

**PI 4 – Rotation maïs ensilage/ blé/pois de printemps/ colza/ blé sur limon battant en Picardie (PI4)**

Intitulé du cas-type	P 4 : Rotation maïs ensilage/ blé/pois de printemps/ colza/ blé sur limon en Picardie
Localisation	Département de l'Oise
Type de sol	Limon battant moyennement profond
Type de climat	Série climatique 2000-2018
Rotation	Maïs ensilage- Blé-Pois de printemps-Colza-Blé
Pratiqué ou prototype	Prototype
N° Cas-types comparables	PI 2, PI 3, PI 5
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 oléoprotéagineux, 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.

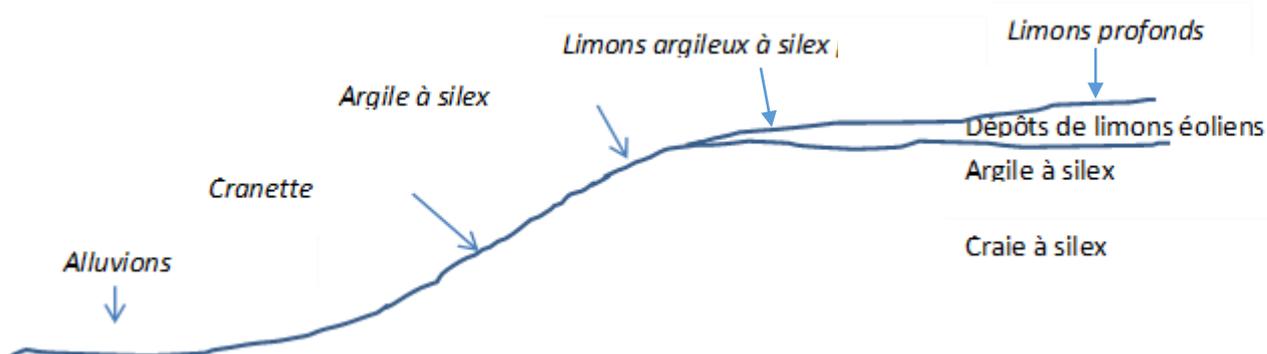


Figure 1 : Répartition typique des sols selon le relief en Plateau Picard

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 présenté**

La rotation maïs ensilage/ blé/colza/ blé qui s'observe dans les exploitations de polyculture-élevage (laitier ou taurillon) est ici allongée par l'introduction d'un protéagineux de printemps avant le colza.

**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).

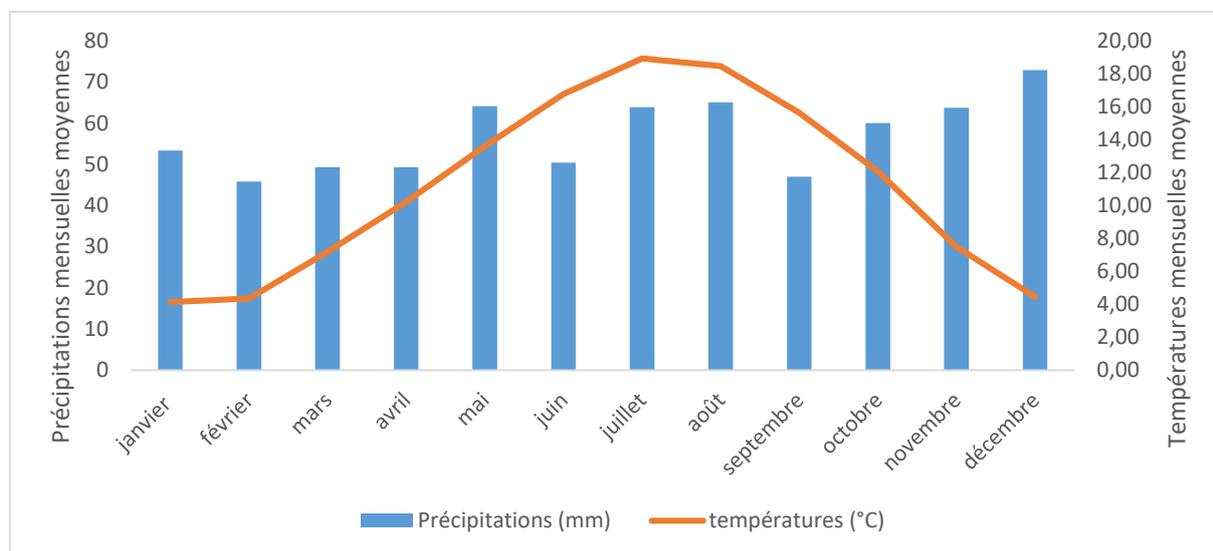


Figure 2 : Diagramme ombrothermique – Beauvais (1999-2018).

**c. Sol sur lequel est « testé » le SdC**

Il s'agit d'un sol de limon battant moyennement profond.

Si ces sols sont considérés comme les plus favorables du Plateau Picard, les rendements, leur régularité et la diversité des cultures possibles dépendent de leur profondeur.

