

PI6 – Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur argile à silex en Picardie

Intitulé du cas-type	PI 6 : Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur argile à silex en Picardie
Localisation	Département de l'Oise
Type de sol	Argile à silex
Type de climat	Série climatique 2000-2018
Rotation	Maïs ensilage- Blé-Colza -Blé
Pratiqué ou prototype	Pratiqué
N° Cas-types comparables	PI2, PI 3, PI 4, PI 5, PI 7
Contact	Christine Leclercq, UniLaSalle Beauvais

I. Contexte

a. Localisation et présentation générale du SdC

i. Contexte agricole et enjeux de l'azote (et autres) dans cette situation

Le Plateau Picard, entaillé par des vallées souvent sèches, présente une grande diversité de sols largement dépendante de la topographie. Les versants notamment se caractérisent par des sols superficiels : argiles à silex sur craie et « cranettes » sur craie (Figure 1). La diversité des potentiels résultant de la réserve utile se traduit par une diversité de systèmes de culture. La polyculture domine le paysage : céréales et oléo-protéagineux, betterave voire pomme de terre et légumes d'industrie sur les limons les plus profonds. Les exploitations de polyculture élevage bovin laitier ou allaitant sont de moins en moins nombreuses.

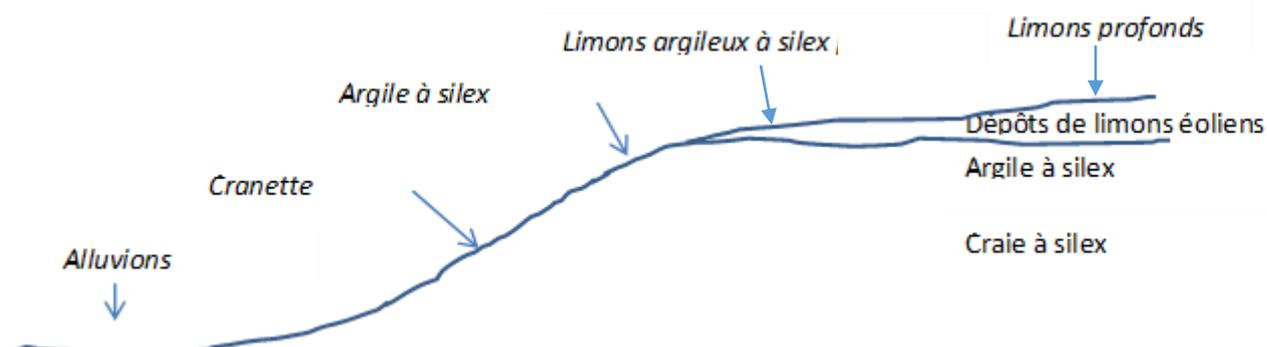


Figure 1 : Répartition typique des sols selon le relief en Plateau Picard

Si les eaux de surface sont rares, la nappe de la craie est profonde mais vulnérable aux pollutions par les nitrates ce qui justifie le classement - à titre préventif - du département de l'Oise en zone vulnérable dès 2001.

ii. Système de culture

La rotation maïs ensilage/ blé/colza/ blé s'observe dans les exploitations de polyculture-élevage (laitier ou taurillon).

b. Climat

Le climat se caractérise par des précipitations assez faibles (685 mm en moyenne par an) mais fréquentes (104 j/an) et assez régulièrement réparties (Figure2). La température moyenne annuelle s'établit à 11,1 °C, les températures moyennes de janvier et de juillet sont respectivement de 4,1 °C et 18,9 °C (Figure 3). Le « bilan » ($P - 0.5*ETP$) est excédentaire en hiver et de niveau moyen (262 mm du 01/10 au 31/03 entre 1969 et 1993).

