèmes de culture appelés « amélioré », « innovant » ou encore « basses fuites d'azote » selon les cas.

b) Présentation des systèmes de culture étudiés

i. Localisation et contexte des différents systèmes étudiés

Les 21 systèmes étudiés sont issus de 6 différents dispositifs expérimentaux ou agricoles répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain (Figure 4). Ces sites présentent une variabilité climatique (du climat océanique au continental à influences méditerranéennes) avec entre autres caractéristiques, une pluviométrie moyenne annuelle allant de 600 à 1000 mm.

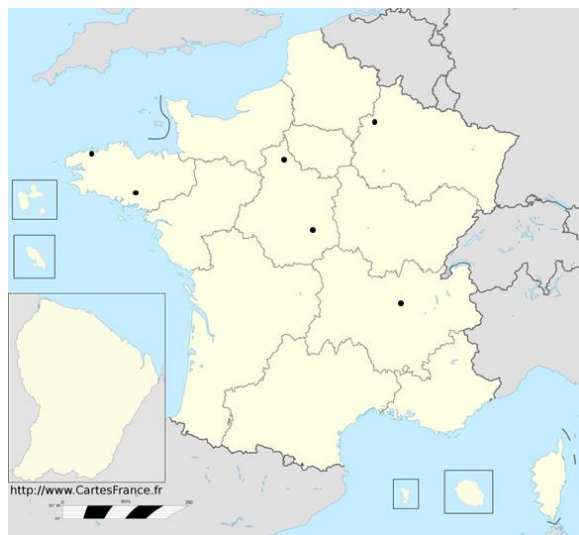


Figure 4 - Localisation des systèmes étudiés (les points noirs représentent les différents sites sur lesquels un ou plusieurs systèmes ont été étudiés)

Les sols sont également variés mais bien souvent relativement profonds (plus de 90 cm) sauf dans le Berry (18 et 36) où le sol argilo-calcaire superficiel a une profondeur de 40 à 60 cm. Une partie des sites se situe en zone vulnérable au nitrate d'origine agricole comme par exemple en Champagne (51), dans les sites bretons (29, 56), dans la Beauce (28) ou encore à Corbas (69). Cependant dans certains contextes territoriaux, l'enjeu principal est plutôt lié à l'amélioration de la capacité des cultures à capter l'azote du système et à la réduction des intrants en particulier minéraux (exemple du Berry). Dans les régions d'élevage comme dans le Morbihan (56) et le Finistère (29), on retrouve également des exploitations ou des territoires cherchant une plus ou moins grande autonomie protéique, ce qui mène

à l'intégration de légumineuses dans les rotations.

ii. Principales caractéristiques des systèmes de culture

Les systèmes étudiés correspondent partout à des systèmes grandes cultures (céréales, protéagineux et légumineuses), à l'exception du nord Finistère où ont été évalués des systèmes légumiers à base de chou-fleur.

Le type de fertilisation y est varié :

- Une **fertilisation azotée de synthèse seule**, sans légumineuse dans la rotation. Les systèmes de ce type dans cette étude correspondent à des rotations courtes durant entre 3 et 5 ans :
 - Système de référence de Champagne (51)
 - Systèmes céréaliers de référence du Berry (18 et 36)
- Une **fertilisation azotée de synthèse ou mixte**, sur un sol très riche en matière organique, sans légumineuse dans la rotation :
 - Systèmes légumiers du nord Finistère (29)
- Une **fertilisation azotée de synthèse ou mixte, avec légumineuse(s) dans une rotation** :
 - Système raisonné de La Saussaye (28) avec une fertilisation azotée uniquement de synthèse, dans une rotation avec pois de printemps
 - Système intégré de Kerguéhennec (56) en polyculture élevage avec une féverole dans la rotation et un apport de compost de fumier de volaille
 - Systèmes faisant un usage intensif des couverts d'interculture :
 - En Champagne (51) avec une rotation longue et diversifiée, comprenant un pois de printemps, de nombreux couverts.
 - Dans le Berry (18 et 36) avec des rotations assez longues entre 5 et 7 ans, avec couverts d'interculture et « colza associé »
- Sans **fertilisation de synthèse**, avec des systèmes en agriculture biologique basés sur des rotations longues et diversifiées :
 - Systèmes bio productifs de la Saussaye avec des cultures à forte valeur ajoutée et apports organiques
 - Systèmes bio autonomes de la Saussaye avec une rotation à base de légumineuses
 - Système bio « diversité » de Corbas avec une rotation de 7 ans, avec association d'espèces et de nombreux couverts d'interculture multispécifiques
 - Système bio « fertilité » de Corbas géré en agriculture de conservation (absence de labour, utilisation importante de couverts d'interculture)

iii. Des milieux plus ou moins vulnérables

La vulnérabilité au lessivage et à la volatilisation des systèmes dépend des conditions pédoclimatiques propres à chaque milieu. Le tableau 1 présente les précipitations moyennes annuelles et la réserve utile et le pH du sol qui ont été utilisés comme indicateurs de ces vulnérabilités.

Tableau 1 – Vulnérabilité des milieux où se situent les différents systèmes de culture

Lieu	Pluviométrie annuelle (mm)	Sol	R.U. sol (mm) (1)	Vulnérabilité lessivage (2)	pH	Vulnérabilité volatilisation (3)
Kerguéhennec (Morbihan)	1000	Brunisol sur micaschiste	150	● ● ●	6.4	● ○ ○
Roscoff	874	Sol limono-sablo-argileux profond (90cm) sur granit	117	● ● ●	8.2	● ● ●
Plougourvest (Finistère)		Limons éoliens profonds	149	● ● ○	7.2	● ● ○
Corbas (Rhône)	804	Texture limono-argilo-sableuse, pH alcalin	141	● ● ○	7.3	● ● ○
Berry (Cher et Indre)	699	Sols argilo-calcaire moyen	58	● ● ●	7.5	● ● ○
		Sols argilo-calcaire superficiel	44	● ● ●	7.5	● ● ○
		Sols limono-sableux profond	185	● ○ ○	7	● ○ ○
La Saussaye Sours (Eure-et-Loir)	600	Limon argileux profond (80cm) sur calcaire de Beauce	150	● ○ ○	6.9	● ○ ○
Béthény Champagne (Marne)	600	Terres de craie	150	● ○ ○	8.7	● ● ●

(1) La Réserve Utile (RU) du sol a été calculée avec Syst'N

(2) Vulnérabilité lessivage : le ratio RU/Pluviométrie annuelle a été calculé. Après analyse des valeurs obtenues trois groupes ont été proposés pour distinguer les systèmes : plus de 0.2, de 0.15 à 0.2 et moins de 0.15. Il s'agit plus précisément d'un niveau de vulnérabilité au drainage

(3) Vulnérabilité volatilisation avec 3 niveaux de pH : moins de 7, entre 7 et 7.5, plus de 7.5

Les niveaux de vulnérabilité sont présentés en trois classes pour chaque type de pertes. Le choix de ces seuils vise uniquement à positionner les systèmes les uns par rapport aux autres et non à fixer des niveaux de vulnérabilité absolus (plus de détails figurent en annexe).

c) Classement des systèmes par niveau de performance azotée

Les pertes d'azote des 21 systèmes de culture ont été simulées dans leur contexte pédoclimatique. Aucun système de l'échantillon n'a des pertes de nitrate inférieures à 5 kg N/100mm d'eau drainée. Trois ont des pertes de nitrate comprises entre 5 et 10 kg N/100mm. Les pertes des autres dépassent 10 kg N/100mm. Deux systèmes de l'échantillon ont des pertes d'ammoniac de plus de 10%, un système a des pertes comprises entre 5 et 10%, les autres ont des pertes très faibles de moins de 5%.

Seulement deux systèmes sont doublement performants (haute performance azotée) pour le nitrate comme pour la volatilisation (Tableau 3), ce sont des systèmes en agriculture conventionnelle utilisant uniquement la fertilisation azotée de synthèse. Trois systèmes ont une basse performance azotée (Tableau 4), ce sont également des systèmes en agriculture conventionnelle utilisant uniquement la fertilisation azotée de synthèse.

C'est en analysant la combinaison entre le système de culture et le site que nous allons analyser les conditions de la performance azotée de chaque situation, en différenciant le nitrate de l'ammoniac.

Tableau 1 - Classification des 21 systèmes de culture analysés par niveau de performance. La couleur d'arrière-plan des cases du tableau indique le niveau de performance azotée globale : fond vert : haute performance azotée, fond orange : performance azotée intermédiaire, fond rouge : basse performance azotée.

Pertes d'azote		Volatilisation d'ammoniac en kg N pour 100 kg N apportés		
		Plus de 10%	Entre 5 et 10%	Moins de 5%
Lixiviation de nitrate en kg N pour 100 mm de lame d'eau drainante	Moins de 5			
	Entre 5 et 10	- Système céréalier de référence en Champagne crayeuse		- Système de culture raisonné amélioré de La Saussaye - Système légumier de plein champ «basses fuites d'azote » du Finistère
	Plus de 10	- Système céréalier innovant en Champagne crayeuse	- Système de culture raisonné initial de La Saussaye	- Système légumier de plein champ «pratiques habituelles » du Finistère - Système céréalier avec fumier de volailles du Morbihan - Système céréalier avec rotation courte en limon sableux du Berry - Système céréalier innovant en limon sableux du Berry - Systèmes céréaliers avec rotation courte en sols argilo-calcaires (2) du Berry - Systèmes céréaliers innovants en sols argilo-calcaires (2) du Berry - Systèmes de cultures bio productifs (3) de La Saussaye - Systèmes de cultures bio autonomes (3) de La Saussaye - Système bio « diversité » de Corbas - Système bio « fertilité » de Corbas

Tableau 2 - Classification des systèmes par niveau de performance azotée, en fonction de leurs caractéristiques. La couleur d'arrière-plan des cases du tableau indique le niveau de performance : fond vert : haute performance azotée, fond orange : performance azotée intermédiaire, fond rouge : basse performance azotée.

Performance azotée	Systèmes grandes cultures				Système légumiers à forte minéralisation
	Fertilisation minérale uniquement	Fertilisation min. et org.	Fertilisation uniquement organique		
	Peu de légumineuses (moins de 25%)	Peu de légumineuses (moins de 25%)		Beaucoup de légumineuses (plus de 25%)	
Haute performance azotée	• Système de culture raisonné de La Saussaye, version améliorée				Système légumier de plein champ - « Basses fuites d’azote » (Finistère)
Performance azotée intermédiaire	• Système céréalier en limon sableux du Berry: rotation courte • Système céréalier en limon sableux du Berry : système innovant • Systèmes céréaliers en argilo-calcaire du Berry : rotation courte (2) • Systèmes céréaliers en argilo-calcaire du Berry : système innovant (2)	Système céréalier avec fumier de volailles du Morbihan	Systèmes de culture bio productifs (3) de La Saussaye	• Système « fertilité » de Corbas • Système « diversité » de Corbas • Systèmes de culture bio autonomes (3) de La Saussaye	Système légumier de plein champ - «Pratiques habituelles » (Finistère)
Basse performance azoté	• Système céréalier en craie de Champagne « de référence » • Système céréalier en craie de Champagne « innovant » • Système de culture raisonné de La Saussaye, version initiale				

d) Description et analyse des systèmes doublement performants

Voici chacune des deux situations doublement performantes en termes de pertes d'azote.

i. Système de culture raisonné amélioré de la Saussaye

Le système « raisonné amélioré » de La Saussaye est l'un des systèmes qui atteint la haute performance azotée, avec des pertes de nitrate de 8.6 kg N/100mm drainé (12 kg N/ha/an) et 5% des apports d'azote (6 kg N/ha/an) qui se volatilisent.

Les principales caractéristiques du site et du système sont les suivantes :

Contexte local

- **Ce système est issu d'une modélisation et n'a pas été mis en pratique sur site. Il a été bâti à partir d'hypothèses d'améliorations du cas « Système de culture raisonné de La Saussaye, version initiale ».**
- Exploitation du lycée agricole de La Saussaye, en Eure-et-Loir (28), où il n'y a pas d'irrigation
- Région agricole : Beauce Chartraine où la rotation Colza/Blé tendre/Escourgeon est fréquente
- Enjeux du territoire : protection de la nappe de Beauce, la ressource en eau souterraine.

Sol

- Limons argileux profonds à moyennement profonds (80cm) sur calcaire de Beauce
- Réserve utile de 150-200mm, pas de caillou
- pH : 6,9 ; MO : 2.2%

Climat

- Océanique dégradé, pluviométrie faible (600mm) répartie sur l'année
- C'est l'année 2012-13 qui a été choisie pour réaliser les simulations de pertes d'azote. Il s'agit d'une situation climatique à fort risque de lessivage relatif pour la région, ce qui aboutit à une lame drainante de 136 mm d'eau/an, compte tenu de la forte réserve en eau du sol.

Système de culture

Le système de culture de La Saussaye correspond à une rotation de 5 ans conduite en agriculture conventionnelle. Il comprend 4 cultures annuelles fertilisées uniquement avec de l'engrais azoté de synthèse (ammonitrate 33%), plus une légumineuse, le pois de printemps. Dans le dispositif expérimental de la Saussaye, il s'agit en fait de féverole, qui a été remplacée par du pois de printemps dans la simulation par Syst'N.

- Une rotation colza-blé tendre-orge-pois-blé dur (figure 5)
- La parcelle est couverte chaque automne systématiquement : soit par la culture du colza, soit par une culture intermédiaire (repousses de colza maintenues jusqu'au 1^{er} septembre ou culture intermédiaire semée spécifiquement). Après le pois, on sème une moutarde à partir du 25 juillet. Les autres cultures intermédiaires sont semées après le 20/08 et détruites par un labour fin novembre/début décembre
- Les résidus des cultures sont enfouis

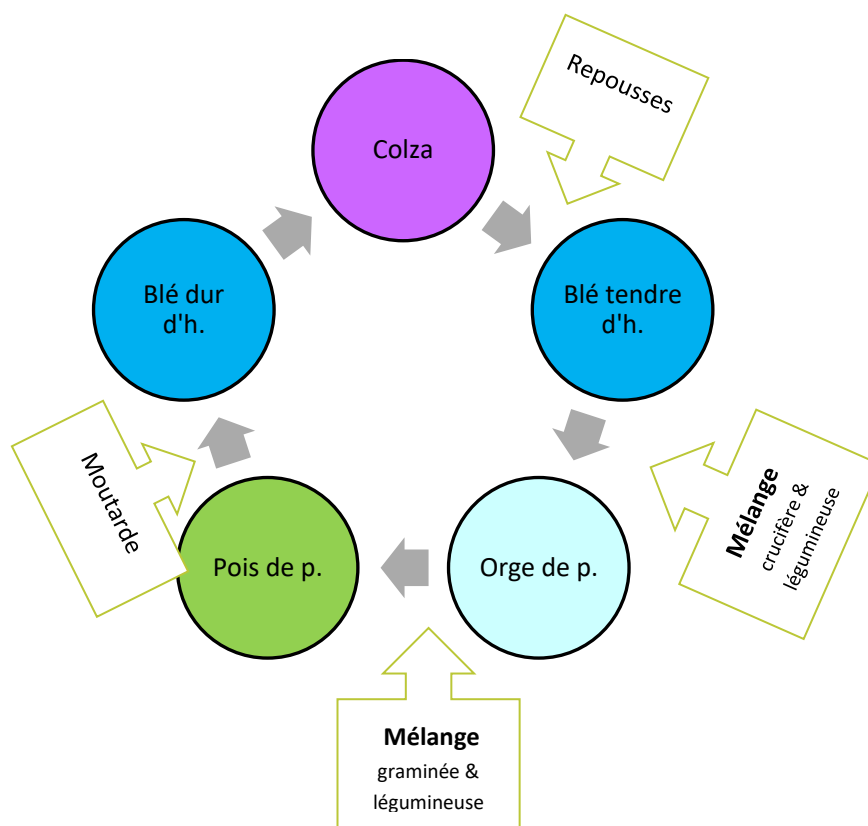


Figure 5 - Rotation du système raisonné amélioré de La Saussaye

Tableau 3 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Colza d'hiver	1 ^{er} septembre	Mi-juillet	Ammonitrate 33,5 50kg N le 15/02 80kg N le 15/03 50kg N le 25/03	0	
Blé tendre d'hiver	10 octobre	Mi-juillet	Ammonitrate 33,5 45kg N le 05/03 80kg N le 25/03 45kg N le 30/04	0	Destruction du couvert avant semis par un labour
Orge de printemps	10 mars	Mi-juillet	Ammonitrate 33,5 90kg N le 5/04	0	Destruction du couvert avant semis par un labour
Pois protéagineux de printemps	15 mars	Fin juillet	0	0	Destruction du couvert avant semis par un labour
Blé dur d'hiver	1 ^{er} novembre	Mi-juillet	Ammonitrate 33,5 40kg N le 01/03 80kg N le 20/03 40kg N le 05/05 40kg N le 25/05	0	Destruction du couvert avant semis par un labour

Tableau 4 - Rendements des cultures et conduite des cultures intermédiaires

Culture	Rendement (q/ha)	Culture intermédiaire (CI) après la culture	Date de semis de la CI	Date de destruction de la CI	Biomasse ou rendement de la CI
Colza d'hiver	39	Repousses de colza	15 juillet	5 septembre	
Blé tendre d'hiver	93	Mélange crucifères & légumineuses	20 août	10 décembre	

Orge de printemps	75	Mélange graminées légumineuses	20 août	10 décembre	
Pois de printemps	48	Moutarde	25 juillet	10 septembre	
Blé dur d'hiver	74	-	-	-	

Performance azotée de volatilisation

La volatilisation de ce système de culture est de 6 kg N/ha/an, soit presque 5% des apports d'engrais azotés.

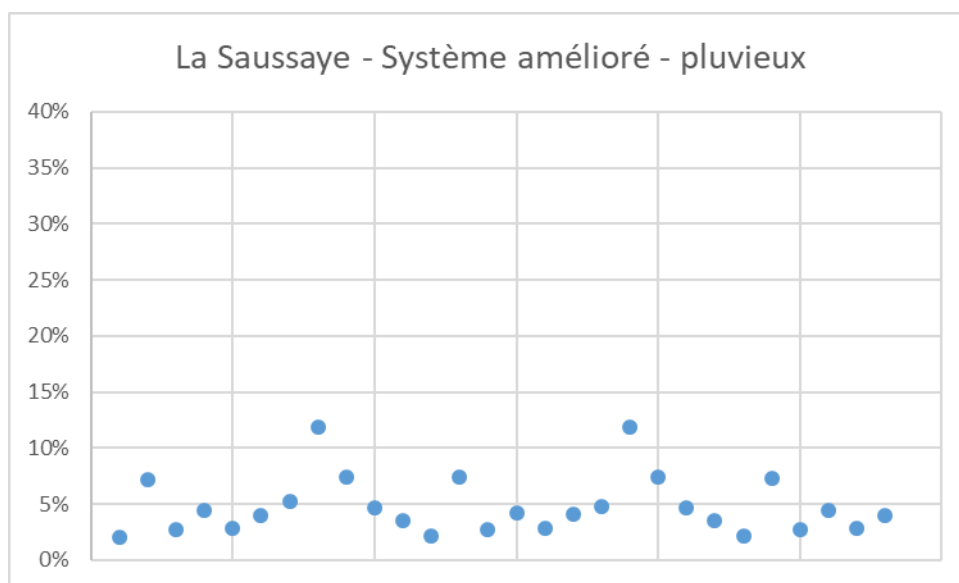


Figure 6 – Volatilisation de l'ammoniac en pourcentage de chaque apport, estimée avec Syst'N pour le système de culture raisonné « amélioré » et le climat pluvieux c'est à dire à fort potentiel de lessivage. Apport d'ammonitrates en bleu.