Tableau 1 : caractéristiques physico-chimiques moyennes de ce type de sol dans l'Oise

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Densité apparente	Cailloux (%)	Norg (%)	MO (%)	C/N	CaCO3 (%)	pH <sub>eau</sub>	Cec (meq)
0-30	13.6	77.4	9	1.4	0	0.124	1.88	8.8	0.35	8.2	10.41
30-65	22	22	9	1.5	0						
65-120	24	24	10	1.5	0						

(Texture, densité, pierrosité, CEC d'après la fiche « Limon battant » du Guide Agronomique des Sols de l'Oise, % MO, % CaCo3 d'après analyses)

<b>II. Le système de culture</b>
----------------------------------

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
<b>Couvert de moutarde</b>	Semis mi-août	néant	néant	Peuplement dense Détruit par le gel fin janvier
<b>Maïs ensilage</b>	Labour, herse rotative et semis mi-avril	20 t de fumier de bovins en janvier Solution azotée 39 : 70 N début avril	néant	Récolte mi-septembre 15 T MS / ha
<b>Blé</b>	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
<b>Couvert de graminées</b>	Semis fin juillet	néant	néant	Peuplement clairsemé Destruction chimique mi-novembre
<b>Pois protéagineux de printemps</b>	Semis début mars sur travail superficiel	néant	néant	Récolte mi-juillet 4 t / ha Résidus non exportés
<b>Colza</b>	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
<b>Repousses de colza</b>	néant	néant	néant	Destruction chimique début octobre
<b>Blé</b>	Semis mi-octobre sans travail du sol	Solution azotée 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 suffisamment profonds et 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. L'introduction d'un pois de printemps vise à la fois la diversification des périodes de semis comme levier de maîtrise de la flore adventice et la réduction de la consommation d'engrais azoté. Le pois est inséré avant colza pour permettre la valorisation maximale de la minéralisation de ses résidus.

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.

### 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 :

	<b>Haute performance azotée (HPN)</b>
	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, calculés sur l'ensemble de la succession, ramenés à l'année.

a	Entrées d'azote (kgN/ha/an)	a1 : Apport: fertilisation minérale	134
		a2 : Apport: fertilisation organique	49
		a3 : Fixation biologique d'azote	33
b	Sorties d'azote (kgN/ha/an)	b1 : Exportation par les récoltes	133
		b2 : Exportation par les résidus de cultures exportés de la parcelle	86
c	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		210
d	Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)	d1 : Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	6.7
		d2 : Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	41
		d3 : Nitrate lessivé (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	3
		d4 : Nitrate ruisselé (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0
e	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		68

NB : N mobilisé dans les résidus non exportés : 79 kg N /ha /an

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)	76
a - (b+d)	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)	25
(d3*100)/e	Pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)	4
(d3*100*4.43)/e	Pertes de nitrates par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgNO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /100 mm) ou concentration moyenne en nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) sous le profil (mgNO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l)	20
d2/(a1+a2)	Pertes d'azote sous forme d'ammoniac (NH <sub>3</sub> ) en % des apports totaux	22

NB : 1 kg N = 4.43 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Avec des pertes annuelles de nitrate de 4 kgN/ha/an pour 100 mm de lame d'eau drainante et de 41 Kg N/ha/an par volatilisation de l'ammoniac, cette situation se caractérise par des pertes faibles en nitrates et élevées en ammoniac. L'objectif n'est donc atteint que pour le nitrate et la performance azotée globale du système s'avère partielle.

Le bilan apparent est élevé (76 kg N/ha/an) et, compte tenu des pertes (3 kg N/ha/an par lixiviation et 41 kg N/ha/an par volatilisation), le stock d'azote total augmente (+ 25 kg N/ha/an).

Minéralisation nette de l'azote organique du sol et des résidus et fertilisation minérale (210 + 134 = 344 kgN/ha/an) dépassent très largement les exportations par les récoltes (133 kg N/ ha/an) et, même si une partie de cet excédent est mobilisé dans les résidus non exportés (86 kg N /ha /an) ou perdue par volatilisation, la quantité d'azote minéral en jeu apparaît très élevée.

**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.

**Lixiviation des nitrates**

En moyenne, sur les 3 cycles de la rotation,

- la période de drainage a lieu en automne et hiver et la quantité d’eau drainée est
  - faible sous colza,
  - assez faible sous blé à l’automne et en fin d’hiver sauf sous le blé qui suit le maïs (drainage plus élevé en automne)
  - moyenne sous couvert de graminée avant pois à l’automne et en fin d’hiver
  - nulle sous moutarde en automne puis moyenne jusqu’à l’été avant et au début de la culture de maïs
- les pertes de nitrate sont nulles ou très faibles (en fin d’hiver sous blé après maïs ou avant pois).

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.

L’analyse de la dynamique des pertes moyennes d’azote par lixiviation sur l’ensemble de la série climatique pour une rotation entamée en 2001 avec la moutarde confirme que les pertes trimestrielles ne dépassent pas 10 kg N /ha sauf 3 années sur 4 en fin d’hiver sous blé après maïs (17 à 19 kg N /ha).