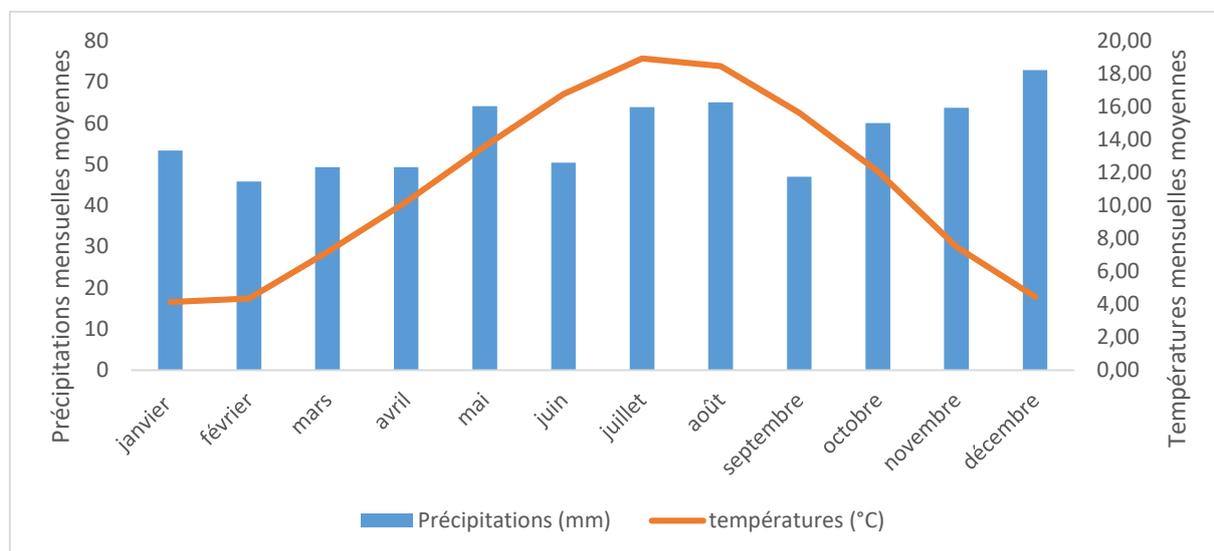


Figure 2 : Diagramme ombrothermique – Beauvais (1999-2018).

c. Sol sur lequel est « testé » le SdC

Ce sol est un sol argileux à silex (Tableau 1).

Tableau 1 : caractéristiques physico-chimiques des argiles à silex de l'Oise

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Densité apparente	Cailloux (%)	Norg (%)	MO (%)	C/N	CaCO ₃ (%)	pH _{eau}	Cec (meq)
0-30	30.9	61.9	7.2	1.3	10	0.2	3	8.8	1.5	6.3	18
30-80	70	15	15	1.1	10						
80-130	36	34	30	1.3	10						

Profondeur maximale d'enracinement : 70 cm. Texture, densité, pierrosité, % MO, % CaCO₃, CEC d'après la fiche « Argile à silex » du Guide Agronomique des Sols de l'Oise.

II. Le système de culture

Tableau 2 : itinéraire technique de chaque culture et couverts végétaux de la rotation

Culture	Implantation et travail du sol	Stratégie de fertilisation (/ha)	Irrigation	Récolte (date, destruction et gestion des couverts) et niveau de rendement
Couvert de moutarde	mi-août	néant	néant	Peuplement dense Détruit par le gel fin janvier
Maïs ensilage	Labour, herse rotative et semis mi-avril	20 t de fumier de bovins en janvier Sol 39 : 70 N début avril	néant	Récolte mi-septembre 15 T Ms / ha
Blé	Semis mi-octobre sur travail superficiel	Solution azotée 39 : 65 N début mars 60 N fin mars 60 N fin avril Ammonitrate 43 N mi-mars	néant	Récolte mi-juillet 8.5 t/ha Paille exportée
Colza	Semis fin août sur travail superficiel	35 m3 t de lisier de bovins mi-août Solution azotée 39 : 84 N début mars	néant	Récolte mi-juillet 4 t/ha Résidus non exportés
Repousses de colza	néant	néant	néant	Destruction chimique début octobre
Blé	Semis mi-octobre sans travail du sol	Sol 39 : 50 N mi-mars 85 N fin mars 50 N fin avril	néant	Récolte mi-juillet 8.5 t/ha Résidus non exportés

L'enjeu de la culture du maïs est l'autonomie fourragère du troupeau laitier et, par suite, la rentabilité de l'élevage et de l'exploitation. Pour limiter le risque de stress hydrique et de déficit fourrager qui nécessiterait la recherche et l'achat de maïs sur pied à proximité et/ou de concentré, elle est réservée aux sols les plus profonds et/ou sa sole majorée d'une marge de sécurité (qui sera récoltée en grain en année favorable).

La présence du colza et du maïs permet de valoriser le lisier et le fumier produits par l'élevage laitier et de réduire les charges de fertilisation.

Pour assurer la marge maximale, la fertilisation est fondée sur le bilan azoté, la densité de peuplement sortie hiver et un objectif de rendement réaliste.

La rotation maïs / colza/ blé/ orge d'hiver et le labour limitent le risque de spécialisation de la flore adventice. L'implantation de couverts jugée couteuse, exigeante en main d'œuvre et leur réussite trop aléatoire, seule une moutarde est semée dans l'interculture qui précède le maïs et les « repousses » de colza font office de piège à nitrate.

III. Résultats attendus en termes de pertes d'azote
--

Les attentes en termes de pertes par lixiviation de l'azote et par volatilisation sont précisées dans le Tableau 3. Nous visons un système à moins de 10 kgN pour 100 mm d'eau drainée et moins de 10 % de pertes par volatilisation pour 100 kgN/ha apportés. Ces seuils ont été déterminés dans le cadre du projet AgroecoSyst'N vis-à-vis de la qualité de l'eau (potabilité) et de l'air.