La volatilisation d'ammoniac varie entre 2 et 12% suivant l'apport. Elle est particulièrement élevée (autour de 10%) après l'apport d'ammonitrates de mars sur le colza, et ceux de fin mars et début avril sur le blé dur. Tout se passe comme si le scénario climatique qui a été choisi était très favorable à la volatilisation en mars et début avril, mais moins favorable aux autres périodes d'applications de l'engrais de synthèse.

La forme d'azote semble déterminante pour la performance de volatilisation à la Saussaye. En effet, on a évalué un système dit « initial », où la fertilisation de synthèse au printemps est réalisée pour la plupart des apports sous forme de solution azotée (390). La figure ci-dessous montre clairement l'effet de la forme d'azote dans la performance de volatilisation : les apports de solution azotée enregistrent des pertes simulées allant de 6 à 18%, tandis que la volatilisation de l'ammonitrates reste au-dessous de 5%, à l'exception de l'apport de mars pour le colza qui est encore plus élevé que dans la version améliorée de la Saussaye. Et au final, ce système « initial » volatilise 12 kg N/ha/an soit 9% des apports.

En pratique les apports d'azote sont toujours positionnés avant une pluie pour un coefficient apparent d'utilisation optimum en évitant les risques de volatilisation. Dans la simulation, nous avons modélisé les pratiques sur une météo standard, ce qui peut accentuer la volatilisation simulée sous Syst'N pour ce système de culture.

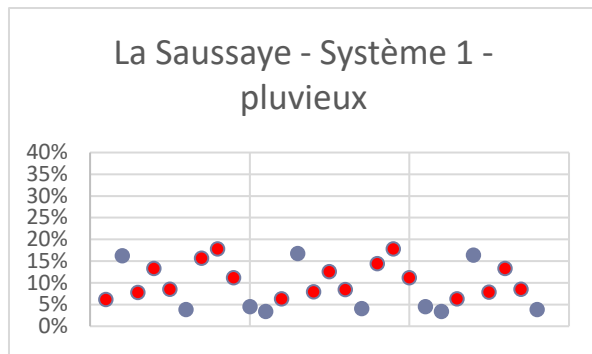


Figure 7 – Volatilisation de l’ammoniac en pourcentage de chaque apport, estimée avec Syst’N pour le système de culture raisonné « initial » et le climat pluvieux c’est-à-dire à fort potentiel de lessivage. Apport de solution 390 en rouge, apport d’ammonitrates en bleu.

Performance azotée de lixiviation

La période de lessivage dans le contexte local a lieu de novembre à février.

A l'entrée de l'hiver, les reliquats d'azote minéral sont faibles : ils varient entre 20 et 36 unités, pour une moyenne de 32 unités. L'azote absorbé par le jeune colza ou les cultures intermédiaires est également faible : 7 unités dans les repousses de colza, jusqu'à 19 unités.

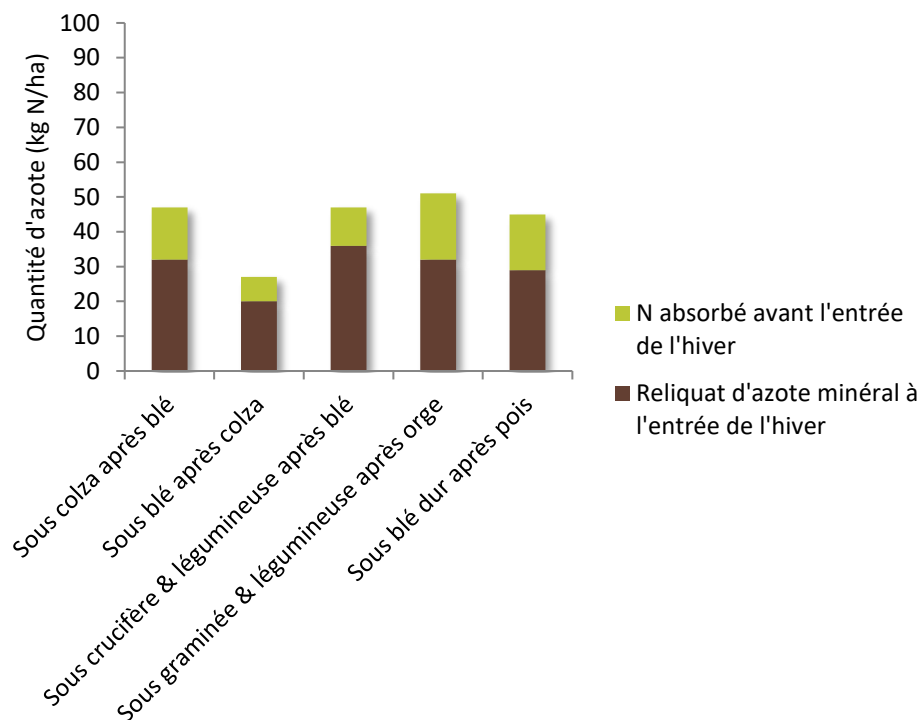


Figure 8 - Répartition de l'azote en jeu dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour chaque succession de cultures

L'addition de l'azote absorbé par la culture intermédiaire à l'azote minéral contenu dans le sol à la même date au début de l'automne, permet d'estimer l'azote disponible en été et automne dans le sol. Ici il varie de 27 à 51 kg N/ha selon l'année de la rotation, ce qui donne une moyenne de 46 kg N/ha (figure 8). Il est similaire pour 4 années sur 5 ; seul l'après colza fait exception dans ces simulations, avec moins de 30 unités d'azote en jeu. Ces niveaux révèlent un sol pauvre en azote disponible chaque année à cette période.

Ainsi, en moyenne, grâce à la couverture systématique de l'interculture, seulement 32 Kg N/ha/an se retrouve sous forme minérale. Et grâce à la faible lame drainante, seulement l'équivalent d'un tiers de ce reliquat est entraîné par lixiviation, avec des pertes de nitrate moyennes de 12 kg N/ha/an.

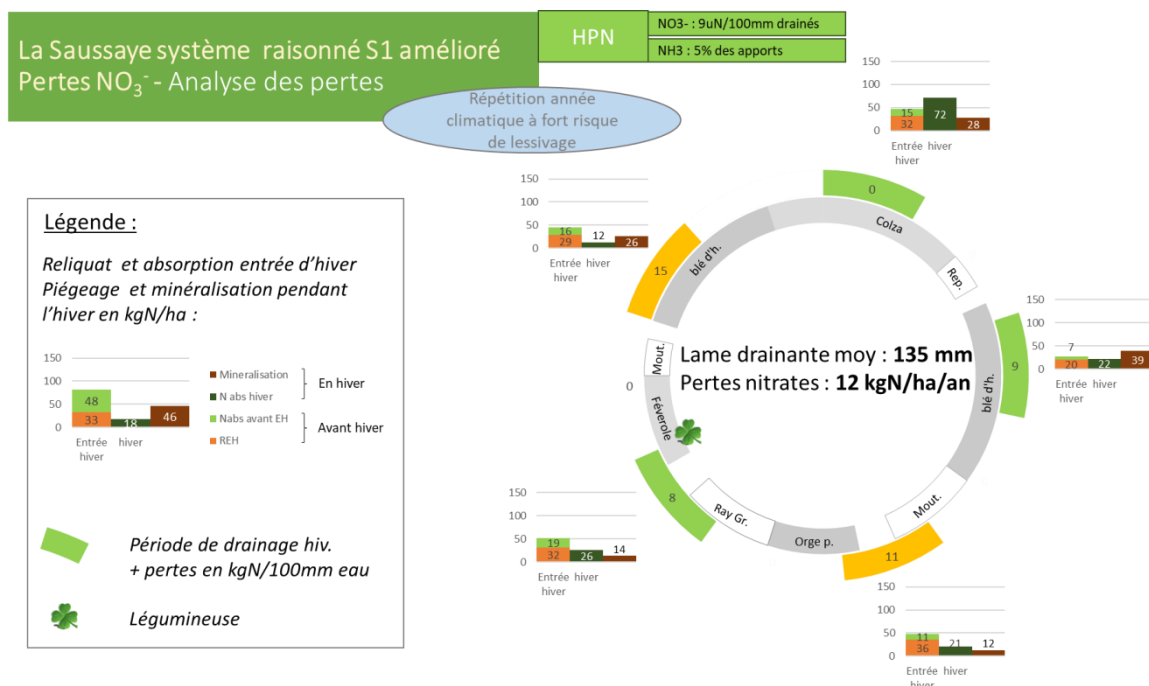


Figure 9 - Dynamique de l'azote au cours de la rotation des cultures du système raisonné amélioré de La Saussaye

Les points clés de cette performance nitrate

Ainsi cette grande performance azotée s'explique par trois phénomènes principaux : un sol peu riche en matière organique donc une minéralisation de l'humus peu active (91 kg N/ha/an), une fertilisation azotée équilibrée appliquée uniquement au printemps (4 ans/5), et enfin une couverture systématique du sol en fin d'été et automne qui absorbe moins d'une vingtaine d'unités d'azote, ce qui est suffisant pour laisser en moyenne une trentaine d'unités d'azote dans le sol. Ce qui permet d'aboutir à de faibles pertes compte tenu de la lame d'eau drainante qui est modérée.

L'intégration de cultures intermédiaires quasi systématique permet d'obtenir un faible reliquat d'azote minéral en automne, et de faire basculer les pertes de nitrates sous la barre des 10 kg N/100mm.

Ce système raisonné amélioré reste à éprouver sur le terrain, car la simulation fait abstraction des difficultés de semis précoces et de sécheresses importantes limitant la pousse des couverts en été. Ce système modélisé nous permet d'évaluer la marge de progrès possible du système raisonné vers un système plus performant.

Dans la version initiale du système en effet, des quantités relativement importantes restent dans le sol en entrée d'hiver sauf sous colza. Ce risque est accru pour les deux intercultures courtes légumineuse-blé d'hiver et colza-blé d'hiver du fait de restitutions un peu plus importantes et d'un faible piégeage par le blé. La version améliorée du système a permis de réduire le REH malgré une quantité d'azote en jeu équivalente du fait de l'implantation d'un couvert et de repousses sur ces successions à risque (une moutarde après féverole et des repousses après colza). Les pertes relatives de ce système sont faibles et atteignent le seuil de grande performance azotée même sous ce climat à fort lessivage, pour la version améliorée.

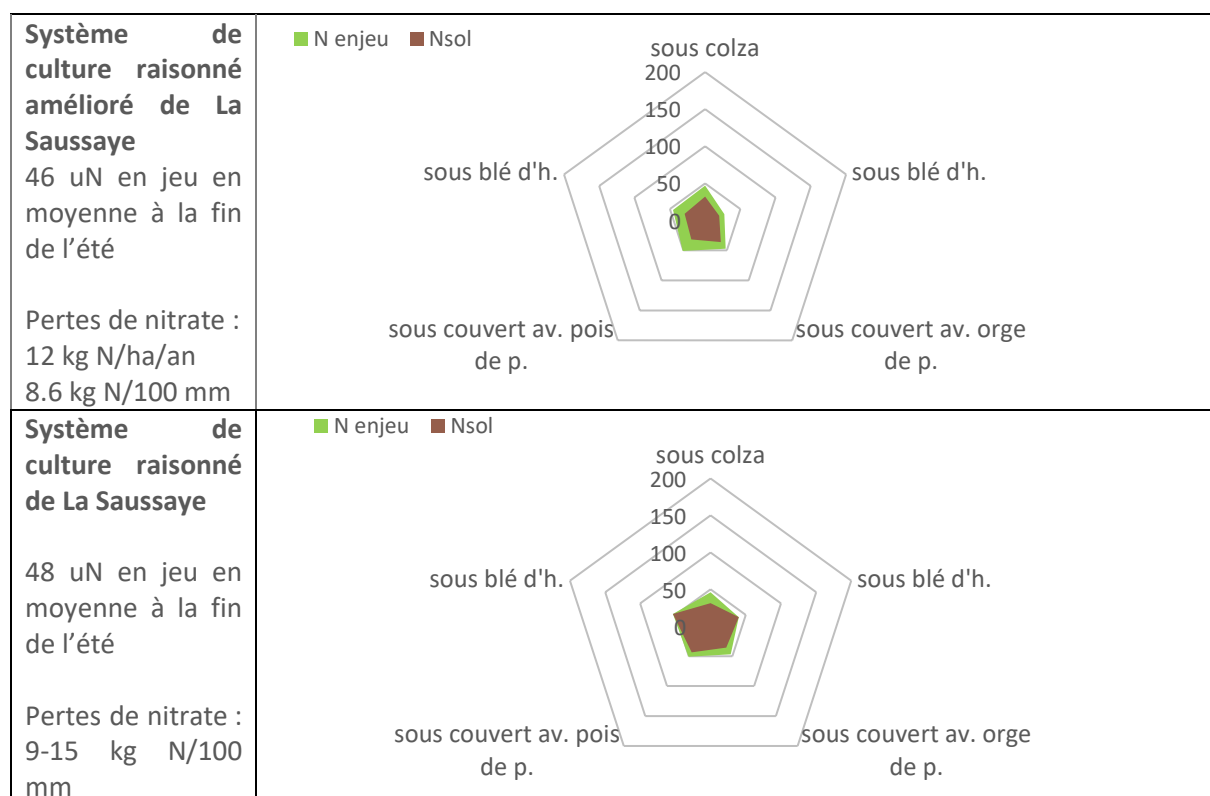


Figure 10 - Comparaison des deux systèmes raisonnés de la Saussaye pour l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal à l'entrée de l'hiver au cours de la rotation

Analyse par succession de cultures

Succession blé dur d'hiver – colza

Sous colza, le niveau d'azote en jeu est faible avec 47 kg N/ha. La fertilisation azotée printanière du précédent blé est équilibrée et laisse un faible reliquat à la récolte dans un sol qui minéralise peu. Il y a peu d'azote disponible dans le sol en été et automne. Le colza est semé dès septembre et absorbe une partie de l'azote disponible du sol (15 kg N/ha) avant la période de drainage. Le reliquat avant l'entrée dans l'hiver descend à 32 kg N/ha (figure 25). La lame drainante entraîne peu de nitrate sous colza, grâce à un reliquat très faible dû à une forte capacité d'absorption de l'azote par le colza qui croît rapidement en fin d'été. Ainsi, les pertes de nitrate de cette succession sont nulles.

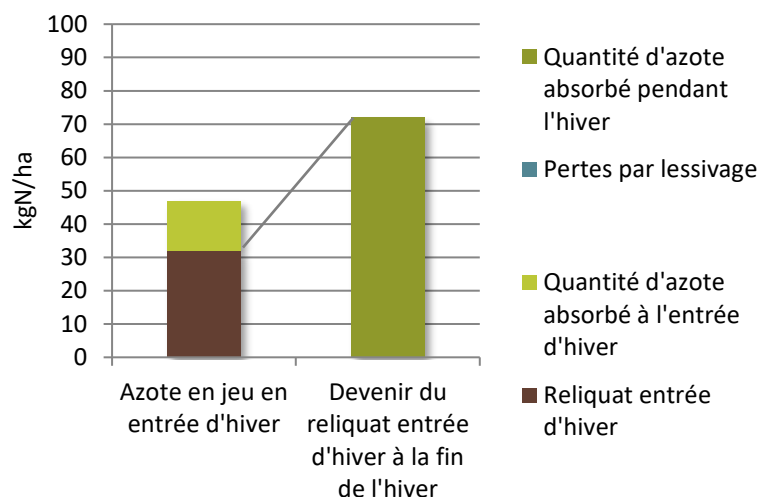


Figure 11 - Répartition de l'azote présent dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour cette succession de 2 cultures

Succession Colza-Repousses de colza-Blé tendre d'hiver

En début d'hiver, sous un blé avec un précédent colza, la quantité d'azote en jeu est très faible avec 27 kg N/ha. Le colza est une culture très riche en azote, dont la fertilisation au printemps est adaptée aux besoins de la culture. Le reliquat est très faible car le sol est pauvre en azote, d'autant plus après les prélèvements du colza et de ses repousses. Le reliquat en entrée d'hiver est de 20 kg N/ha, le blé absorbant 7 kg N/ha avant le drainage (figure 26). Les capacités d'absorption de la céréale sont limitées par la faible disponibilité d'azote dans le sol. Pendant l'hiver le blé capte néanmoins 22 kg N/ha, ce qui permet d'atteindre un très faible niveau de pertes de nitrate (9 kg N/ha).

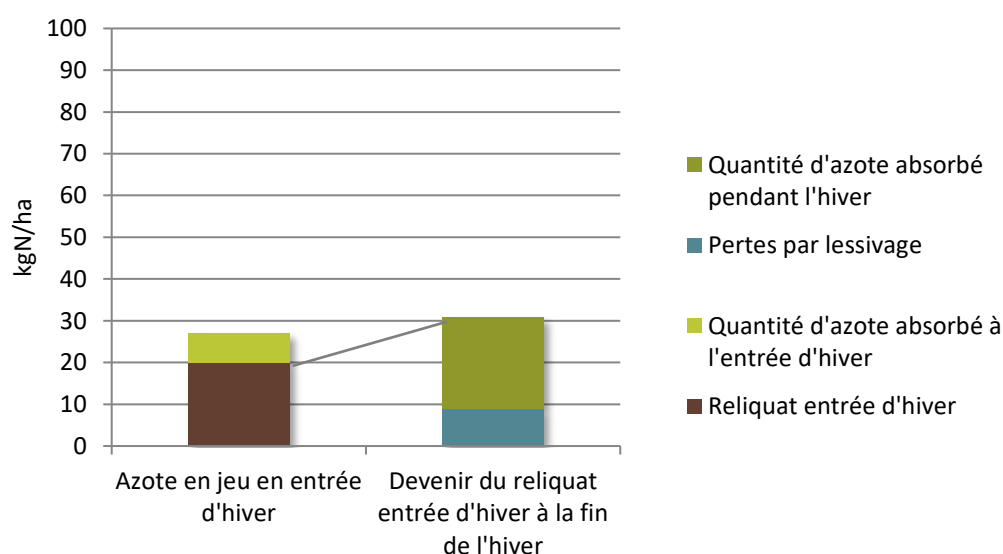


Figure 12 - Répartition de l'azote présent dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour cette succession de 2 cultures

Succession Blé-Mélange crucifères légumineuses

En début d'hiver sous couvert de moutarde après un blé tendre, la quantité d'azote présente dans le système est faible avec 47 kg N/ha car le sol fournit peu d'azote et la fertilisation printanière du blé est bien adaptée aux besoins de la culture. Dès la fin de l'été le couvert absorbe une partie de l'azote disponible (11 kg N/ha avant la période de drainage).