Tableau 3 : Seuils de satisfaction des pertes en nitrates et en ammoniac du système de culture.

Seuils de pertes	Volatilisation d'ammoniac : > 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : 5 % à 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : < 5 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)
Lixiviation de nitrate : < 5 kgN/100 mm de lame d'eau drainante		Haute performance azotée (HPN)	Haute performance azotée (HPN)
Lixiviation de nitrate : 5 à 10 kgN/100 mm de lame d'eau drainante			Haute performance azotée (HPN)
Lixiviation de nitrate : > 10 kgN/100 mm de lame d'eau drainante			

Légende :

	Haute performance azotée (HPN)
	Performance azotée partielle
	Basse performance azotée

IV. Présentation des simulations réalisées avec Syst'N®

Les simulations de la rotation Maïs ensilage / blé / colza / blé / ont été réalisées sur période 2000- 2018 sur la base des itinéraires techniques de 2014 à 2016 (sauf dates d'implantation moyennes).

V. Evaluation des pertes d'azote

a. Présentation des résultats moyens du système de culture

Les flux d'azote moyens à l'échelle du système de culture sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Flux moyens d'azote total simulés à l'échelle du champ cultivé sur l'ensemble de la rotation (kgN/ha/an)

a	Entrées d'azote (kgN/ha/an)	a1 Apport: fertilisation minérale	168
		a2 Apport: fertilisation organique	62
		a3 Fixation biologique d'azote	0
b	Sorties d'azote par exportation (kgN/ha/an)	b1 Exportation par les récoltes	129
		b2 N contenu dans les résidus de cultures exportés de la parcelle	8.5
c	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		125
d	Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)	d1 Protoxyde d'azote (N ₂ O)	2.3
		d2 Ammoniac (NH ₃)	24
		d3 Nitrate lixivié (NO ₃ ⁻)	9
		d4 Nitrate ruisselé (NO ₃ ⁻)	0
e	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		152

NB : sur un total moyen de 94 kg N /ha mobilisés dans les résidus, seuls 8.5 kgN/ha sont exportés annuellement.

A partir des flux simulés et présentés dans le Tableau 4 nous sommes en mesure de calculer des indicateurs de performances azoté de cette situation culturale (Tableau 5).

Tableau 5 : Indicateurs retenus pour évaluer les performances azotées de la situation culturale.

a-b	Bilan apparent : Entrées – Sorties par exportation (kgN/ha/an)	93
a - (b+d)	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)	58
(d3*100)/e	Pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)	6
(d3*100*4.43)/e	Pertes de nitrates par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgNO ₃ ⁻ /100 mm) ou concentration moyenne en nitrate (NO ₃ ⁻) sous le profil (mgNO ₃ ⁻ /l)	26
d2/(a1+a2)	Pertes d'azote sous forme d'ammoniac (NH ₃) en % des apports totaux	10

NB : 1 kg N = 4.43 kg NO₃

Avec une concentration moyenne de 26 mg/l de nitrates, des pertes annuelles de nitrate de 6 kg N/100 mm de lame d'eau drainante et d'ammoniac de 24 Kg N/ha/an soit 10% des apports, cette situation se caractérise par des pertes moyennes.

Le bilan apparent est 94 kg N/ha/an et, compte tenu des pertes (35 kg N/ha/an), le stock d'azote total augmente de 59 kgN/ha/an. La lame drainante étant moyenne (150 mm/an), les pertes de nitrates s'expliquent par des quantités moyennes d'azote minéral dans le sol en début de période de drainage. En effet, minéralisation nette de l'azote organique du sol et des résidus et fertilisation minérale (125 + 168 = 262 kgN/ha/an) dépassent très largement les exportations par les récoltes (129 kg N /ha/an) et, même si une partie de cet excédent est mobilisé dans les résidus non exportés (8,5 kg N /ha /an), la quantité d'azote minéral en jeu apparaît moyenne.

La combinaison des pertes par lixiviation moyennes et d'une lame drainante moyenne se traduit par une concentration moyenne en nitrates sous le profil moyenne (26 mgNO₃-/L).

Les pertes d'ammoniac sont assez élevées.

N.B. : l'ensemble des Figures présentées ci-après sont disponibles au téléchargement sous image (png) pour une meilleure lisibilité et plus grande facilité d'utilisation de ces Figures pour le conseil ou la formation.

Par ailleurs les dynamiques complètes plante-sol-atmosphère de ce cas-types sont également présentées en annexe.

b. Dynamiques et pertes azote : sorties graphiques Syst'N

La Figure 4 présente les dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation. Les pertes indiquées sont des moyennes calculées pour chaque culture les années climatiques sur lesquelles la culture concernée est présente.