Le reliquat azoté du sol en entrée d'hiver est faible avec seulement 36 kg N/ha (figure 27). Le couvert continue à prélever de faibles quantités d'azote durant l'hiver, son développement est limité car les ressources sont faibles. Toutefois le couvert absorbe 21 kg N/ha. La lame d'eau drainante entraîne 11 kg N/ha au cours de l'hiver.

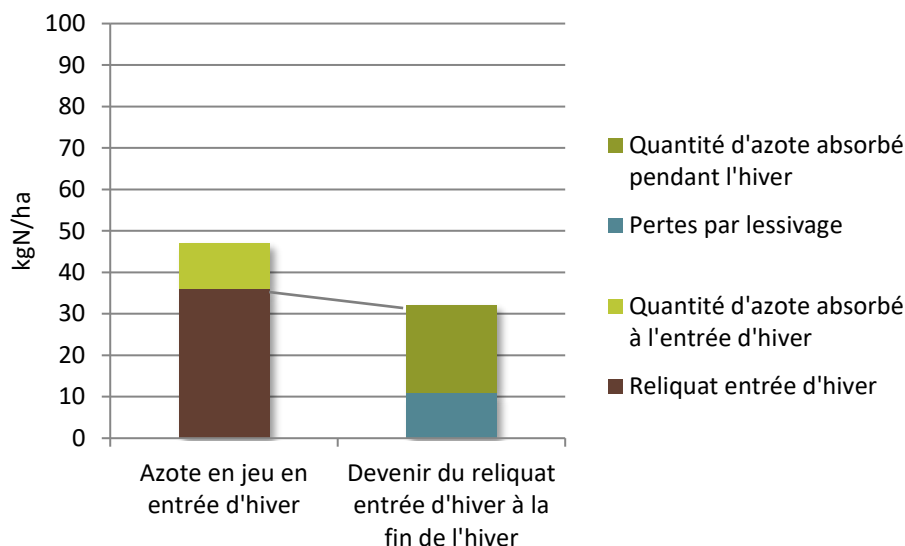


Figure 13 - Répartition de l'azote présent dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour cette succession de 2 cultures

Succession Orge-Mélange graminées légumineuses

En fin d'été, 51 kg N/ha sont disponibles. Aucun apport de matière fertilisante n'est réalisé en été, et la fertilisation de l'orge au printemps est équilibrée. Le stock d'azote du sol est donc faible. Le couvert implanté dès l'été pour couvrir le sol avant la culture de printemps suivante prélève de l'azote à hauteur de 19 kg N/ha, réduisant le stock d'azote minéral du sol à 32 kg N/ha en début de période de drainage (figure 28). Durant l'hiver, le couvert absorbe 26 kg N/ha supplémentaires. Il reste donc très peu d'azote disponible dans le sol, et peu de risques de pertes par lessivage. Seulement 8 kg N/ha sont perdus sous forme de nitrate.

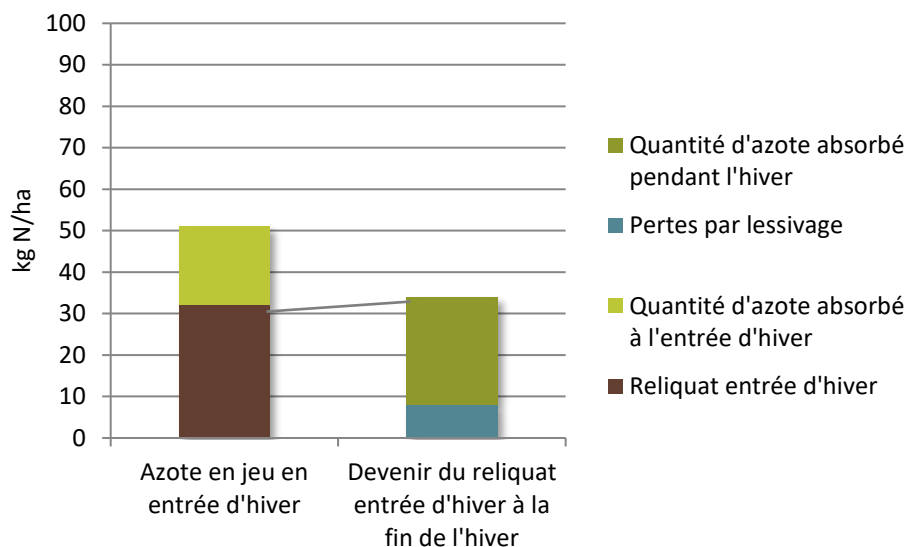


Figure 14 - Répartition de l'azote présent dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour cette succession de 2 cultures

Succession Pois protéagineux-Moutarde-Blé dur d'hiver

En entrée d'hiver sous blé dur la quantité d'azote en jeu est faible avec 45 kg N/ha. Avant la période de drainage, 16kg N/ha sont prélevés par le blé, le reliquat azoté est alors très faible avec 29kg N/ha (figure 29). Les pertes de nitrate se limitent à 15 unités.

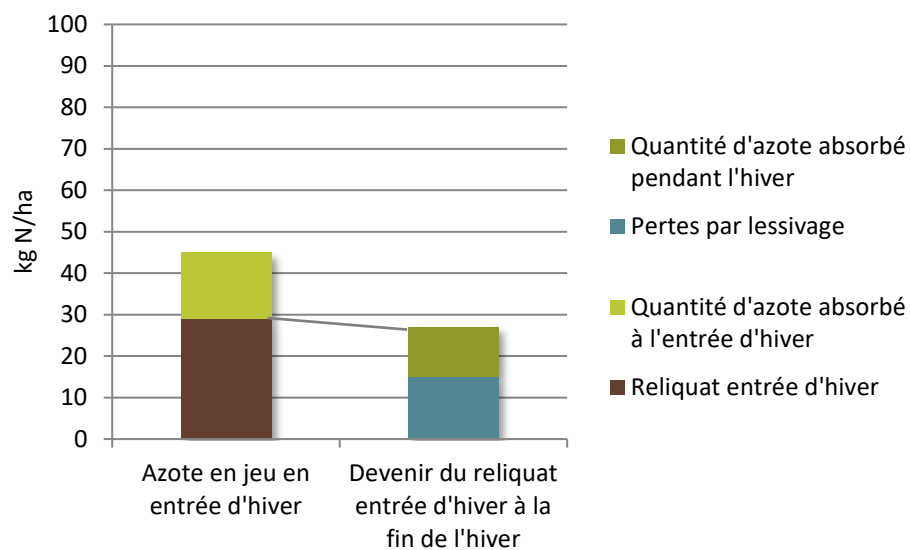


Figure 15 - Répartition de l'azote présent dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour cette succession de 2 cultures

ii. Système légumier de plein champ « Basses fuites d'azote » (Finistère)

Contexte local

- Exploitation agricole à Plougourvest (Finistère) spécialisée en production légumière
- Région agricole : forte concentration d'élevages en Bretagne et exploitations agricoles spécialisées en productions légumières.
- Enjeux du territoire : protection de la ressource en eau dans les bassins versants côtiers vis à vis du nitrate et des produits phytosanitaires.

Sol

- Limons éoliens profonds
- Réserve utile de 149 mm
- pH : 7,2 ; MO : 2,7%

Climat

- Climat océanique doux et humide ; pluviométrie annuelle de 874 mm
- Drainage d'octobre à mars ; forte lame drainante de 412 mm en moyenne
- Simulation en boucle sur une série de 21 années climatiques (1996-2016) de la station expérimentale du CATE à Saint-Pol-de-Léon à proximité de la parcelle testée.

Système de culture

Le système correspond à une succession de deux choux-fleurs. Dans les faits, la monoculture est une situation rare, mais le délai de retour du chou-fleur peut être très court sur les parcelles bretonnes en production légumière.

La succession se compose d'un chou-fleur hâtif puis d'un chou-fleur tardif et d'une association avoine-féverole pendant l'interculture allant de janvier à juin. La fertilisation est ici limitée à un apport d'engrais minéral au chou-fleur hâtif en novembre. Les cultures ne sont pas irriguées.

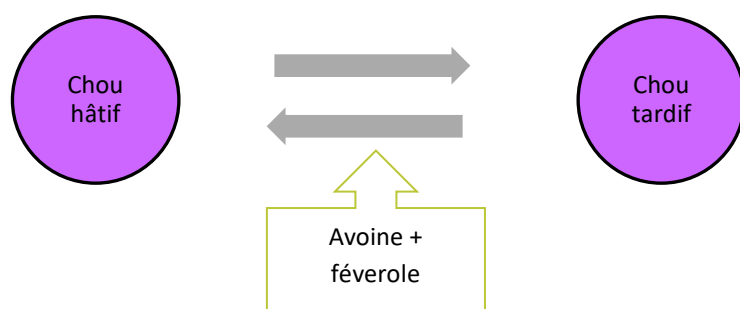


Figure 16 - Rotation du système « basses fuites d'azote » du Finistère

Tableau 6 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Chou-fleur hâtif	Début juillet	A partir de la mi-janvier	41 kg (sulfonitrate d'ammoniaque 26%N) fin novembre	0	Avant plantation : déchaumage, labour puis préparation superficielle, 3 binages à 10 jours d'intervalle à partir de la fin juillet. Buttage définitif à la mi-novembre. Destruction des résidus de culture (outil rotatif à axe horizontal) à la mi-février.
Chou-fleur tardif	Début août	A partir de début avril	0	0	Avant plantation, après déchaumage du couvert : labour puis préparation superficielle, 3 binages à 10 jours d'intervalle à partir du 20 août. Buttage définitif mi-novembre.

Tableau 7 - Rendements des cultures et conduite des cultures intermédiaires

Culture	Rendement	Culture intermédiaire après la culture (CI)	Date de semis de la CI	Date de destruction de la CI	Biomasse ou rendement de la CI
Chou-fleur hâtif	8000 /ha	Mélange avoine-féverole	janvier	5 juin	
Chou-fleur tardif	8000 /ha	-			

Le système légumier a une haute performance azotée. En effet, il est hautement performant pour le nitrate et pour l'ammoniac. Les pertes moyennes de la rotation sont de 39kg N/ha/an pour le nitrate soit 9,5kg N/100mm drainés et de 1 kg N/ha/an pour l'ammoniac, soit 5% des apports réalisés.

Performance de volatilisation de l'ammoniac

Les pertes d'azote par volatilisation se limitent à 1kg/ha/an, soit 5% des apports

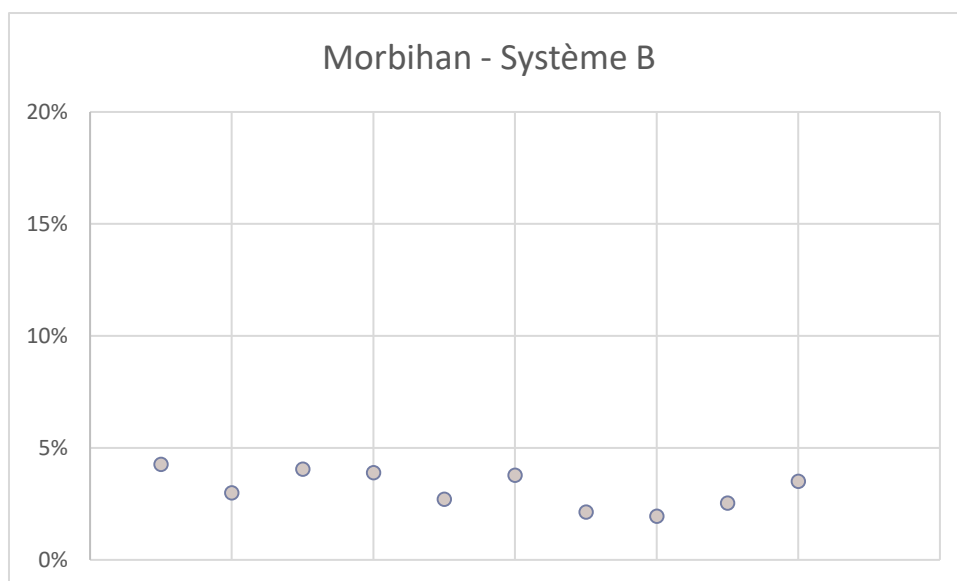


Figure 17 – Volatilisation de l'ammoniac en pourcentage de chaque apport, estimée avec Syst'N pour le système de culture « basses fuites d'azote » du Finistère. Apport de sulfate d'ammoniac 1 an sur 2 en gris.

La volatilisation d'ammoniac issue du sulfate d'ammoniac appliqué une fois tous les deux ans, varie entre 2 et 4% de l'apport.

Dynamique des pertes de nitrate au cours de la succession

A l'entrée de l'hiver, les reliquats d'azote minéral sont faibles : ils sont de 22 et 32 unités, pour une moyenne de 27 unités. L'azote absorbé par les choux fleurs semés en été est très important : 220 unités pour le chou-fleur hâtif, et 167 pour le chou-fleur tardif.

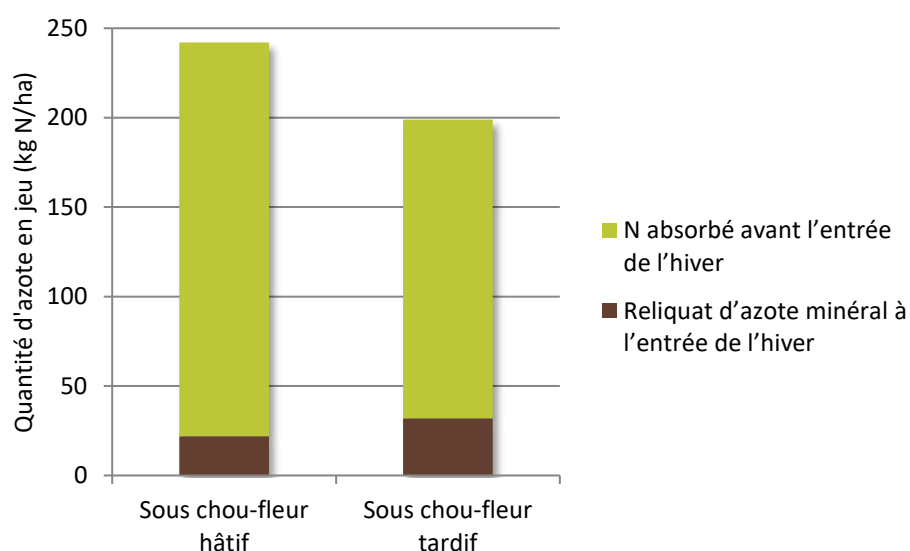


Figure 18 - Répartition de l'azote présent dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour cette succession de 2 cultures

A l'entrée d'hiver, les quantités d'azote en jeu sont très élevées pour les deux cultures de choux avec 199 et 242 kg N/ha en jeu. Cela s'explique d'abord par une forte minéralisation de l'azote organique

du sol (315 kg N/ha en moyenne annuelle ; 179 provenant de l'humus du sol, 136 provenant des résidus des choux fleurs et de la culture intermédiaire), auquel on rajoute une fertilisation de 41 unités d'azote en novembre.

Semés très tôt en été (juillet et août), les choux fleurs absorbent une grande partie de l'azote disponible dans le sol en été-automne, ne laissant qu'un faible reliquat azoté en entrée d'hiver de 22 et 32kg N/ha.

Cependant 39 kg N/ha/an sont perdus sous forme de nitrate ; ils proviennent non seulement des reliquats ci-dessus, de la fertilisation azotée qui est réalisée après l'entrée de l'hiver en novembre, comme de la minéralisation hivernale estimée à 95 et 129 unités. Ce qui donne finalement 9,5 kg N/100mm de pertes, ce qui est performant pour le nitrate.

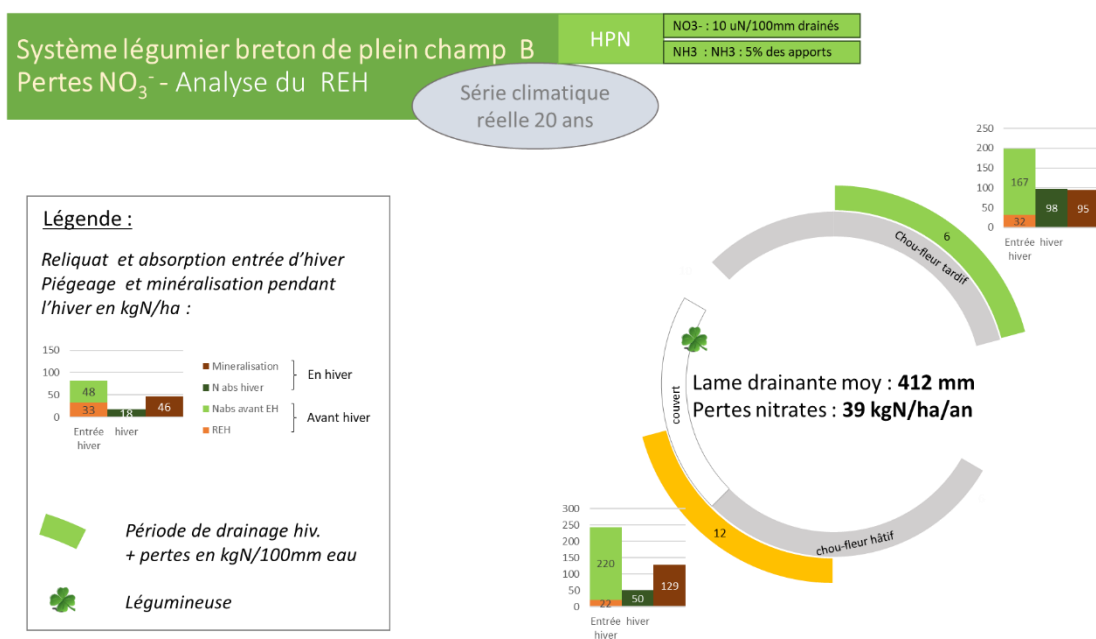


Figure 19 - Dynamique de l'azote au cours de la rotation du système légumier « basses fuites d'azote » du Finistère

Les points clés de cette performance nitrate

Cette performance azotée est liée avant tout à une très forte absorption des cultures de chou-fleur en été et automne, qui permet de compenser la très grande quantité d'azote disponible en été et automne issu de la minéralisation de la matière organique stable du sol et des résidus de récolte des choux fleurs comme de la culture intermédiaire enfouie. Le rôle du couvert d'interculture qui est semé en janvier est faible. Le reliquat à l'entrée de l'hiver obtenu est faible (27 unités), cela conduit à des pertes de 39 unités, plus élevées que ce reliquat, différence à mettre en lien avec la minéralisation hivernale, dans ce sol riche en matière organique et sous ce climat doux.

Ce système de culture a été imaginé suite à la simulation d'un premier système de culture proche des pratiques agricoles habituelles pour cultiver le chou-fleur. Pour atteindre cette performance azotée du point du nitrate, il a fallu réduire l'azote disponible en été et automne de 60 unités en arrêtant les apports d'engrais organiques et un apport d'engrais de synthèse.

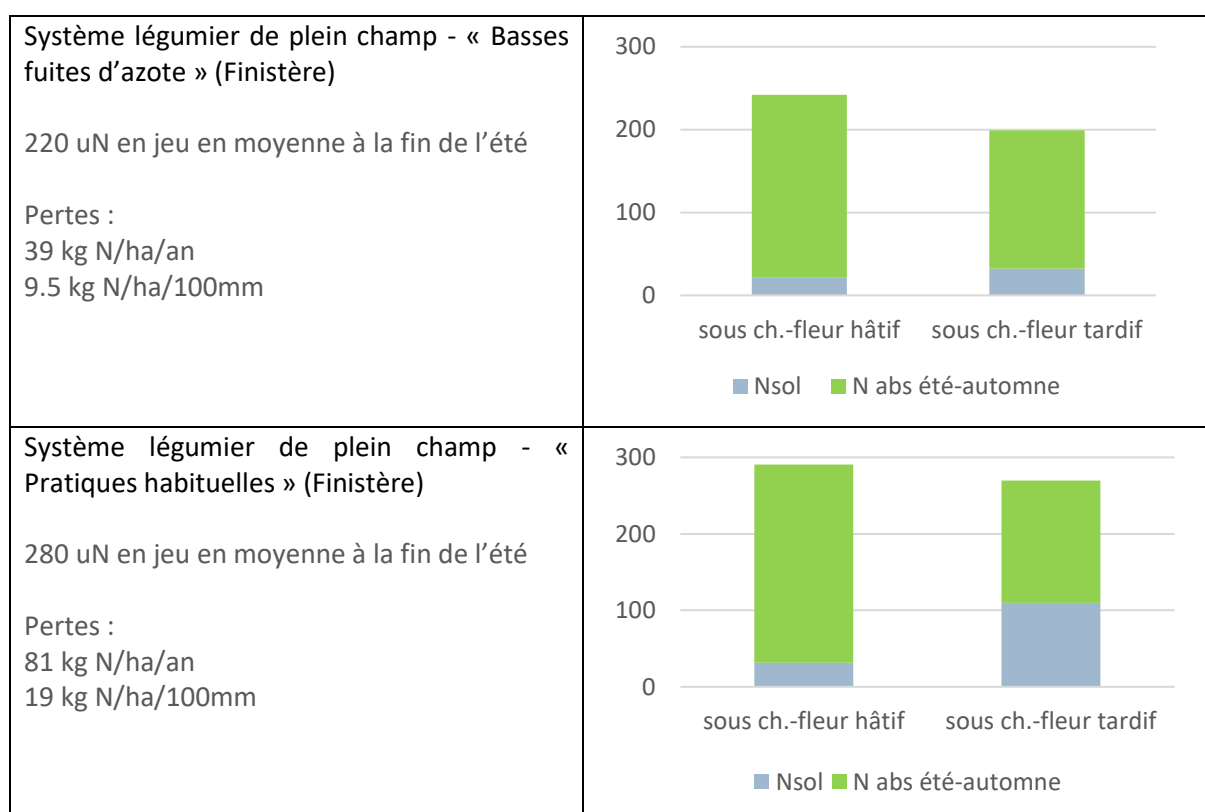


Figure 20 : Azote en jeu à la fin de l'été pour chaque succession

Analyse par succession de cultures

Entre le chou-fleur tardif et le chou-fleur hâtif, le sol est nu pendant quelques mois. Les résidus de chou restituent 354kg N/ha, et la minéralisation est forte. Le chou-fleur hâtif semé en juillet utilise une grande partie de l'azote minéral du sol dès l'été et en automne. A l'entrée d'hiver, la culture a absorbé 220kg N/ha. Ainsi, malgré une quantité d'azote en jeu très élevée (242 kg N/ha) en début de période de drainage le reliquat azoté est très faible. Le chou-fleur absorbe 50 /ha supplémentaires durant l'hiver. Les pertes de nitrate sont doublées par rapport à la même période sous chou-fleur tardif, car ce chou-fleur est récolté plus précocement, laissant quelques semaines entre la récolte et la levée du couvert d'avoine-féverole.

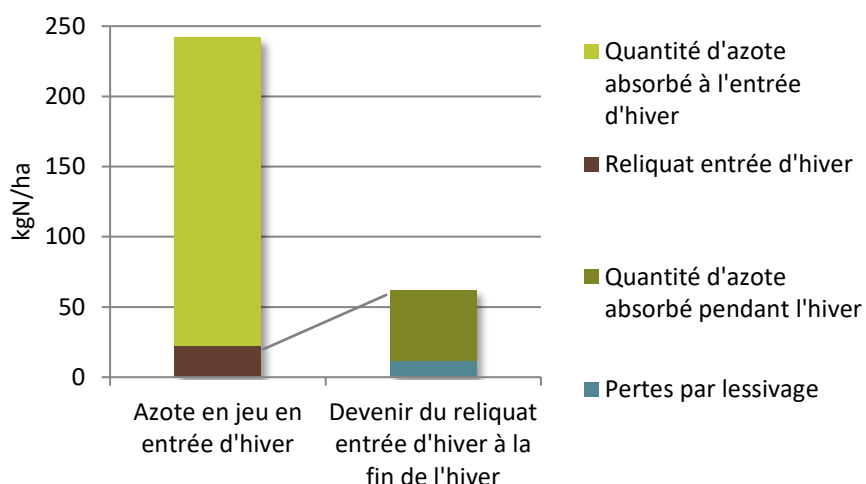


Figure 21 - Répartition de l'azote présent dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour cette succession de 2 cultures

Le chou-fleur tardif est semé après une interculture où le sol est couvert par un mélange d'avoine et féverole. Les résidus de la culture de chou-fleur et du couvert précédents, ainsi que la minéralisation conséquente fournissent une quantité élevée d'azote minéral dans le sol. La quantité d'azote en jeu à l'entrée d'hiver est élevée, mais le reliquat azoté est faible (32 kg N/ha) car le chou-fleur tardif se développe dès l'été et capte ainsi 167kg N/ha avant l'entrée d'hiver. Par la suite il absorbe 97kg N/ha supplémentaire pendant l'hiver. Les pertes de nitrate sont alors très faibles (6kg N/ha/100mm drainés).

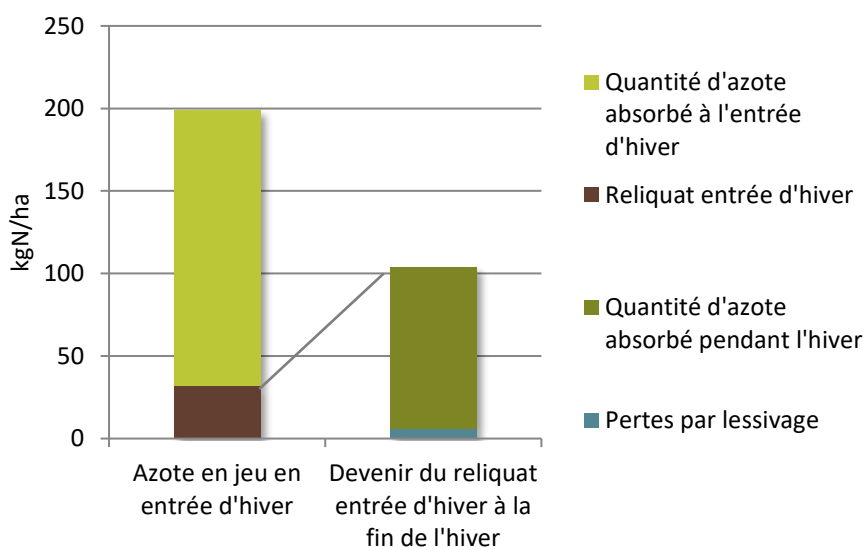


Figure 22 - Répartition de l'azote présent dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour cette succession de 2 cultures

e) Description et analyse du système performant du point de vue du nitrate mais pas du point de vue de l'ammoniac

Un seul système s'avère performant en nitrate, sans l'être en volatilisation de l'ammoniac, en Champagne Crayeuse.

i. Système de culture de Champagne crayeuse de « référence »

Le système du dispositif SYPRE en Champagne crayeuse est performant en terme de pertes de nitrate pour le système à « rotation courte » : elles sont de 9.5 kg N/100mm drainé, soit une perte totale de 10 kg N/ha/an, mais 12 % des apports d'azote (18 kg N/ha/an) se volatilisent,

Contexte local

- Expérimentation inter-instituts techniques de SYPRE, à Béthény (51)
- Région agricole : Champagne crayeuse
- Enjeux du territoire : autonomie en azote, qualité de l'eau

Sol

- Terres de craie, texture limoneuse en surface
- Réserve utile de 150 mm ; 110 cm d'épaisseur de sol ; pas de caillou
- pH : 8.7 ; MO : 3,3%

Climat

- Continental, pluviométrie faible (600 mm) répartie sur l'année
- Ce sont des séries climatiques glissées qui ont été choisies pour les simulations de pertes d'azote. On a une lame drainante moyenne de 104 mm d'eau/an, compte tenu de la forte réserve en eau du sol.

Système de culture de « rotation courte »

Le système de culture correspond à une rotation de 5 ans conduite en agriculture conventionnelle. Il comprend 5 cultures annuelles fertilisées uniquement avec de l'engrais azoté de synthèse (ammonitrate 33.5% sauf le premier apport du colza qui est réalisé avec une solution azotée).

- Une rotation colza-blé tendre-orge de printemps- betterave sucrière-blé tendre sans irrigation (figure 22)
- La parcelle est couverte 3 années sur 5 en automne : par la culture du colza, et par une culture intermédiaire en interculture longue avant les deux cultures de printemps (moutarde avant la betterave ou mélange vesce-moutarde avant l'orge de printemps).
- Les résidus des cultures sont enfouis

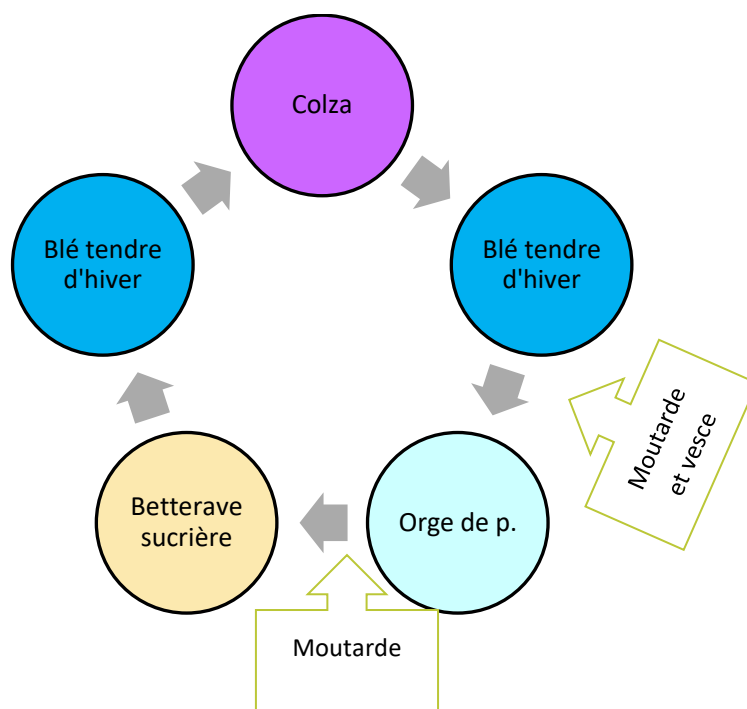


Figure 23 - Rotation du système de référence « rotation courte » de Champagne

Tableau 8 - Conduite des cultures (parcelle 202)

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Colza d'hiver	Début septembre	Fin juin	Solution azotée 60 kg N le 5/03 Ammonitrate 33,5 120 kg N le 30/03	0	Deux déchaumages (fin juillet/début août) puis labour avant le semis
Blé tendre d'hiver	mi-octobre	mi-juillet	Ammonitrate 33,5 50 kg N le 24/02 105 kg N le 26/03 60 kg N le 24/05	0	Août/Septembre/Octobre : déchaumages avant semis
Orge de printemps	Fin mars	mi-juillet	Ammonitrate 33,5 40 kg N le 3/03 50 kg N le 14/04	0	Fin février labour, déchaumage puis semis combiné fin mars
Betterave sucrière	Fin mars	mi-octobre	Ammonitrate 33,5 95 kg N le 1/04	0	Labour avant le semis (fin février)
Blé tendre d'hiver	Début novembre	mi-juillet	Ammonitrate 33,5 100 kg N le 25/03 60 kg N le 21/05	0	Déchaumages avant le semis (mi-octobre/novembre)

Tableau 9 - Rendements des cultures et conduite des cultures intermédiaires

Culture	Rendement (q/ha)	Culture intermédiaire (CI) après la culture	Date de semis de la CI	Date de destruction de la CI	Biomasse ou rendement de la CI
Colza d'hiver	30-40	-	-	-	
Blé tendre d'hiver	70-80	Moutarde et vesce	Début août	Mi-novembre	
Orge de printemps	70	Moutarde	Début sept.	Mi-novembre	
Betterave sucrière	800-1100	-	-	-	
Blé tendre d'hiver	70-80	-	-	-	

Dynamique des pertes de nitrate au cours de la rotation

La période de lessivage dans le contexte local du système a lieu de novembre à février.

A l'entrée de l'hiver, les reliquats d'azote minéral sont faibles (13 à 22 unités) 4 ans sur 5, sauf sous le blé qui suit le colza où ils s'élèvent à 58 unités. La moyenne est de 25 unités. L'azote absorbé par le jeune colza ou les cultures intermédiaires est relativement élevé : 34 unités par la moutarde, 49 unités pour le mélange moutarde-vesce comme pour le colza.

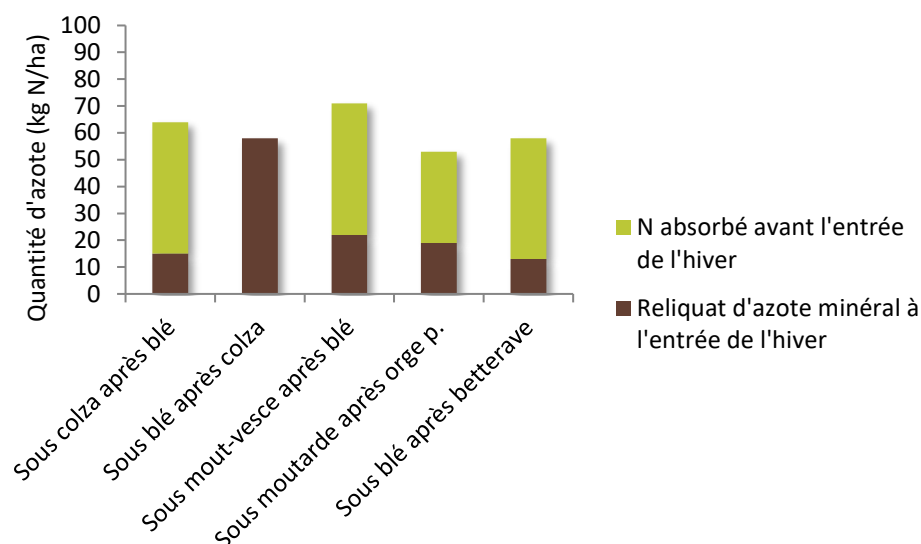


Figure 24 - Répartition de l'azote en jeu dans le champ cultivé à l'entrée de l'hiver entre l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal pour chaque succession de cultures

L'addition de l'azote absorbé (contenu dans la culture vivante) à l'azote minéral contenu dans le sol à la même date au début de l'automne, permet d'estimer l'azote disponible en été et automne dans le sol. Ici il varie de 53 à 71 kg N/ha selon l'année de la rotation, ce qui donne une moyenne de 61 kg N/ha (figure 24). Ces niveaux révèlent un sol moyennement pourvu en azote disponible en moyenne à cette période.

Ainsi, en moyenne, grâce à la couverture de l'interculture 3 années sur 5, seulement 25 Kg N/ha/an se retrouve sous forme minérale. Et grâce à la faible lame drainante moyenne (104 mm), seulement l'équivalent de moins d'une moitié de ce reliquat est entraîné par lixiviation, avec des pertes de nitrate moyennes de 10 kg N/ha/an.