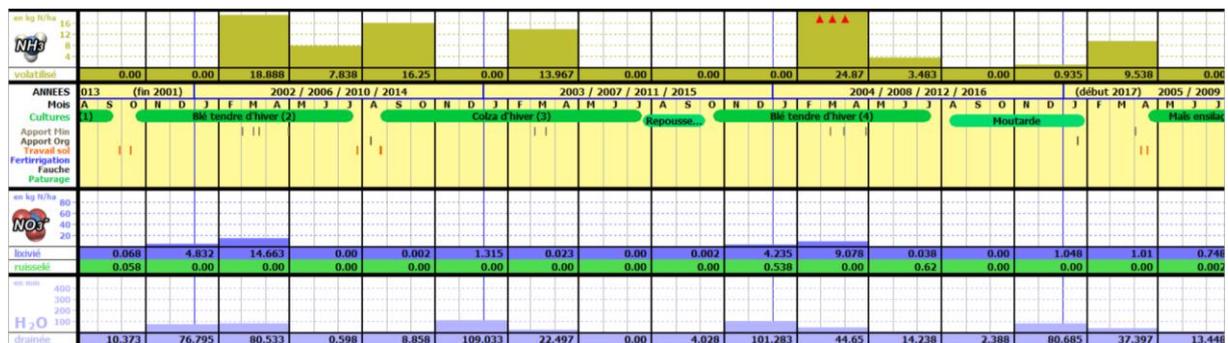


Figure 4 : dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation simulées sur les 18 années climatiques.

Lixiviation des nitrates

En moyenne, sur les 4 cycles de la rotation (Figure 4), la période de drainage et de lixiviation a lieu en fin d'automne (novembre à janvier) et fin d'hiver (février à avril).

La quantité d'eau drainée apparaît

- très élevée sous colza en fin d'automne puis moyenne,
- très élevée en fin d'automne puis assez élevée sous le blé qui suit le colza,
- plus faible en fin d'automne et plus élevée en fin d'hiver pour le blé qui suit le maïs ensilage,
- élevée puis assez élevée sous la moutarde qui précède le maïs ensilage.

Les pertes de nitrate sont

- quasi nulles sous le colza et la moutarde,
- faibles sous blé qui suit le colza,
- faibles puis moyennes en fin d'hiver sous le blé qui suit le maïs ensilage.

Les dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation, l'évolution de la quantité d'azote minéral dans le sol et l'absorption par les cultures sur l'ensemble de la série climatique figurent en annexe.

La séquence été 2010 – été 2013 apparaît assez représentative (Figure 5). Après la récolte du maïs ensilage en 2009, sous l'effet de la minéralisation des matières organiques du sol et des faibles prélèvements par le blé, le stock d'azote minéral du sol augmente mais se maintient à un niveau suffisamment modeste (< 50 kg N /ha) pour que la lame drainante élevée n'entraîne que peu de lixiviation. Au semestre suivant, les apports minéraux, précoces par rapport à la courbe d'absorption, se traduisent par une forte hausse de la quantité d'azote minéral dans le sol et, compte tenu d'une lame drainante importante, par la lixiviation de plus de 20 kg N/ha. Pertes et absorption par la culture au printemps réduisent le stock à un niveau comparable à celui de la fin de l'été précédent mais l'apport organique réalisé en août 2010 provoque un nouveau pic qui sera rapidement absorbé par la forte croissance du colza à l'automne et ne connaîtra pas de lixiviation malgré une forte lame drainante. De même la culture absorbe rapidement l'afflux d'azote minéral consécutif aux apports de printemps 2011. Malgré la minéralisation estivale, la quantité d'azote minéral dans le sol reste à un niveau très faible grâce à l'absorption par les repousses de colza permettant des pertes faibles à l'automne bien que la lame drainante soit très forte et les prélèvements par le blé insignifiants. Le stock d'azote minéral ne connaît qu'un pic modéré avec les apports minéraux du printemps 2012, plus tardifs que ceux du blé après maïs c'est-à-dire plus proches de la courbe d'absorption. La moutarde implantée en août limite la hausse du stock d'azote minéral du sol et la lixiviation malgré une lame drainante très élevée. Enfin, l'apport organique de début avril se traduit par une forte augmentation de ce stocke mais sans lixiviation grâce à une faible lame drainante

Cas-type PI 6 – Rotation maïs ensilage-blé-colza- blé sur argile à silex en Picardie

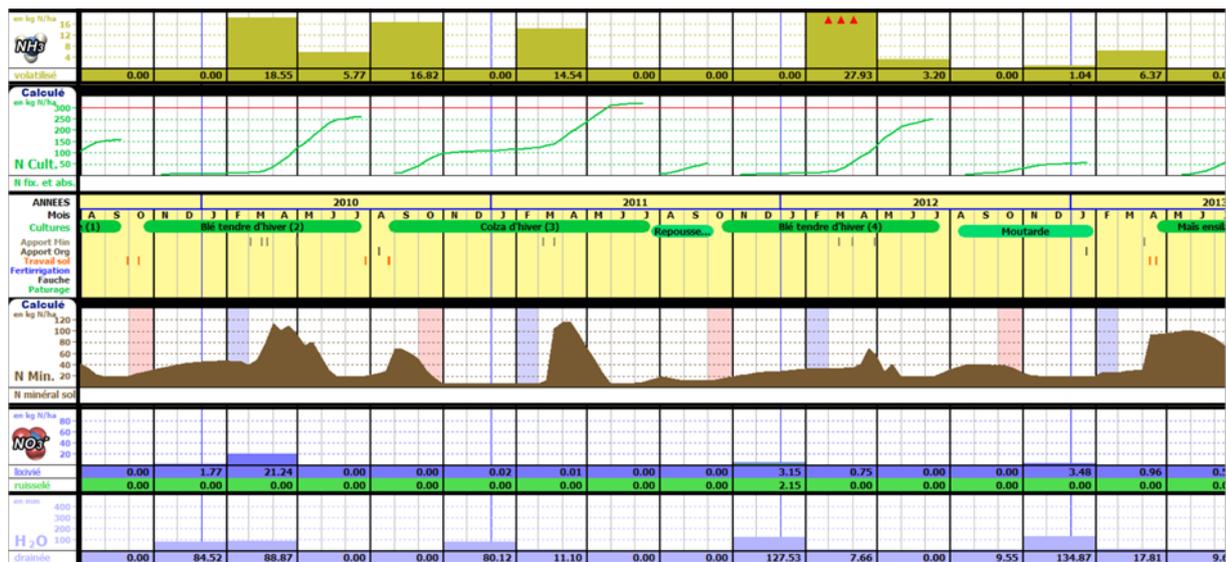


Figure 5 : Dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation de l'été 2009 à l'été 2013.

L'analyse complète de la série montre une grande variabilité interannuelle de la lame drainante sous toutes les cultures en fin d'automne (Figure 6) et dans une moindre mesure en fin d'hiver (Figure 7). Pour une même période de la rotation (trimestre*culture), on observe également des variations interannuelles de la quantité d'azote lixivié.

Entre novembre et janvier, la quantité d'azote lixivié ne dépasse 3 kg N/ha qu'en 2003 sous colza avec une lame drainante exceptionnellement élevée (5 kg N / ha pour 167 mm) et sous blé après maïs (11 kg N / ha pour 135 mm).

Entre février et avril, la quantité d'azote lixivié est nulle souvent nulle (8 années sur 14) mais peut atteindre des valeurs élevées sous blé après maïs (21 kg N /ha en 2010, 14 kg N/ha en 2014) ou sous blé après colza (24 kg N/ha en 2008, 12 kg / ha en 2016)