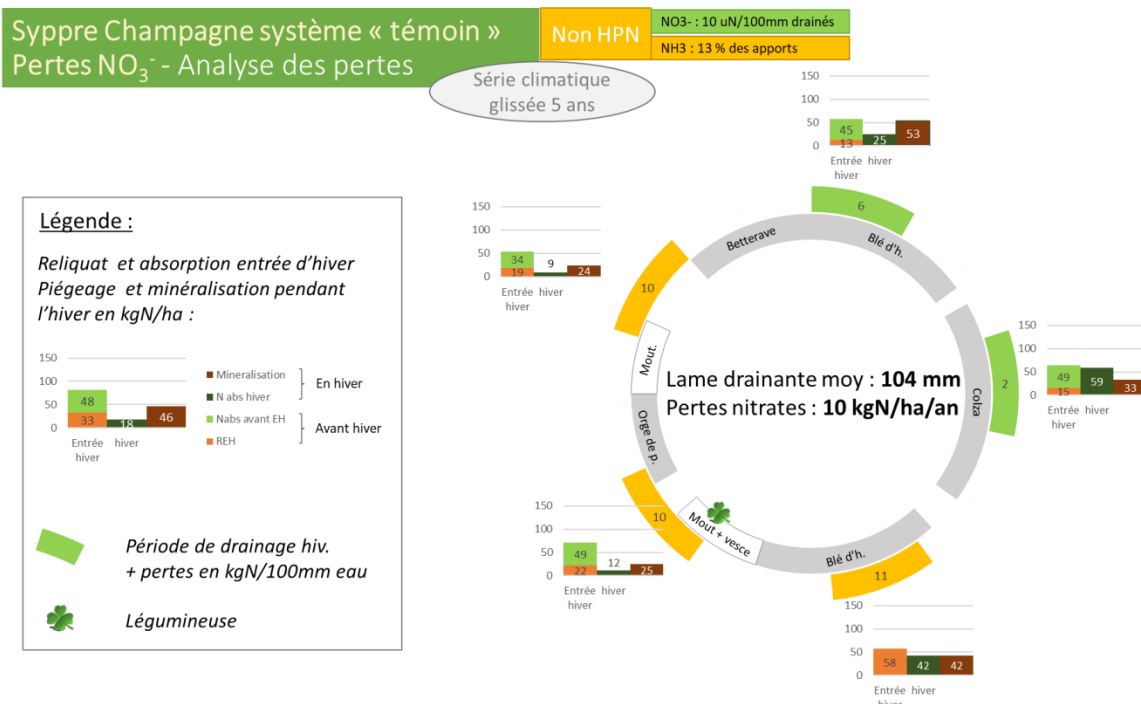


Figure 25 - Dynamique de l'azote au cours de la rotation des cultures du système témoin de Champagne

Les points clés de cette performance nitrate

Ces terres de craie sont connues pour leur minéralisation modérée ; ici avec une rotation où les restitutions des cultures principales et intermédiaires sont plutôt pauvres en azote, la minéralisation totale annuelle se limite à 132 unités d'azote. Avec des cultures fertilisées modérément au printemps, et en l'absence d'apports organiques en été, cela conduit à une quantité d'azote disponible dans le sol en été et automne modérée : en moyenne 61 unités. La majeure partie de cet azote est piégé en fin d'été et automne, notamment par deux cultures sans légumineuse ; au final, le reliquat d'azote minéral en entrée d'hiver se limite à 25 unités. Enfin, grâce à la faible drainante (104 mm) de ces sols très profonds, les pertes par lessivage restent juste au-dessous de 10 kg N/100mm.

Sur le même site, on a étudié la performance du système « innovant » SYPRE qui s'avère décevante pour le nitrate. L'introduction de 2 cultures de pois de production et 3 cultures intermédiaires à base de légumineuse y développe la minéralisation, et l'azote disponible en été et automne, sans que ces couverts soient en mesure d'absorber ce supplément d'azote, ce qui conduit à un reliquat nettement supérieur et à des pertes de 14 kg N/100mm. L'absence de légumineuse semble ici une clé de la performance nitrate du système « témoin » à rotation courte. En leur présence, il semble indispensable d'accroître le piégeage d'azote en été et automne au-delà de 40 unités/an en moyenne.

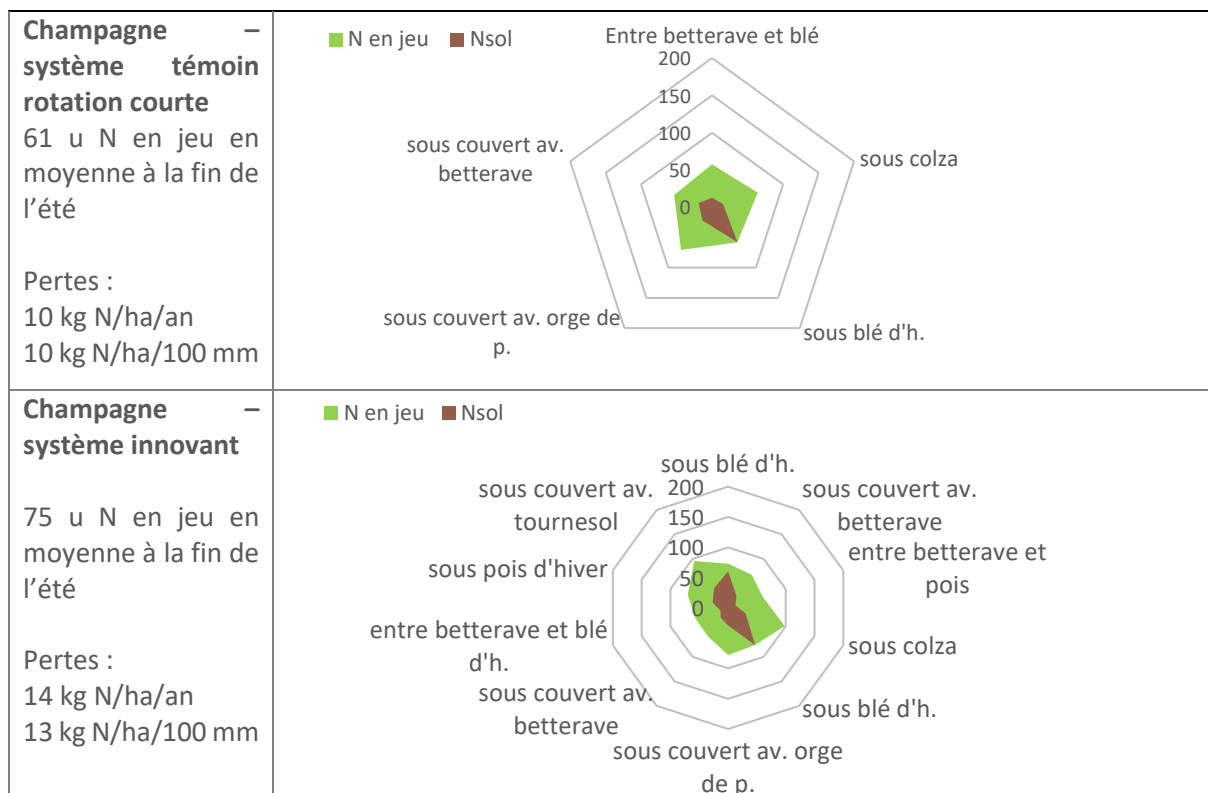


Figure 26 - Comparaison des deux systèmes de Champagne pour l'azote minéral présent dans le sol et l'azote absorbé par le peuplement végétal à l'entrée de l'hiver au cours de la rotation

f) Description et analyse des systèmes performants ou très performants du point de vue de l'ammoniac, mais pas performants du point de vue du nitrate

Tous les systèmes de culture en agriculture biologique (bio) étudiés ici ont une grande performance du point de vue de la volatilisation de l'ammoniac. En agriculture conventionnelle, les systèmes de culture étudiés sont performants ou très performants dans 5 sites sur 6, à l'exception du site de Champagne crayeuse.

i. Systèmes de culture bio de La Saussaye

A la Saussaye, 6 systèmes en agriculture biologique ont été évalués. Tous ont abouti à une faible volatilisation, inférieure à 4 kg N/ha/an, que l'on apporte de l'engrais organique ou pas. Et lorsque de l'engrais organique est apporté, la volatilisation ne dépasse pas 2% de l'apport organique azoté global.

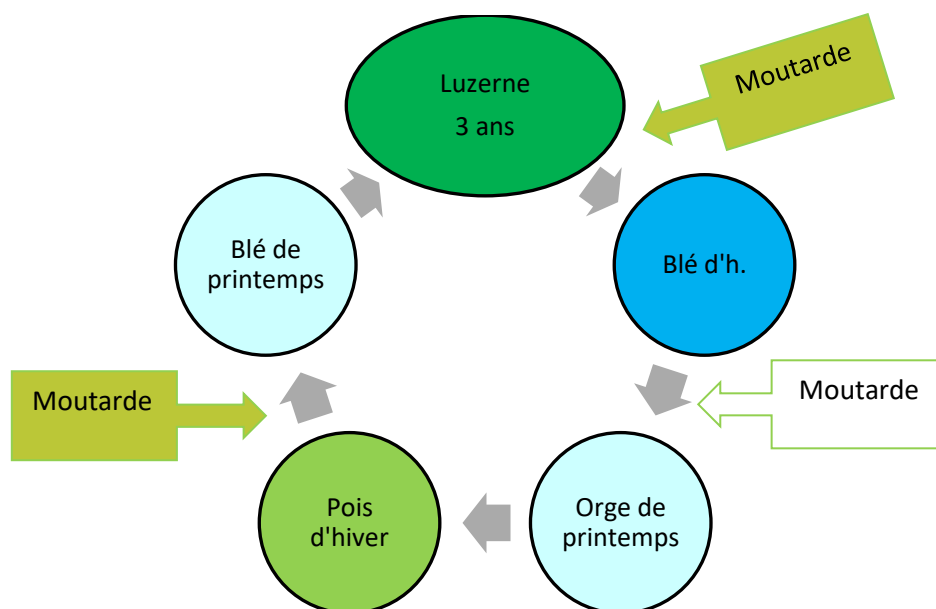
Seul sont développés ici les systèmes autonomes en azote.

Systèmes de culture bio autonomes (3)

Le système de culture bio autonome a été simulé en trois versions. Une version initiale double qui a été décliné avec le climat réel, et avec un climat pluvieux, telle qu'elle a été présentée précédemment, et une version améliorée dans laquelle des cultures intermédiaires supplémentaires ont été ajoutées :

- Semis systématique d'une moutarde derrière légumineuse
- Semis systématique d'une moutarde au 20 août avant culture de printemps

L'ensemble des autres caractéristiques du système sont identiques à celles de la version initiale.



*Figure 27 - Rotation du système bio autonome de La Saussaye, version améliorée.
Les cultures intermédiaires de moutarde qui ont été ajoutées à la version initiale sont figurées avec un fond vert.*

Tableau 10 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique ⁶ (kg N/ha)	Travail du sol
Luzerne	Septembre	Destruction fin août	0		
Blé tendre d'hiver	18 novembre	Juillet	0	(290)	Labour avant le semis
Orge de printemps	20 mars	Juillet	0		Labour avant le semis pour détruire le couvert de moutarde
Pois protéagineux d'hiver	3 novembre	Juillet	0	(290)	Labour en novembre avant le semis
Blé tendre de printemps	23 février	Juillet	0		Labour en novembre pour préparer le sol

Le système est performant pour la volatilisation ammoniacale car les pertes sont nulles.

Mais du point de vue du nitrate, les pertes sont importantes : 36 kg N/ha/an et 26 Kg N/100mm pour la version initiale, 22 kg N/ha/an et 15 Kg N/100mm pour la version améliorée par l'ajout de 2 cultures intermédiaires.

Systèmes de culture bio productifs (3)

Basés sur une rotation de 7 ans avec apports organiques importants en automne (79 kg N/ha) et au printemps (63 kg N/ha), ces 3 systèmes sont marqués par des apports de fumier de cheval dont la volatilisation de certains apports peut atteindre 5%, et 4kg N de pertes. Mais au final la volatilisation globale à l'échelle de la rotation reste inférieure à 2% des apports totaux.

Ils sont ainsi très performants pour la volatilisation, mais ne sont pas performants pour le nitrate même avec une couverture des intercultures 5 années sur 7.

ii. Système bio « fertilité » de Corbas

Deux systèmes de culture innovants ont été mis en place dans un essai système en agriculture biologique : un système « fertilité » qui vise à améliorer la fertilité du sol en appliquant les principes de l'agriculture de conservation des sols, et un système « diversité » dont l'objectif est d'augmenter la diversité cultivée. Les conditions de réalisation de ces essais sont identiques, elles sont donc décrites de manière commune. Ensuite, chaque système de culture fait l'objet d'une analyse distincte.

⁶ Dans ce système aucun apport organique n'est réalisé. Les valeurs indiquées ont été ajoutées au modèle simulé dans Syst'N afin que les restitutions des cultures de légumineuses (luzerne et pois) soient représentatives de la forte minéralisation observée dans la parcelle.

Contexte local

- Dispositif expérimental de longue durée mis en place chez un agriculteur
- Systèmes céréaliers sans élevage, avec irrigation
- Plaine alluviale du Rhône (69) dans le Bas-Dauphiné et à proximité de Lyon.
- Territoire en zone vulnérable soumis à la directive nitrates
- Une région où les exploitations biologiques sont souvent en déficit azoté
- Enjeu des exploitations :
 - o Miser sur les cultures de printemps à forte valeur ajoutée
 - o Faire peu recours aux engrais organiques, mobiliser des légumineuses en interculture

Sol

- Sol limono-argilo-sableux ; épaisseur : 90cm ; 3% de cailloux
- pH : 7,4 ; MO : 2%

Climat

- Climat semi-continental ; hiver sec et froid, déficit hydrique en été
- Pluviométrie : 804mm/an
- Données météo de la station de Bron

Contraintes imposées par les simulations

Dans les deux systèmes de culture des ajustements ont été nécessaires pour réaliser des simulations sur l'outil Syst'N. Elles sont listées ci-dessous car la majorité d'entre elles est commune aux deux systèmes.

- Les protéagineux (soja et pois-chiche) sont remplacés par des pois de printemps.
- Les couverts qui sont des mélanges avec légumineuse sont remplacés par une légumineuse fourragère.
- Les couverts qui sont des mélanges sans légumineuse sont remplacés par un raygrass s'il y a une graminée dans la composition ou par une moutarde dans le cas contraire.
- Les associations ne peuvent pas être simulées :
 - o Pour le cas d'un couvert semé sous couvert de la culture de vente la date de semis est placée le lendemain de la récolte précédente
 - o L'association blé/féverole d'hiver est remplacée par un blé d'hiver.
- Les effluents sont paramétrés pour avoir les caractéristiques les plus proches possibles des effluents apportés aux parcelles.

Système de culture bio « fertilité »

Le système est constitué d'une rotation de 4 ans qui alterne deux cultures de printemps irriguées (maïs et soja) et deux cultures d'hiver conduites en sec (blé tendre et orge). Les engrais organiques sont utilisés pour améliorer la nutrition azotée des cultures exigeantes et à forte valeur ajoutée (maïs grain, blé tendre et orge d'hiver). Des légumineuses sont introduites dans la rotation en tant que culture (soja) et dans les couverts en interculture.

Les couverts sont en général bien développés. Les couverts sont toujours broyés et enfouis à 15cm.

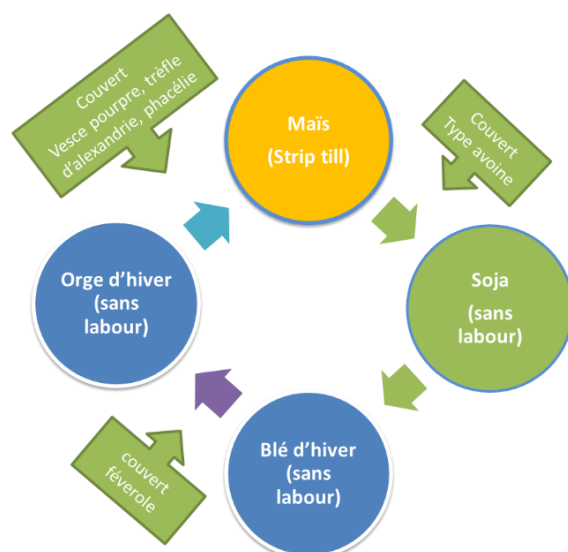


Figure 28 - Rotation du système bio « fertilité » de Corbas

Tableau 11 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Maïs grain	15 avril	De mi à fin septembre	0	4t/ha de fientes de volailles juste avant le semis (mi-avril)	Plusieurs passages mécaniques superficiels (5-15 cm – outils à dents ou à disques) avant le semis
Soja	Début mai à mi-mai	Mi-septembre	0	0	Plusieurs passages mécaniques superficiels (5-15 cm – outils à dents ou à disques) avant le semis
Blé tendre d'hiver	Octobre	Début à mi-juillet	0	800 kg/ha d'un engrais organique (9% N) (1 ^{er} mars)	1 ou 2 passage de travail du sol superficiel (outils à dents – 10 cm) avant le semis
Orge d'hiver	Fin octobre	Mi-juin à fin juin	0	500 kg/ha d'un engrais organique (9% N) (16/02)	1 ou 2 passage de travail du sol superficiel (outils à dents – 10 cm) avant le semis

Performance azotée

Le lessivage du nitrate est élevé car 30kg N/ha sont perdus tous les ans, soit 16,7kg N/ha/100mm. Les pertes par volatilisation d'ammoniac sont nulles, malgré les apports organiques, notamment grâce à l'enfouissement des fientes de volailles apportées juste avant le semis du maïs.

iii. Système bio « diversité » de Corbas

Système de culture

Le système est constitué d'une rotation de 8 ans où alternent tous les deux ans des cultures de printemps et des cultures d'hiver. Les cultures de soja et de maïs sont irriguées (irrigation 3 années sur 8). La présence de couverts et d'associations est maximisée. Des engrais organiques sont apportés aux cultures de maïs grain, blé tendre d'hiver et orge d'hiver pour pallier en partie les carences azotées souvent observées. Les légumineuses sont fréquentes, en culture principale et en couvert pendant les intercultures afin d'enrichir le sol en azote.

Les couverts végétaux sont implantés rapidement après la récolte de la culture de vente, voire en association avec les cultures pour maximiser leur croissance. Ils ont en général une forte croissance (biomasse sèche supérieure à 1t/ha voire 2t/ha). Les cultures de printemps (soja et maïs) sont irriguées.

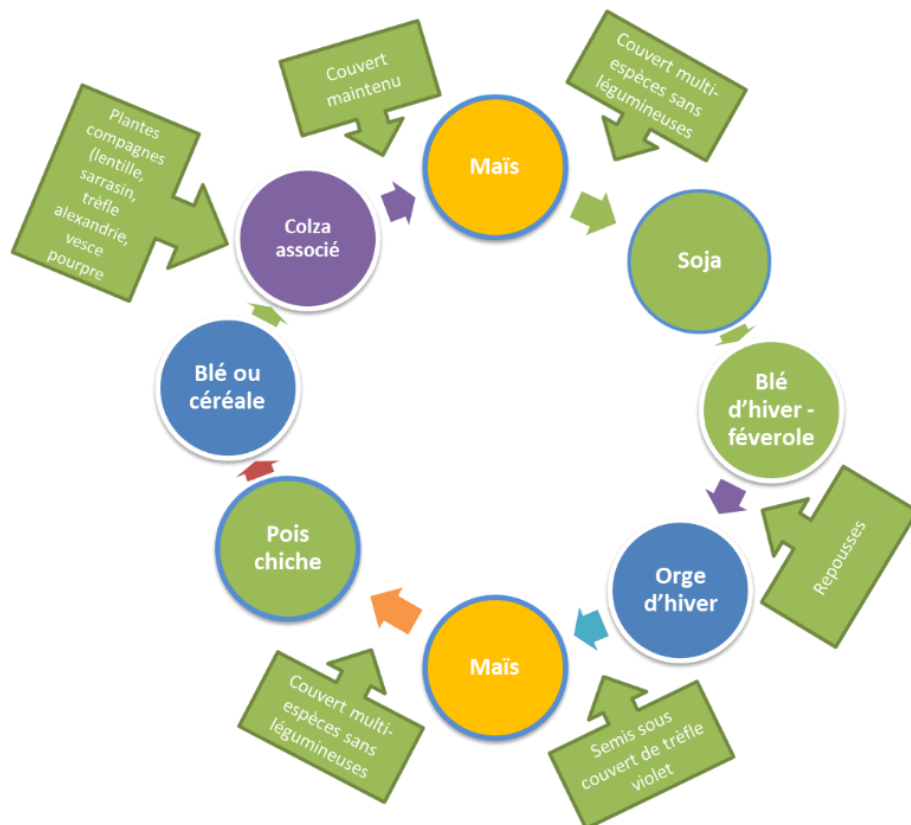


Figure 29 - Rotation du système bio « diversité » de Corbas

Tableau 12 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Maïs grain	15 avril	De mi à fin septembre	0	4t/ha de fientes de volailles juste avant le semis (mi-avril) et enfouies	Labour fin février Plusieurs passages mécaniques superficiels pour reprise et faux semis (5-15 cm – outils à dents ou à disques)
Soja	Début mai	Mi-septembre	0	0	Labour fin janvier Semis après plusieurs passages mécaniques superficiels (5-15 cm – outils à dents ou à disques)
Blé d'hiver-féverole	Début octobre	Début à mi-juillet	0	800 kg/ha d'un engrais organique (9% N)	1 ou 2 passage de travail du sol superficiel (outils à dents – 10 cm) avant le semis 2 déchaumages fin août
Orge d'hiver	Fin octobre	Fin juin	0	2 T/ha de fientes de volaille (2.3% N) épandu en février	1 ou 2 passage de travail du sol superficiel (outils à dents – 10 cm) avant le semis
Maïs grain (récolte immature)	Mi-avril	De mi à fin septembre	0	4t/ha de fientes de volailles juste avant le semis (mi-avril) et enfouies	Labour (fin mars) et plusieurs passages mécaniques superficiels pour reprise et faux semis (5-15 cm – outils à dents ou à disques) avant semis
Pois chiche	Mi-février	Fin juillet	0		Labour mi-janvier, puis plusieurs passages mécaniques pour reprise du labour et faux-semis (5-15 cm – outils à dents ou à disques)
Blé ou céréale	15 octobre	Début à mi-juillet	0	800 kg/ha d'un engrais organique (9% N)	Labour début octobre Travail du sol superficiel (outils à dents – 10 cm) avant le semis
Colza associé	15 août	Début juillet	0	800 kg/ha d'un engrais organique (9% N)	Plusieurs passages mécaniques superficiels (5-15 cm – outils à dents ou à disques) avant le semis Semis avec mélange de plantes compagnes (avec légumineuse)

Performance azotée

Le lessivage du nitrate est en effet trop élevé : 34kg N/ha sont perdus tous les ans, soit 19,2kg N/ha/100mm. Les pertes par volatilisation d'ammoniac sont très faibles : 1kg N/ha/an est perdu sous la forme d'ammoniac, soit 2% des apports organiques.

iv. Système légumier de plein champ «pratiques habituelles» (Finistère)

Contexte local

- Exploitation agricole spécialisée en production légumière à Plougourvest dans le Finistère (29)
- Région agricole : forte concentration d'élevages en Bretagne et exploitations agricoles spécialisées en productions légumières
- Enjeux du territoire : protection de la ressource en eau dans les bassins versants côtiers pour le nitrate et les produits phytosanitaires

Sol

- Sol sur limons éoliens profonds, ayant une réserve utile de 149 mm
- pH : 8,2, le pH est maintenu élevé par le chaulage pour éviter les risques de hernie
- MO : 4,3% ; le taux de matière organique est maintenu élevé par des apports réguliers d'effluents d'élevage et/ou d'algues

Climat

- Climat océanique doux et humide, pluviométrie annuelle: 874 mm
- Drainage d'octobre à mars, lame drainante de 500 mm en moyenne pour un sol nu
- Simulation en boucle sur une série de 21 années climatiques (1996-2016) mesurées sur la station expérimentale du CATE à Saint-Pol-de-Léon à proximité de la parcelle testée.

Système de culture

Le système de culture correspond à une monoculture de chou-fleur. Il s'agit d'une situation rare, bien que le retour du chou-fleur soit fréquent sur une parcelle bretonne en production légumière. Les données utilisées pour la simulation sont les pratiques habituelles d'une exploitation du réseau Breizhlégum'eau. Le sol est nu pendant les périodes d'interculture.

Les pratiques de travail du sol correspondent aux pratiques majoritaires des producteurs légumiers bretons. La fertilisation est assurée par un apport de nitrate de chaux fin octobre et un apport de fumier de bovins pour le chou-fleur hâtif d'hiver et par un apport de sulfate d'ammoniaque en février pour le chou-fleur tardif.

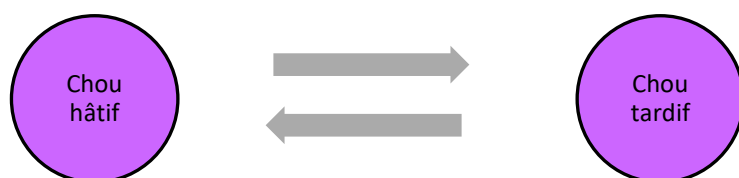


Figure 30 - Succession de choux fleurs simulée en boucle sur une période de 20 ans

Tableau 13 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Chou-fleur d'hiver hâtif	10 juillet	A partir de début janvier	49 uN/ha apportés fin octobre sous forme de Nitrate de chaux.	33 t/ha de Fumier de bovins stocké début juillet	Avant plantation : déchaumage, labour puis préparation superficielle. 3 binages à 15 jours d'intervalle à partir du 10 août. Résidus détruits par plusieurs passages de déchaumage (mi-mars et mi-mai) pour maintenir la propreté de la parcelle.
Chou-fleur d'hiver tardif	Début août	A partir de début avril	84 uN/ha apportés début février sous forme de Sulfate d'ammoniaque	0	Avant plantation : déchaumage, labour puis préparation superficielle. 3 binages à 15 jours d'intervalle à partir du 20 août. Résidus détruits au déchaumage suivant.

Performance azotée de volatilisation

Les pertes moyennes de la rotation sont de 81 kg N/ha/an pour le nitrate soit 18,5kg N/100mm drainés et de 2 kg N/ha/an pour l'ammoniac, soit 1% des apports réalisés. La grande performance azotée est donc atteinte pour l'ammoniac.

Répartition des pertes d'ammoniac au cours de la rotation

La volatilisation d'ammoniac varie autour de 5% de l'apport pour le sulfate d'ammoniac, il est proche de zéro pour le nitrate de chaux.

La volatilisation sont nuls après les apports de fumier de bovins qui sont apportés juste avant l'implantation des choux-fleurs hatifs.

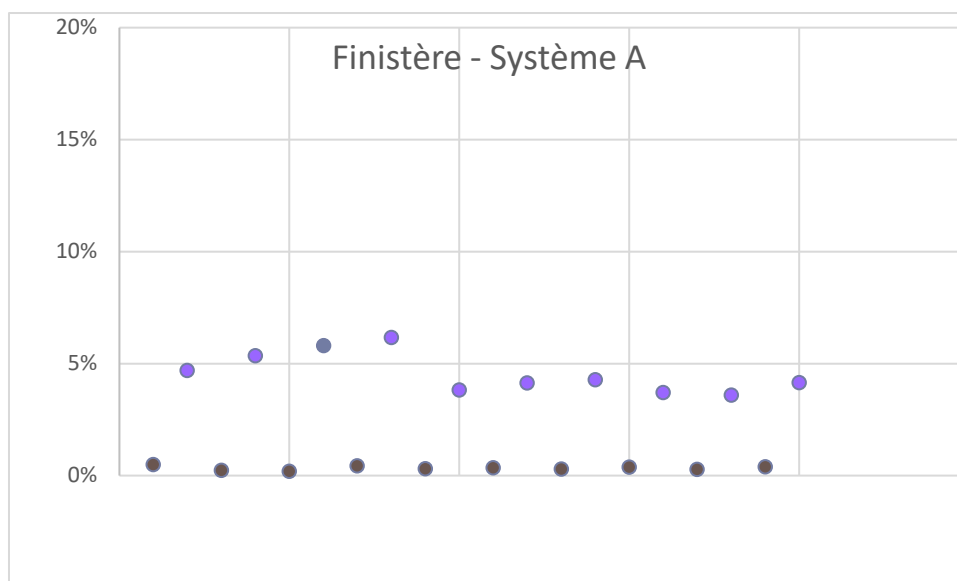


Figure 31 – Volatilisation de l’ammoniac en pourcentage de chaque apport, estimée avec Syst’N pour le système de culture « pratiques habituelles » du Finistère. Apport de nitrate de chaux en gris, apport de sulfate d’ammoniac en mauve.

v. Système céréalier avec fumier de volailles du Morbihan

Ce système céréalier est basé sur une rotation de 6 ans, incluant une culture de légumineuse (féverole), des couverts mixtes durant les périodes d’interculture, en combinant fertilisation minérale et fertilisation organique (fumier de volailles).

Contexte local

- Station expérimentale de Kerguehennec (Bignan, 56)
- Région agricole : forte concentration d’élevages et rotation majoritaire maïs-blé
- Enjeux du territoire :
 - La pollution par le nitrate qui impacte la qualité des masses d’eau douce (eau potable, eutrophisation) et maritimes (algues vertes)
 - La dépendance protéique des exploitations d’élevage (fortement dépendantes des importations de soja)

Sol

- Sol limoneux de 60cm de profondeur, 5% de cailloux
- pH : 6,4 ; **sol très riche en MO (4,9%)**

Climat

- Climat océanique doux, à forte pluviométrie : 1000mm/an
- Les simulations ont été réalisées à partir des données climatiques de 24 années consécutives (1993-2017) relevées à la station de Kerguehennec.

Système de culture

Le système de culture de Kerguéhennec correspond à une rotation de 6 ans conduite en agriculture conventionnelle. Il comprend 4 cultures annuelles fertilisées uniquement avec de l'engrais azoté de synthèse, une culture de maïs fertilisée uniquement avec de l'engrais organique, et une culture de colza fertilisée à la fois avec de l'engrais organique en fin d'été et de l'engrais azoté de synthèse au printemps. Parmi les cultures figurent une légumineuse (féverole) et des couverts mixtes d'interculture pendant les périodes automnales et/ou hivernales.

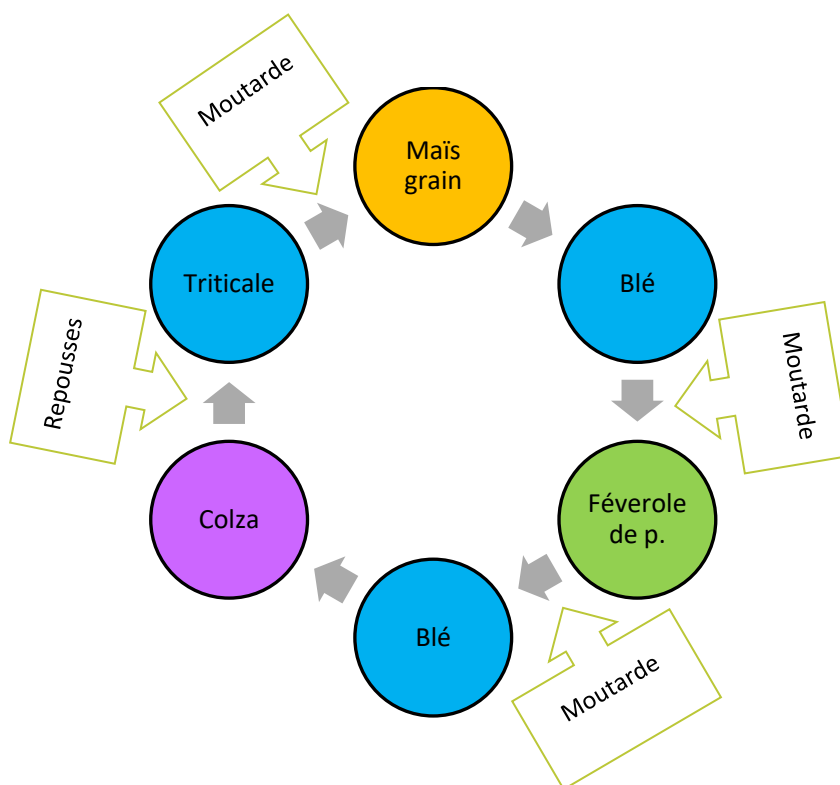


Figure 32 - Rotation du système du système céréalier du Morbihan

Le pois protéagineux d'hiver a été utilisé à la place de la féverole car cette culture n'est pas paramétrée dans Syst'N. Les couverts mixtes, entre blé et féverole et entre triticale et maïs, ont été considérés comme en étant des couverts de moutarde. La CIPAN est détruite le 5 février avant le maïs (décision pour le recalage du modèle dans Syst'N).

Tableau 14 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Maïs grain	6 mai	3 novembre	0	Fumier de volailles jeune non composté 15tMF ⁷ /ha (315kg N/ha) le 28/04 Enfoui le jour même	Déchaumage 10 jours avant le semis Labour et préparation du sol avant le semis Binage un mois après le semis
Blé d'hiver (mélange de 4 variétés)	8 novembre	3 août	Ammonitrate 33,5 75kg N le 31/03 30kg N le 9/05	0	Préparation de sol le 8 avant le semis
Féverole	20 mars	5 septembre	Ammonitrate 33,5 30kg N le 5/04	0	Labour avant le semis Binage un mois après le semis
Blé d'hiver (mélange de 4 variétés)	13 novembre	10 août	Ammonitrate 33,5 80kg N le 4/05 40kg N le 17/05	0	Déchaumage une semaine avant le semis
Colza	4 septembre	17 juillet	Ammonitrate 33,5 33kg N le 12/03	Fumier de volailles jeune non composté 9tMF/ha (189kg N/ha) le 2/09 Enfoui 2 jours après	Déchaumage et deux préparations du sol avant le semis Binage deux mois après le semis
Triticale (mélange de variétés)	6 novembre	5 août	Sulfate de manganèse 30% 5kg N le 4/03 Ammonitrate 33,5 75kg N le 7/04 30kg N le 15/05	0	Déchaumage avant le semis

Performance de volatilisation

Ce système de culture céréalière du Morbihan a des pertes d'ammoniac très faibles avec 4kg N/ha/an volatilisés, soit 3% des apports d'azote. Par contre, il n'est pas performant pour le nitrate.

⁷ MF : matière fraîche

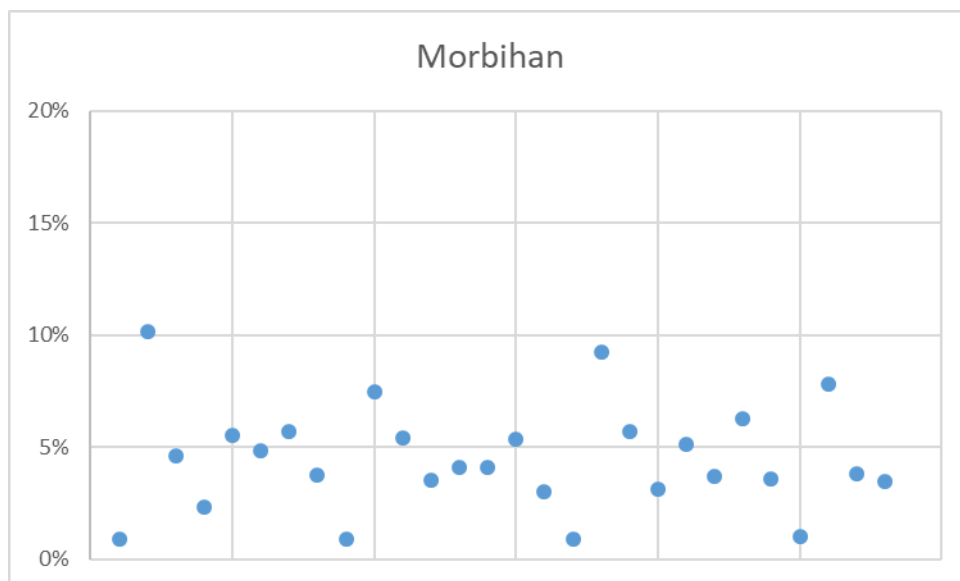


Figure 33 – Volatilisation de l’ammoniac en pourcentage de chaque apport, estimée avec Syst’N pour le système de culture du Morbihan. Apport d’ammonitrates en bleu.

La volatilisation d’ammoniac varie entre 1 et 10% de l’apport. Elle est particulièrement élevée (proche de 10%) après l’apport d’ammonitrates du 4 avril sur le blé. Elle est particulièrement faible pour l’apport d’ammonitrates sur colza en mars, et l’apport sur féverole en avril.

La volatilisation est nulle à très faible après les apports de fumier de volailles qui sont enfouis le jour même pour le maïs ou dans les 2 jours pour le colza.

vi. Système de culture raisonné « initial » de la Saussaye

Parmi les systèmes de culture en agriculture conventionnel (avec apport d’engrais azoté de synthèse), un autre système est performant du point de vue de la volatilisation. Il s’agit du système « raisonné initial » de La Saussaye qui a des pertes de 12 kg N/ha/an, soit 9,4 % des apports d’azote sous forme d’engrais de synthèse qui se volatilisent.

Les principales caractéristiques du site et du système sont les suivantes :

Contexte local

- Exploitation du lycée agricole de La Saussaye, en Eure-et-Loir (28), où il n’y a pas d’irrigation
- Région agricole : Beauce Chartraine où la rotation Colza/Blé tendre/Escourgeon est fréquente
- Enjeux du territoire : protection de la nappe de Beauce, la ressource en eau souterraine.

Sol

- Limons argileux profonds à moyennement profonds (80cm) sur calcaire de Beauce
- Réserve utile de 150-200mm, pas de caillou
- pH : 6,9 ; MO : 2.2%

Climat

- Océanique dégradé, pluviométrie faible (600mm) répartie sur l'année
- Le système a été mis en pratique de 2009 à 2013. C'est l'année 2012-13 qui a été choisie pour réaliser les simulations de pertes d'azote. Il s'agit d'une situation climatique à fort risque de lessivage relatif pour la région, ce qui aboutit à une lame drainante de 136 mm d'eau/an, compte tenu de la forte réserve en eau du sol.

Système de culture

Le système de culture de La Saussaye correspond à une rotation de 5 ans conduite en agriculture conventionnelle. Il comprend 4 cultures annuelles fertilisées uniquement avec de l'engrais azoté de synthèse (ammonitrate 33%), plus une légumineuse, le pois de printemps. Dans le dispositif expérimental de la Saussaye, il s'agit en fait de féverole, qui a été remplacée par du pois de printemps dans la simulation par Syst'N.