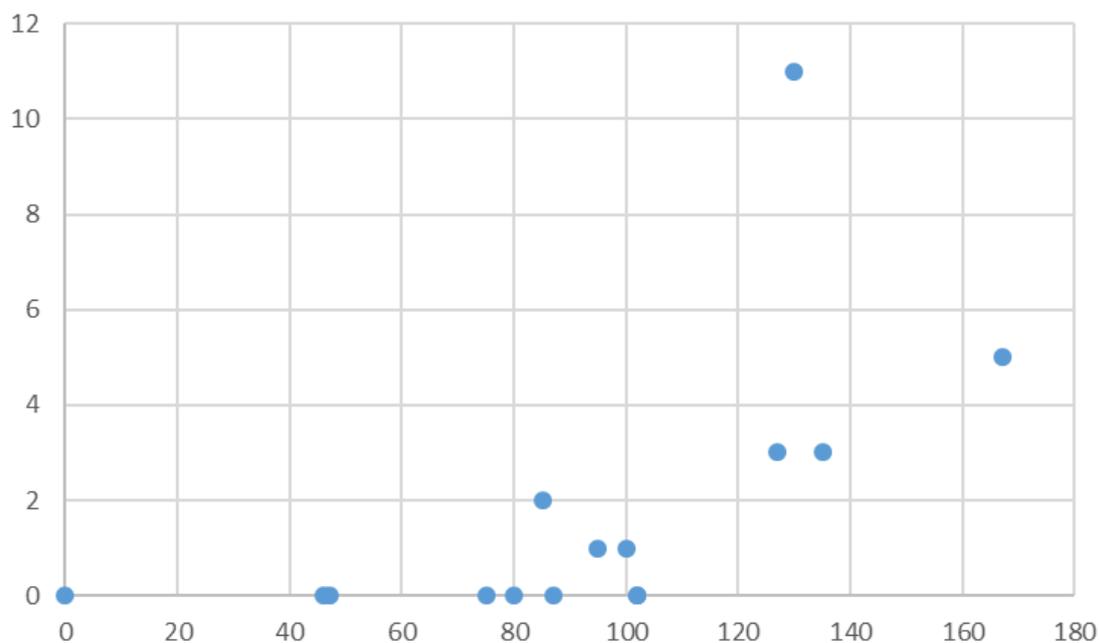


Figure 6 : Relation entre quantité d'azote lixivié (kg N /ha) entre novembre et janvier et lame drainante (mm) durant la même période.

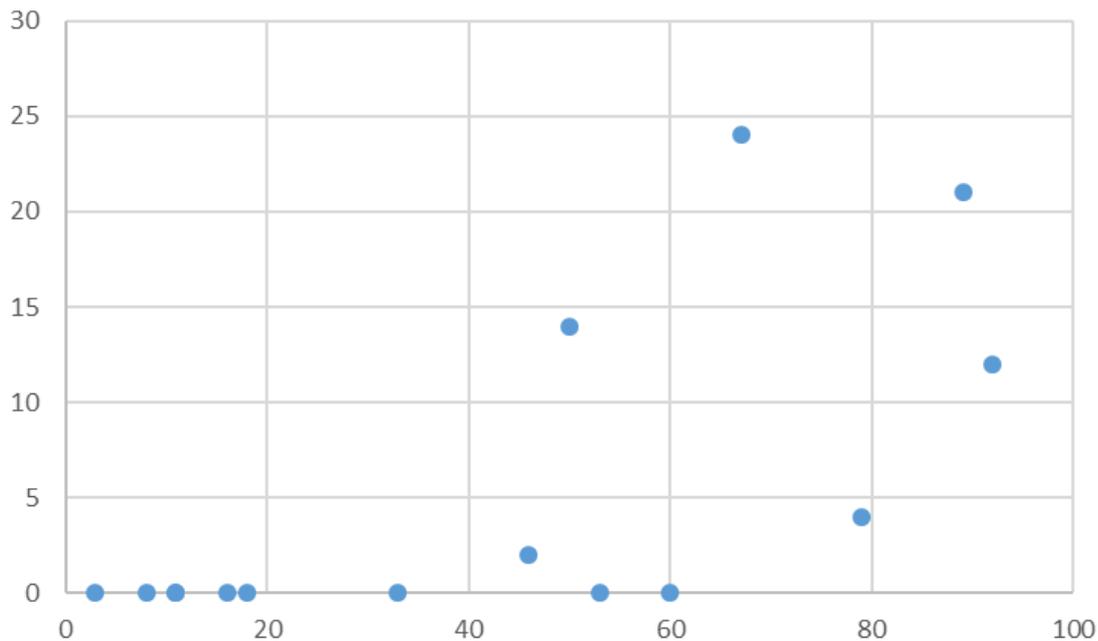


Figure 7 : relation entre quantité d'azote lixivié (kg N /ha) entre février et avril et lame drainante (mm) durant la même période.

Emissions d'ammoniac

En moyenne, sur les 4 cycles de la rotation (Figure 4), les émissions d'ammoniac ont lieu en fin d'hiver (à l'occasion des apports minéraux ou de fumier) et se prolongent un peu sous blé (dernier apport plus tardif). Un épisode intervient également en fin d'été lors de l'épandage de lisier avant colza. Moyennes sous colza ou avant maïs ensilage en fin d'hiver, elles apparaissent plus élevées sous le blé qui suit le colza.

Si le pH du sol (6.5) n'est pas un facteur favorable, la forme des apports minéraux, le plus souvent sous forme de solution azotée 39 dont 50 % de l'azote se présente sous forme d'urée, est plus propice à la volatilisation.

La variabilité interannuelle des émissions résultant de différences de température et d'humidité du sol reste faible sauf pour la volatilisation après épandage du lisier apporté pour le colza (de 5 à 31 kg N/ha'. Malgré des apports minéraux sur blé après colza inférieurs de 43 kg/ha/an à ceux du blé après maïs, et un premier apport plus tardif, les émissions de fin d'hiver s'avèrent systématiquement plus élevées (25 kgN/ha contre 20 kgN/ha en moyenne).

VI. Diagnostic des performances azotées et discussion des résultats

Avec une concentration moyenne de 26 mg/l de nitrates, des pertes annuelles de nitrate de 6 kg N/100 mm de lame d'eau drainante et d'ammoniac de 24 Kg N/ha/an soit 10% des apports, cette situation ne satisfait pas les objectifs (tableau 4).