- Une rotation colza-blé tendre-orge-pois-blé dur (figure 5)
- La parcelle est couverte l'automne uniquement par la culture du colza, et par une culture intermédiaire avant le pois et avant l'orge de printemps, semées après le 20/08 et détruites par un labour fin novembre/début décembre
- Les résidus des cultures sont enfouis

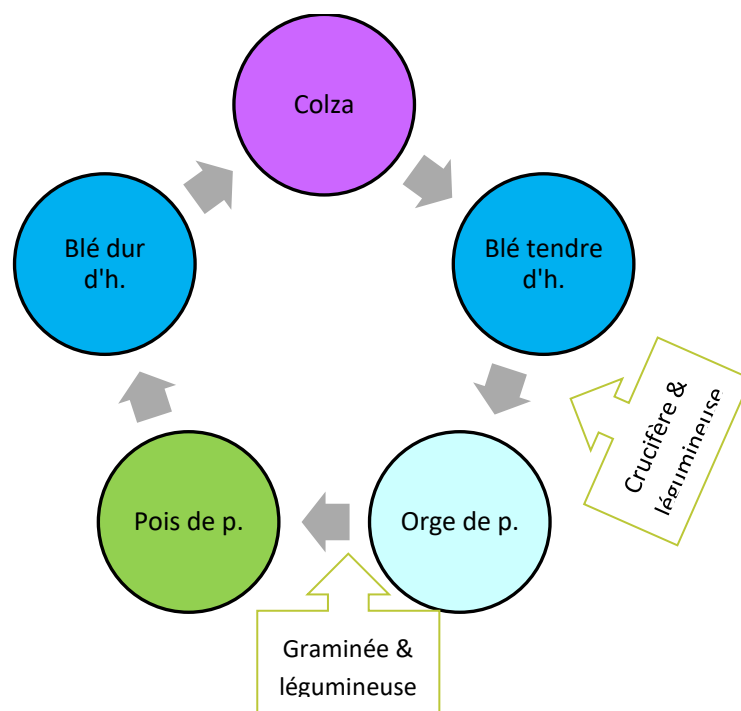


Figure 34 - Rotation du système raisonné initial de La Saussaye

Tableau 15 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Colza d'hiver	30 août	Mi-juillet	Solution azotée 390 50kg N le 15/02 80kg N le 20/03 Ammonitrate 33,5 50kg N le 1/04	0	Covercrop et Smarag
Blé tendre d'hiver	10 octobre	Mi-juillet	Solution azotée 390 45kg N le 05/03 80kg N le 25/03 Ammonitrate 33,5 45kg N le 30/04	0	Disque et Smarag, labour si sol trop humide
Orge de printemps	10 mars	Mi-juillet	Solution azotée 390 90kg N le 5/04	0	2 Covercrop, Labour
Pois protéagineux de printemps	15 mars	Fin juillet	0	0	Déchaumage, Ccrop, Labour
Blé dur d'hiver	30 octobre	Mi-juillet	Solution azotée 390 40kg N le 01/03 80kg N le 20/03 Ammonitrate 33,5 40kg N le 05/05 40kg N le 25/05	0	2 déchaumages

Performance azotée de volatilisation

La volatilisation de ce système de culture est de 12 kg N/ha/an, soit presque 9% des apports d'engrais azotés. Il est considéré comme simplement performant du point de vue de la volatilisation

La figure ci-dessous montre clairement l'effet de la forme d'azote dans la performance de volatilisation : les apports de solution azotée enregistrent des pertes simulées allant de 6 à 18%, tandis que la volatilisation de l'ammonitrate reste au-dessous de 5%, à l'exception de l'apport de mars pour le colza. Et au final, ce système « initial » volatilise 12 kg N/ha/an soit 9% des apports.

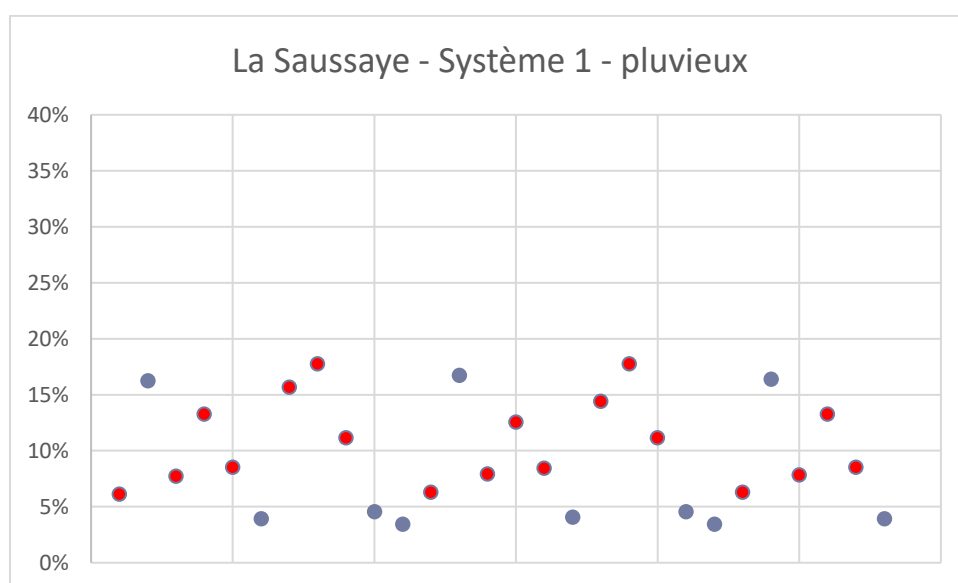


Figure 35 – Volatilisation de l'ammoniac en pourcentage de chaque apport, estimée avec Syst'N pour le système de culture raisonné « initial » et le climat pluvieux. Apport de solution 390 en rouge, apport d'ammonitrate en bleu.

vii. Système céréalier du Berry : rotation courte en sol argilo-calcaire superficiel et moyen

Contexte local

- Région agricole avec des sols à potentiel de production moyen à faible
- Rotation la plus fréquente dans la région : colza-blé-orge
- Enjeux du territoire : réduire les coûts de fertilisants azotés

Sol

Deux sols différents. Un sol argilo-calcaire superficiel de 40 cm de profondeur, un sol argilo-calcaire de 60 cm de profondeur. Les autres caractéristiques pédologiques sont communes aux deux sols.

- Argilo-calcaire, avec 20% de cailloux dans le premier horizon et 60% dans le second
- pH : 7,5 ; MO : 3%

Climat

- Climat continental, pluviométrie annuelle: 768 mm
- Drainage d'octobre à mars, lame drainante de 238 mm en moyenne
- Simulation sur une série de 8 années climatiques (2010-201 à la station de Châteauroux)

Système de culture

La rotation colza-blé-orge n'inclut aucune culture intermédiaire, les résidus sont enfouis après chaque récolte. Les cultures sont fertilisées avec des engrais de synthèse au printemps.

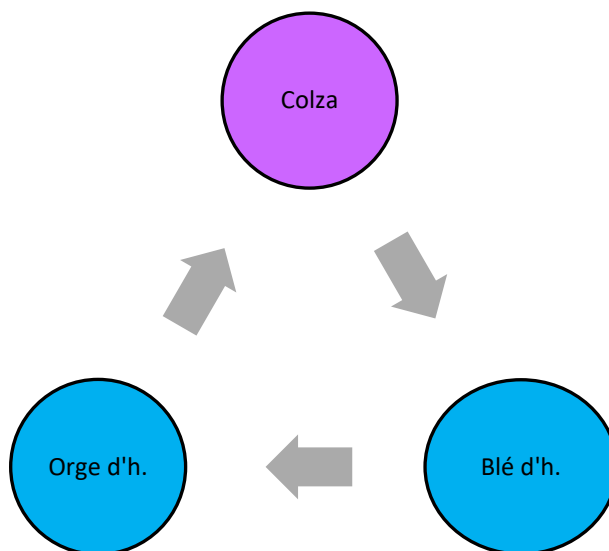


Figure 36 - Rotation colza-blé-orge d'un système de culture sur argilo-calcaire courant du Berry

Tableau 16 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale	Fertilisation organique	Travail du sol
Colza	25 août	20 juillet	Sulfonitrate 50kg N/ha (10/02) Ammonitrate : 100kg N/ha (25/02) 42 kg N/ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus
Blé d'hiver	20 octobre	20 juillet	Ammonitrate 50kg N/ha (10/02) 100kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Labour un mois avant le semis Enfouissement des résidus
Orge d'hiver	20 octobre	10 juillet	Ammonitrate 50kg N/ha (10/02) 100kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Labour un mois avant le semis Enfouissement des résidus 2 déchaumages après la moisson

Performance azotée

Le système céréalier en Champagne berrichonne en rotation courte sur sol argilo-calcaire superficiel et moyen est partiellement performant en termes d'azote. En moyenne le lessivage du nitrate est de 72kg N/ha/an, soit 30kg N/ha/100mm drainés, ce qui est supérieur au seuil de 10kg N/ha/100mm nécessaire pour atteindre la performance azotée. En revanche, la volatilisation ammoniacale est faible avec 8kg N/ha/an soit 4% des apports d'azote, avec une fertilisation réalisée avant tout avec de l'ammonitrate, à l'exception d'un apport de 50 kg N/ha de sulfonitrate sur le colza.

viii. Système céréalier du Berry : rotation courte en sol limon-sableux

Le contexte global est identique au système céréalier en Champagne berrichonne, rotation courte sur sol argilo-calcaire superficiel et moyen. Le sol et la rotation sont toutefois différents.

- Texture : limon-sableux, épaisseur du sol : 1,2m ; pas de cailloux
- pH : 7 ; MO : 2%

Système de culture

Le système de culture est représentatif d'un type de rotation très fréquent dans le Berry, du type colza-blé-orge. Les cultures d'hiver se succèdent avec une prédominance de céréales et un colza en tête de rotation.

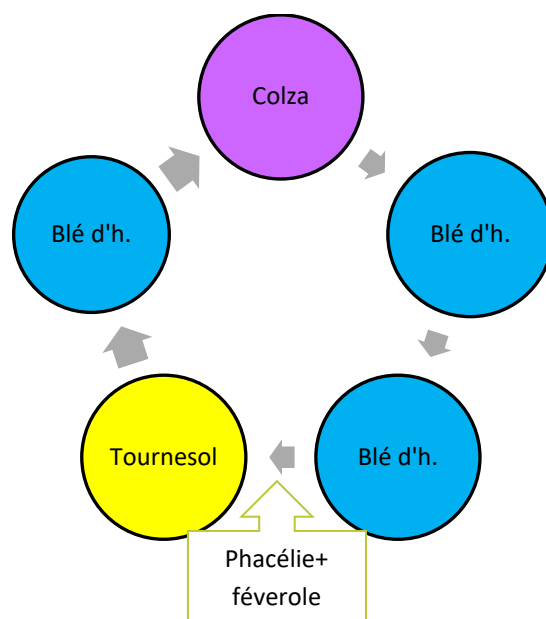


Figure 37 - Rotation du système de culture sur sol profond courant du Berry

Tableau 17 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Colza	25 août	20 juillet	Sulfonitrate 50kg N/ha (10/02) Ammonitrate 100kg N/ha (25/02) 42 kg N/ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus
Blé d'hiver	15 octobre	20 juillet	Ammonitrate 50kg N/ha (10/02) 100kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Labour un mois avant le semis Enfouissement des résidus
Blé d'hiver	15 octobre	20 juillet	Ammonitrate 50kg N/ha (10/02) 100kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Labour un mois avant le semis Enfouissement des résidus
Tournesol	15 avril	20 octobre	Ammonitrate 50kg N/ha (16/04)	0	Outil à dents/disques Résidus enfouis
Blé d'hiver	15 octobre	15 juillet	Ammonitrate 50kg N/ha (10/02) 100kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus

Performance azotée

En moyenne le lessivage du nitrate est de 12 kg N/ha. Avec une lame drainante en moyenne de 92mm/an, les pertes sont de 13 kg N/ha/100mm drainés. Le système dépasse un peu le seuil de 10 kg N/ha/100mm. Le système atteint la grande performance azotée pour la volatilisation ammoniacale avec 7 kg N/ha/an volatilisés, soit 4% des apports d'engrais azotés de synthèse, avec une fertilisation réalisée avant tout avec de l'ammonitrate, à l'exception d'un apport de 50 kg N/ha de sulfonitrate sur le colza.

ix. Système céréalier du Berry : système innovant en sol argilo-calcaire superficiel et moyen

Système de culture

La rotation de ce système « innovant » sur sol argilo-calcaire superficiel à moyen est une succession sur 5 ans qui comprend des céréales d'hiver (orge et blé), un colza en tête de rotation et des légumineuses en tant que culture de rente (lentille) et en tant que couvert en interculture (mélange phacélie-féverole).

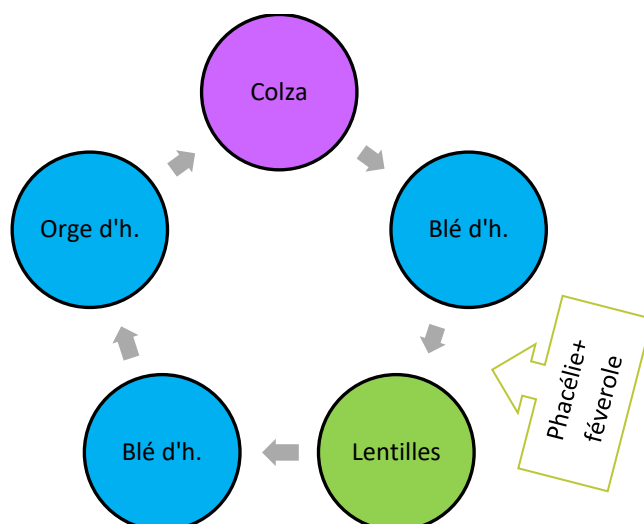


Figure 38 - Rotation du système « innovant » sur sol argilo-calcaire du Berry

Tableau 18 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Colza	25 août	10 juillet	Sulfonitrate 45kg N/ha (10/02) Ammonitrate : - 80kg N/ha (25/02) - 40kg N/ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus
Blé d'hiver	15 octobre	20 juillet	Ammonitrate 40kg N/ha (10/02) 100kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus
Lentilles (simulé par un pois de printemps)	21 mars	5 août	0	0	Enfouissement des résidus
Blé d'hiver	10 octobre	10 juillet	Ammonitrate 40kg N/ha (10/02) 100kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus
Orge d'hiver	20 octobre	10 juillet	Ammonitrate 45kg N/ha (10/02) 65kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus

Les simulations qui ont servi de support aux analyses suivantes ont nécessité de remplacer certaines espèces cultivées pour faire face aux contraintes de l'outil Syst'N toujours en cours de développement. Le couvert de légumineuses a été remplacé par un pois de printemps, et un pois de printemps a substitué à la lentille.

La différence de profondeur de sol entre un sol superficiel et moyen (20cm d'écart) n'a pas d'influence sur les résultats. Les deux cas seront donc traités de manière commune.

Performance azotée

Les pertes de nitrate par lessivage sont élevées avec 72kg N/ha/an, soit 31 kg N/ha/100mm avec une lame drainante moyenne de 235mm/an. La volatilisation est faible, car elle ne dépasse pas 5kg N/ha perdus, soit une perte de 4% des apports d'azote, avec une fertilisation réalisée avant tout avec de l'ammonitrate, à l'exception d'un apport de 50 kg N/ha de sulfonitrate sur le colza.

x. Système céréalier du Berry : système innovant en limon sableux

Le sol et le contexte sont identiques au système céréalier en Champagne berrichonne : rotation courte en limon sableux.

Système de culture

Le système céréalier innovant en Champagne berrichonne sur sol de limon sableux est une modification du système en rotation courte ; il vise à améliorer la performance azotée.

La rotation de 6 ans inclut deux cultures intermédiaires entre des cultures d'hiver et des cultures de printemps. Les résidus sont systématiquement enfouis. Les cultures sont fertilisées au printemps avec des engrais de synthèse, à l'exception du pois qui ne reçoit aucun apport exogène.

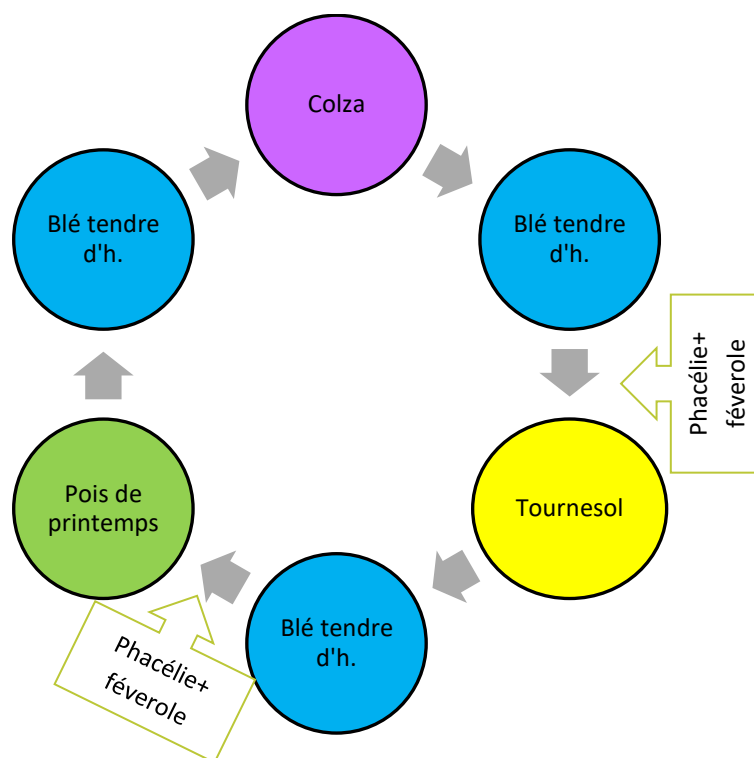


Figure 39 - Rotation du système innovant en limon sableux du Berry

Tableau 19 - Conduite des cultures

Culture	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Fertilisation organique	Travail du sol
Colza d'hiver	15 août	20 juillet	Sulfonitrate 45kg N/ha (10/02) Ammonitrate : - 80 kg N/ha (25/02) - 40 kg N/ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus
Blé tendre d'hiver	15 octobre	25 juillet	Ammonitrate 40kg N/ha (10/02) 80kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus
Tournesol	15 avril	20 septembre	Ammonitrate 50kg N/ha (16/04)	0	Enfouissement des résidus
Blé tendre d'hiver	15 octobre	25 juillet	Ammonitrate 40kg N/ha (10/02) 80kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Enfouissement des résidus
Pois protéagineux de printemps	3 mars	20 juillet	0	0	Enfouissement des résidus
Blé tendre d'hiver	15 octobre	14 juillet	Ammonitrate 40kg N/ha (10/02) 80kg N/ha (25/02) 40kg N /ha (10/03)	0	Passage d'un outil à dents/disques un mois avant le semis Enfouissement des résidus

Performance azotée

Le lessivage est intermédiaire avec 12kg N/ha/an, soit 12kg N/ha/100mm, car la lame drainante est seulement de 100mm en moyenne). La performance pour le nitrate n'est pas atteinte.