Tableau 4 : Seuils de satisfaction des pertes en nitrates et en ammoniac du cas-type PI 6

Seuils de pertes	Volatilisation d'ammoniac : > 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : 5 % à 10 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)	Volatilisation d'ammoniac : < 5 % des apports (kg N pour 100 kg N apportés)
Lixiviation de nitrate : < 5 kgN/100 mm de lame d'eau drainante		Haute performance azotée (HPN)	Haute performance azotée (HPN)
Lixiviation de nitrate : 5 à 10 kgN/100 mm de lame d'eau drainante		6 kgN/100 mm de lame d'eau drainante 10 % de NH3 perdu par volatilisation	Haute performance azotée (HPN)
Lixiviation de nitrate : > 10 kgN/100 mm de lame d'eau drainante			

Légende :

	Haute performance azotée (HPN)
	Performance azotée partielle
	Basse performance azotée

La quantité d'azote lixivié s'est avéré sensible aux années à risque (cf. coïncidence entre les lames d'eau maximales et les quantités lixiviées maximales en fin d'automne et en fin d'hiver) mais sur la série climatique (première et dernière année de simulation exclues), elle reste le plus souvent sous le seuil de 5 kg N /ha /an (10 ans), ne dépasse pas 25 kg N /ha /an et n'excède 23 kg N /ha/an qu'à 3 reprises dont 2 sous blé après maïs ensilage, c'est-à-dire sans piégeage automnal d'azote et une fois sous blé après colza.

La comparaison des courbes d'absorption d'azote par le colza, la moutarde ou les repousses de colza - et donc leur capacité à limiter la lixiviation- montre une forte variabilité dépendante des conditions climatiques estivales. La succession d'étés secs et les échecs de ces implantations ces dernières années montre les limites de ce système. Une voie d'amélioration réside donc dans la recherche de modalités d'implantation précoces de couverts voire de semis de CIPAN sous couvert pour augmenter leurs chances de succès. D'autre part, la contribution à l'atténuation du changement climatique suppose l'introduction de légumineuses dans la rotation : culture principale pure (voir cas PI 5) ou association, plante compagne, en mélange dans un couvert qui, à travers la minéralisation de leurs résidus, modifieront la fertilisation de la culture suivante, la dynamique de l'azote dans le sol, les risques de lixiviation et de volatilisation.

Par ailleurs, il faut noter que la profondeur et la charge en éléments grossiers dans les différents horizons du profil, variables dans ce type de sol, influent largement sur sa capacité de rétention et sur la lame drainante. Une pierrosité plus forte ou une profondeur d'enracinement plus faible se traduiront par un risque plus élevé et plus fréquent de lixiviation.

Enfin, la simulation des pertes d'ammoniac est menée à partir de données journalières mais les conditions météorologiques dans les heures qui suivent l'épandage peuvent faire varier les quantités d'ammoniac volatilisées : température élevée, vent, faible humidité du sol constituent des facteurs de volatilisation.

Le choix de la forme de l'azote minéral apporté constitue un levier important pour réduire les émissions d'ammoniac. L'enfouissement, également efficace, suppose un passage ou un équipement

spécifique qui engendre des coûts plus ou moins compensables par les économies réalisables en réduisant les pertes.

VII. Conclusion

Compte tenu de ses performances (perte de 6 kgN pour 100 mm de lame drainante sous forme de nitrate et de 10% des apports sous forme d'ammoniac) cette situation ne peut être qualifiée de situation à haute performance azotée. Elle se caractérise par une certaine sensibilité aux années à risque, notamment lorsqu'elles coïncident avec la succession maïs ensilage / blé en raison de la faible capacité d'absorption du blé à l'automne. En revanche, durant les 3 autres années de la rotation, le colza, ses repousses et le couvert de moutarde permettent le plus souvent de limiter la lixiviation. Maintenir ces atouts suppose de mettre en œuvre tous les moyens de réussir les implantations estivales maïs, sauf à remettre en question la succession maïs ensilage / blé, il existe peu de marge de manœuvre pour limiter le risque de lixiviation durant l'hiver suivant.

En l'absence de légumineuses et malgré un apport de fumier, les apports d'engrais minéraux sont importants et engendrent une volatilisation d'ammoniac d'autant plus forte qu'ils s'effectuent sous forme de solution riche en urée.

Cette situation peut être comparée aux situations PI 2 et PI 7 dont elle ne diffère que par le type de sol (limon battant en PI 2, limon argileux à silex en PI 7), et à d'autres situations en limons battant dont le système de culture diffère aussi par la substitution du maïs ensilage (PI 2) par du maïs grain (PI3) ou de la betterave (PI 5 sans apports organiques), ou l'introduction du pois protéagineux de printemps avant colza (PI 4).

Annexe : Dynamiques sol-plante-atmosphère de l'azote du cas-type PI 6

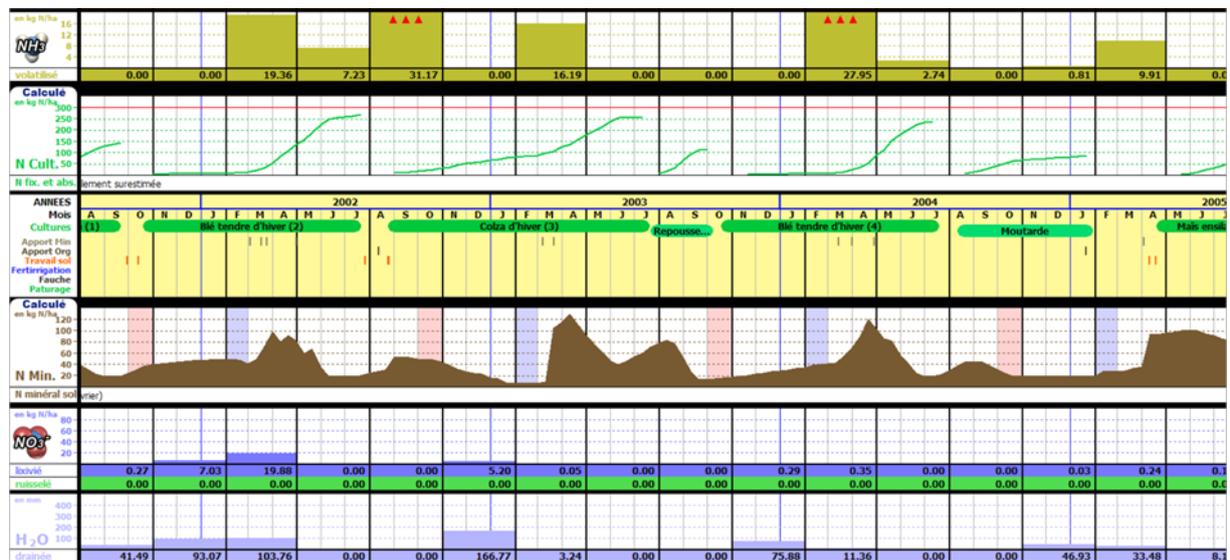


Figure 8 : Dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation de l'été 2001 à 2005.

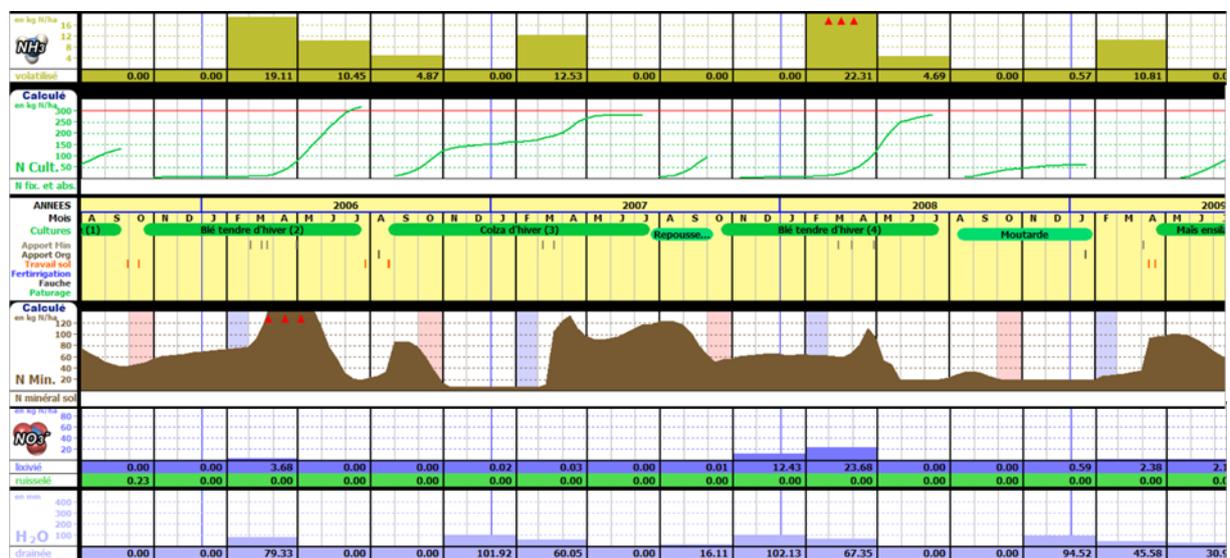


Figure 9 : Dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation de l'été 2005 à 2009.