Peu d'azote est volatilisé suite aux apports d'azote dans ce système. En moyenne, 5kg N/ha sont émis par an, ce qui représente l'équivalent de 4% des apports, avec une fertilisation réalisée avant tout avec de l'ammonitrate, à l'exception d'un premier apport de 50 kg N/ha de sulfonitrate sur le colza.

4. Gestion de l'azote pour la performance en nitrate :

Les systèmes de culture étudiés ici se limitent à des rotations de cultures annuelles non irriguées, avec parfois de la luzerne durant plusieurs années. Ils sont tous situés dans la moitié nord de la France Métropolitaine.

L'ambition d'une grande performance pour le nitrate, caractérisée par moins de 5 kg N/ha lixivié pour 100 mm de lame drainante, n'a jamais été atteinte dans les 21 situations étudiées. Par contre, **l'ambition de simple performance (entre 5 et 10 kg N/ha/100 mm) a été atteinte dans 3 situations.**

Les pertes d'azote moyennes annuelles sous forme de nitrate y sont assez variables, elles sont de 12, 39 et 10 kg N/ha/an, respectivement pour la Saussaye, le Finistère et la Champagne crayeuse. La lame d'eau drainante est réduite (sols profonds de la Saussaye et de Champagne associés à de faibles précipitations) ou importante (Finistère) en lien avec la forte pluviométrie bretonne.

Les connaissances acquises sur la dynamique de l'azote dans les champs cultivés, et notamment celles qui ont été utilisées pour construire l'outil Syst'N soulignent que les pertes de nitrate sont fonction du milieu pédoclimatique et de l'azote minéral présent dans le sol notamment en automne. Ce dernier dépend des pratiques des années passées (celles qui déterminent la minéralisation issue de l'humus), des pratiques des mois passés (fertilisations de printemps, culture récoltée et résidus enfouis), comme des pratiques des semaines passées (fertilisations d'été et d'automne, piégeage d'azote d'été et d'automne).

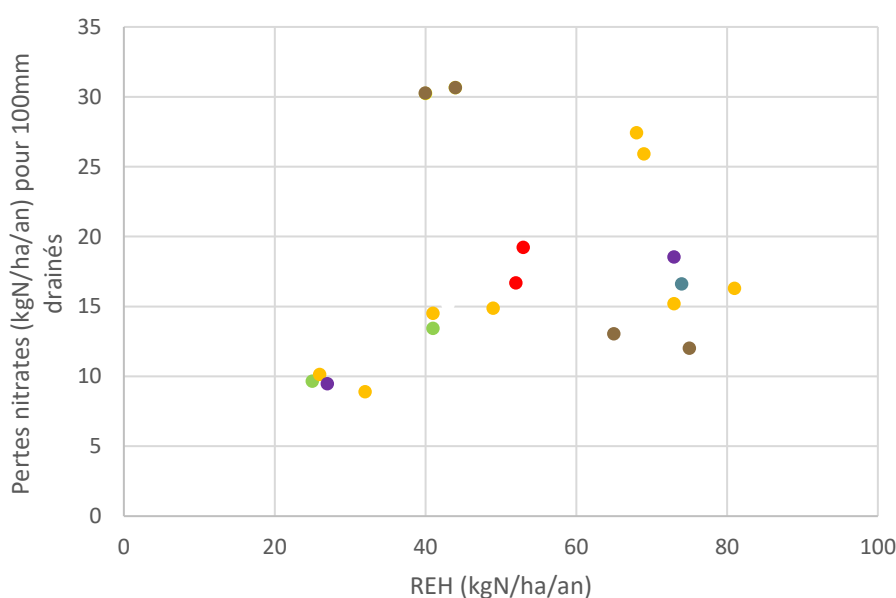


Figure 40 : Pertes de nitrate pour 100 mm drainés en fonction du Reliquat en entrée d'hiver (REH) : Kerguehennec, Finistère, Champagne, La Saussaye, Berry, Corbas . Les simulations réalisées avec une série pluviométrique très sèche de La Saussaye ne figurent pas ici.

Ces 3 situations performantes en matière de nitrate correspondent à des sols variés du point de vue la teneur en matière organique (2.2, 2.7 et 3.3%) comme de la minéralisation de l'humus (91, 179 et 117 kg N/ha/an), et des fertilisations moyennes annuelles variées (128, 41 et 142 kg N/ha). Ce sont exclusivement des systèmes de culture avec fertilisation de synthèse ; tous sont sans fertilisation organique ; l'un d'entre eux comprend une culture de légumineuse dans sa rotation. Leur point commun est d'avoir de **faibles reliquats d'azote minéral à l'entrée de l'hiver : 32, 27 et 25 kg N/ha en moyenne de la rotation (figure 40)**. Ces faibles reliquats ont été obtenus grâce à un **piégeage fréquent dans la rotation** : 5 années sur 5, 2 années sur 2, et 3 années sur 5.

Faire de l'eau propre en nitrate supposerait ainsi d'avoir des reliquats en entrée d'hiver qui correspondent à ce qu'on souhaite avoir à la récolte après une fertilisation azotée de printemps équilibrée, soit 10 kg N/ha par horizon de 30 cm, soit de l'ordre d'une trentaine d'unités d'azote.

Ces faibles reliquats en entrée d'hiver ont été obtenus par un **piégeage d'azote en été et en automne adapté à l'azote disponible pendant cette période**. L'azote disponible, c'est d'abord la minéralisation de l'azote organique du sol. Elle est très variable au sein de ces 3 situations. Dans le cas du Finistère, où la minéralisation annuelle est de plus de 315 unités, il a été piégé plus de 194 unités par an en moyenne. Dans le cas de la Champagne, avec une minéralisation annuelle de 132 unités, il a été piégé 36 unités par an en moyenne, ce qui est plus faible mais non négligeable. Enfin dans le cas de la Saussaye, avec une minéralisation annuelle de moins de 100 unités il n'a pas été piégé plus de 14 unités, ce qui est facile dans des rotations avec colza. De fait, on a aussi travaillé à **avoir une faible quantité d'azote disponible dans le sol en été et automne**, en optimisant la fertilisation de synthèse au printemps pour éviter des reliquats anormaux à la récolte, comme on a évité toute fertilisation azotée (organique ou de synthèse) en été et automne, à l'exception d'un petit apport d'engrais de synthèse sur un des 2 choux fleurs dans le Finistère. Autrement dit, en l'absence de fertilisation azotée (organique ou minérale) en été et automne, pour aboutir à un reliquat en entrée d'hiver équivalent au reliquat à la récolte d'une culture non sur-fertilisée, on a fait en sorte que la minéralisation estivale et automnale soit compensée par un piégeage d'azote du même ordre de grandeur.

La faible proportion des situations performantes pour le nitrate peut paraître préoccupante. Le seuil de 50 mg/l, qui équivaut au seuil de 10 kg N/100 mm de lame d'eau, est un seuil défini pour l'eau potable à l'échelle des masses d'eau et des territoires, mais pas à l'échelle du champ cultivé. Or, les champs agricoles ne représentent qu'une partie de la surface du territoire qui est aussi occupée par la voirie, les habitations, la forêt... Dans la mesure où ces derniers émettent peu de nitrate, on peut en effet tolérer que les champs agricoles dépassent ce seuil de 50 mg/l dans la mesure où ces fortes concentrations aux champs cultivés sont compensées par d'autres parcelles du territoire qui émettent peu. Autrement dit, dans ces conditions, si on pouvait tolérer des champs cultivés émettant non plus 10 mais plutôt 15 kg N/100 mm, on pourrait alors valider comme performants d'autres systèmes de culture étudiés comme ceux de la Saussaye et de Champagne, comme certains du Berry (figure 40).

Un autre résultat peut sembler préoccupant. Une seule de ces situations est vraiment pratiquée (en Champagne), les deux autres restent pour le moment des systèmes imaginés par « amélioration sur le papier » de pratiques existantes (à la Saussaye et dans le Finistère). Ces deux derniers systèmes méritent d'être testés sur le terrain, afin d'essayer de confirmer leur pertinence établie par simulation avec l'outil Syst'N. Cependant, on notera que ces stratégies de gestion de l'azote par l'usage de

couverture systématique de toutes les intercultures ont montré leur faisabilité et leur pertinence dans plusieurs captages (Jérôme Ratiarson, communication personnelle).

Pourquoi ne trouve-t-on **pas de situation performante pour le nitrate en agriculture biologique** ?

Aucun système testé n'obtient des pertes inférieures à 10 kg N/100 mm. Cependant parmi les nombreux systèmes étudiés, un système bio productif de la Saussaye s'en approche ; comme le montre la figure 40, cette situation est proche des 3 situations performantes avec un reliquat d'entrée d'hiver de 26 kg N/ha, mais des pertes dépassant un peu le seuil des 10 kg N/100 mm. Trois raisons semblent à l'origine de cette faible performance pour le nitrate des systèmes en agriculture biologique testés ici : les stratégies pour obtenir une bonne alimentation azotée des cultures en l'absence d'engrais azotée de synthèse, consistent souvent : à développer la fourniture d'azote par la minéralisation via des apports organiques ou/et via l'enfouissement de résidus riches en azote comme ceux des légumineuses ; à réaliser des apports organiques en été et en automne, c'est-à-dire quelques semaines avant le début de la lixiviation, alors que ces produits organiques fournissent également de l'azote minéral ; à avoir une faible fréquence de piégeage de l'azote en été et en automne dans la rotation, car cette période est utilisée pour les travaux du sol utiles à la maîtrise des adventices (faux semis contre les adventices annuelles, destruction des adventices vivaces). Ce diagnostic ouvre des pistes à explorer pour imaginer de nouvelles façons de cultiver en agriculture biologique, et performantes voir très performantes pour le nitrate : fertilisations organiques azotées apportées plutôt au printemps comme en agriculture conventionnelle, c'est-à-dire 6 à 9 mois avant le début de la période de lixiviation ; implantation de pièges à nitrate en priorité après les légumineuses et avant les apports organiques d'été et d'automne, etc.

Ces systèmes de culture semblent faisables. En effet, la situation de Champagne est considérée comme existante ; c'est le témoin de référence de l'expérimentation SYPPRE. Les 2 proposent des orientations qui, tout en étant originales par rapport aux pratiques locales dominantes, sont déjà pratiquées ailleurs :

- le système « amélioré » proposé à la Saussaye est basé sur une fertilisation au printemps économe en azote et un piégeage à l'automne chaque année. Or cette stratégie est déjà pratiquée, notamment par quelques agriculteurs d'une aire d'alimentation de captage de l'Yonne (Laurette Paravano, communication personnelle).
- le système « basses fuites d'azote » du Finistère est basé sur la valorisation d'une très forte minéralisation de l'azote (de l'ordre de 300 unités d'azote par an) d'un sol contenant près de 2.7% de matière organique, par des cultures d'une brassicacée semée en été (le chou-fleur), capable d'absorber 150 à 200 unités avant la fin de l'hiver. Les travaux réalisés sur la conduite d'une autre brassicacée, le colza, dans les sols à forte minéralisation avec Terres Inovia et l'INRAE pourraient peut-être éclairer les producteurs bretons de chou-fleur ?

Enfin, pour mettre au point ces systèmes innovants, l'outil Syst'N pourraient contribuer à ces diagnostics de performance pour le nitrate, en proposant des interfaces de sortie, rendant compte plus explicitement du reliquat en entrée d'hiver et de l'azote absorbé à la même date, chaque année au cours de la rotation, sous la forme d'un histogramme synthétique, comme dans la figure 8, ou encore sous la forme d'un radar.

5. Gestion de l'azote pour la performance en ammoniac

Les systèmes de culture étudiés ici se limitent à des rotations de cultures annuelles non irriguées, avec parfois de la luzerne durant plusieurs années. Parmi les cultures annuelles de ces rotations, certaines comprennent des légumineuses annuelles non fertilisées. La fertilisation azotée y est réalisée avec des engrais de synthèse (sulfate d'ammoniac, ammonitrate, solution azotée 390, et/ou nitrate de chaux), et/ou des engrais organiques solides, mais pas d'apports organiques liquides dans notre échantillon. Les enfouissements de l'engrais se limitent aux apports réalisés avant les semis, les engrais apportés en végétation ne sont pas enfouis. Les 6 sites sont tous situés dans la moitié nord de la France Métropolitaine.

L'ambition d'une grande performance pour l'ammoniac, caractérisée par une volatilisation de moins de 5 % de l'azote apporté, a été atteinte dans toutes les situations sauf 3. Et, l'ambition de simple performance (entre 5 et 10% de l'azote apporté) a été atteinte dans 1 situation. Au final, seulement 2 systèmes de culture appartenant au même site de Champagne crayeuse ne sont pas performants.

Examinons maintenant les seules situations performantes et très performantes pour la volatilisation.

Les pertes d'azote moyennes annuelles par volatilisation y sont très variables, elles vont de 0 à 12 kg N/ha/an.

Les connaissances acquises sur la dynamique de l'azote dans les champs cultivés, et notamment celles qui ont été utilisées pour construire l'outil Syst'N soulignent que les pertes d'ammoniac sont fonction du climat (température, humidité, vent), du sol et de l'azote présent sous forme d'ammoniac et d'urée en surface du sol dans les 3 semaines qui suivent un apport de fertilisant organique ou de synthèse. Ce dernier dépend de la quantité, de la forme et de la localisation verticale du fertilisant, et des travaux du sol et de l'irrigation réalisés depuis l'apport.

Les systèmes fertilisés uniquement avec de l'engrais organique ou sans aucun engrais⁸ sont tous très performants. Les pertes d'ammoniac se limitent alors à une fourchette de 0 à 4 kg N/ha/an.

Les systèmes fertilisés avec un apport moyen de plus de 100 kg N/ha/ha engrais de synthèse ont une volatilisation allant de 5 à 8 kg N/ha/an pour les très performants, et de 12 kg N/ha/an pour le seul simplement performant.

Ces situations sont très performantes pour la volatilisation, parce qu'on évite d'appliquer au printemps des engrais de synthèse contenant moins de 25% d'azote sous forme de nitrate (solution azotée, sulfate d'ammoniac). C'est l'usage de solution azotée qui explique la simple performance dans le système initial de la Saussaye (pH 6.9) et la non performance des deux systèmes de Champagne crayeuse (pH 8.7). En effet, la volatilisation de l'ammoniac représente 23 à 46% de l'azote de la solution azotée en Champagne crayeuse, suivant les apports, et 6 à 18% à la Saussaye. Tandis que la volatilisation de l'ammonitrate varie de 1 à 17%.

⁸ Les systèmes de culture sans aucun apport d'engrais ont une volatilisation inférieure ou égale à 4 kg/ha/an. Ils sont considérés comme très performants.

L'application de sulfate d'ammoniac réalisé dans le système légumier « basses fuites d'azote » du Finistère est réalisée au mois novembre sous un climat humide ; les pertes se limitent de 4 à 6% de l'apport dans ces conditions.

En résumé, dans les systèmes où l'on n'enfouit pas les engrais de synthèse, et notamment pour les apports en végétation, pour avoir une grande performance de volatilisation, une solution consiste à éviter l'usage d'engrais de synthèse contenant moins de 50% d'azote sous forme de nitrate dans les sols alcalins comme ceux de Champagne crayeuse.

Les applications d'engrais organique solide n'ont pas posé de problèmes pour atteindre une grande performance de volatilisation dans notre échantillon. Il reste cependant à étudier des systèmes avec des apports sous forme liquide (lisier, digestat).

Sachant que la volatilisation dépend de la météorologie dans les jours qui suivent les apports, il serait judicieux d'étudier également des systèmes de culture où l'on raisonne la date d'application de l'apport en fonction de la météorologie, comme avec la méthode Appi-N, en particulier avec des apports de solution azotée.

Annexe : Vulnérabilité du milieu où se situent les différents systèmes étudiés

Systèmes	Lieu	Sol	Pluviométrie annuelle (mm)	R.U. du sol (mm) ⁽¹⁾	Vulnérabilité lessivage ⁽²⁾	pH	Vulnérabilité volatilisation ⁽³⁾
Système céréalier en craie de Champagne : Système de référence	Béthény (Marne)	Terres de craie	600	150	● ○ ○	8.7	● ● ●
Système céréalier en craie de Champagne : Système innovant							
Système céréalier-fumier de volailles en Bretagne	Kerguéhennec (Morbihan)	Brunisol sur micaschiste	1000	150	● ● ●	6.4	● ○ ○
Systèmes de culture raisonné de La Saussaye (2)	Sours (Eure-et- Loire)	Limons argileux profonds à moyennement profonds (80cm) sur calcaire de Beauce	600	150	● ○ ○	6.9	● ○ ○
Systèmes de culture bio autonome de La Saussaye							
Systèmes de culture bio productif de La Saussaye							
Système céréalier en Champagne berrichonne : rotation courte en limon sableux	Indre et Cher	Sol limon sableux (considéré « sol profond »)	699	185	● ○ ○	7	● ○ ○
Système céréalier en Champagne berrichonne : système innovant en limon sableux	Indre et Cher						● ○ ○
Système céréalier en Champagne berrichonne : rotation courte en sol argilo- calcaire moyen	Indre et Cher	Sols argilo-calcaire moyen		58	● ● ●	7.5	● ● ○
Système céréalier en Champagne berrichonne : système innovant en sol argilo-calcaire moyen	Indre et Cher						● ● ○
Système céréalier en Champagne berrichonne : rotation courte en sol argilo- calcaire superficiel	Indre et Cher	Sols argilo-calcaire superficiel		44	● ● ●	7.5	● ● ○

Système céréalié en Champagne berrichonne : système innovant en sol argilo-calcaire superficiel	Indre et Cher						● ● ○
Système bio « diversité » de Corbas	Corbas (Rhône)	Sols de texture limono-argilo-sableuse au pH alcalin	804	141	● ● ○	7.3	● ● ○
Système bio « fertilité » de Corbas	Corbas (Rhône)						
Système légumier de plein champ - «Pratiques habituelles » (Finistère)	Roscoff (Finistère)	Sol limoneux sableux argileux profond (90cm voire plus) sur granit	874	117	● ● ●	8.2	● ● ●
Système légumier de plein champ - «Basses fuites d'azote » (Finistère)	Plougourvest (Finistère)	Limons éoliens profonds		149	● ● ○	7.2	● ● ○

(1) La Réserve Utile du sol a été calculée avec Syst'N

(2) Vulnérabilité lessivage : le ratio RU/précipitations a été calculé. Après analyse des valeurs obtenues trois groupes ont été proposés pour distinguer les systèmes : >0.2, de 0.15 à 0.2 et ≤0.15. Remarque : il s'agit plus précisément d'un niveau de vulnérabilité au drainage

(3) Vulnérabilité volatilisation : les 3 niveaux sont les suivants : <7, entre 7 et 7.5, >7.5