En revanche, la quantité d’azote minéral dans le sol connaît de grandes variations dans l’année et selon les apports et l’absorption par les cultures ou les couverts. Toutefois, sur la période étudiée, ces variations ne diffèrent que peu et seulement en amplitude suivant les scénarii climatiques.

A titre d’exemple, la figure 5 présente les dynamiques des pertes moyennes d’azote par lixiviation et volatilisation, l’évolution de la quantité d’azote minéral dans le sol et dans la culture de l’été 2005 à l’été 2010.

A l’issue de la culture de blé qui suit le colza en 2006, le stock d’azote minéral du sol est assez élevé. Malgré les prélèvements par la moutarde -modestes- et le maintien des pailles, il connaît une augmentation sous l’effet de la minéralisation de la matière organique du sol, de l’apport de fumier fin janvier puis de l’apport minéral début avril. Il atteint des valeurs extrêmement élevées et reste considérable jusqu’à la fin du printemps 2007 en dépit de l’azote absorbé par le maïs en 2006 puis par le blé et de la forte volatilisation qui affecte les apports minéraux sur blé. Ce niveau extrême du stock se traduit par la lixiviation de 20 kg N / ha sous le blé en fin d’hiver 2007. Il alimente la croissance du couvert de graminées en fin d’été 2007 qui parvient à le réduire nettement et contribue ainsi à limiter la lixiviation de fin d’hiver avant le démarrage du pois de printemps. Malgré la fixation symbiotique qui bénéficie au pois, celui-ci prélève assez d’azote minéral pour maintenir le stock à un niveau moyen durant l’été 2008 mais la minéralisation de ses résidus (riches en azote) s’ajoute à celle du lisier apporté en août et entraîne une forte augmentation du pool minéral en fin d’été. La croissance et les besoins précoce du colza en azote et en eau permettent de réduire à la fois ce stock et la lame drainante, évitant ainsi la lixiviation hivernale. Un nouveau pic est observé en mars 2009 du fait des apports minéraux de printemps mais rapidement consommé par la croissance de la culture. En fin d’été, ses repousses parviennent à maintenir le stock à un niveau particulièrement faible, malgré la minéralisation de la matière organique du sol et des résidus du colza. Ainsi, en dépit des faibles besoins

du blé et d'une forte lame drainante en fin d'hiver 2009-2010, la lixiviation généralement observée sous blé de colza est évitée.

#### **Emissions d'ammoniac**

En moyenne, sur les 3 cycles de la rotation, les émissions d'ammoniac sont élevées et apparaissent plus fortes et plus tardives sur blé. Elles se produisent principalement en fin d'hiver début de printemps à l'occasion lors des apports minéraux (sous forme de solution azotée 39 dont 50 % de l'azote se présente sous forme d'urée plus favorable à la volatilisation) et des apports de fumier avant le maïs en fin d'hiver et de lisier avant colza en fin d'été. Ces émissions sont favorisées par le pH élevé du sol.

La variabilité interannuelle des émissions résultant de différences de température et d'humidité du sol reste faible avec des écarts de l'ordre de 10 % pour une même combinaison période \* culture, à l'exception des émissions liées aux apports de lisier avant implantation du colza (de 17 à 36 kg N/ha) et de fumier avant maïs (7 à 13 kg N / ha).

Cas-type PI 4 – Système polyculture-élevage sur limon battant en Picardie

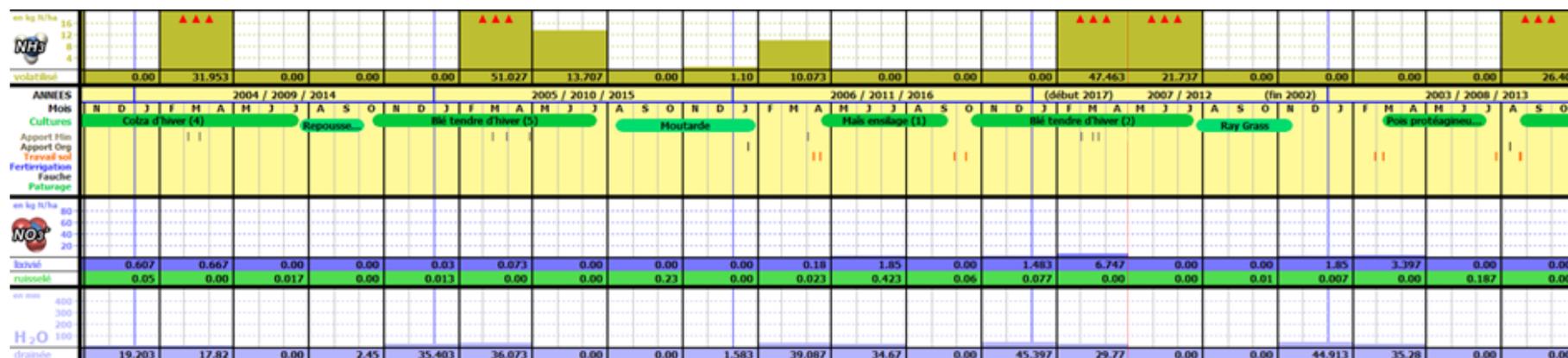


Figure 4 : dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation simulées sur les 18 années climatiques.

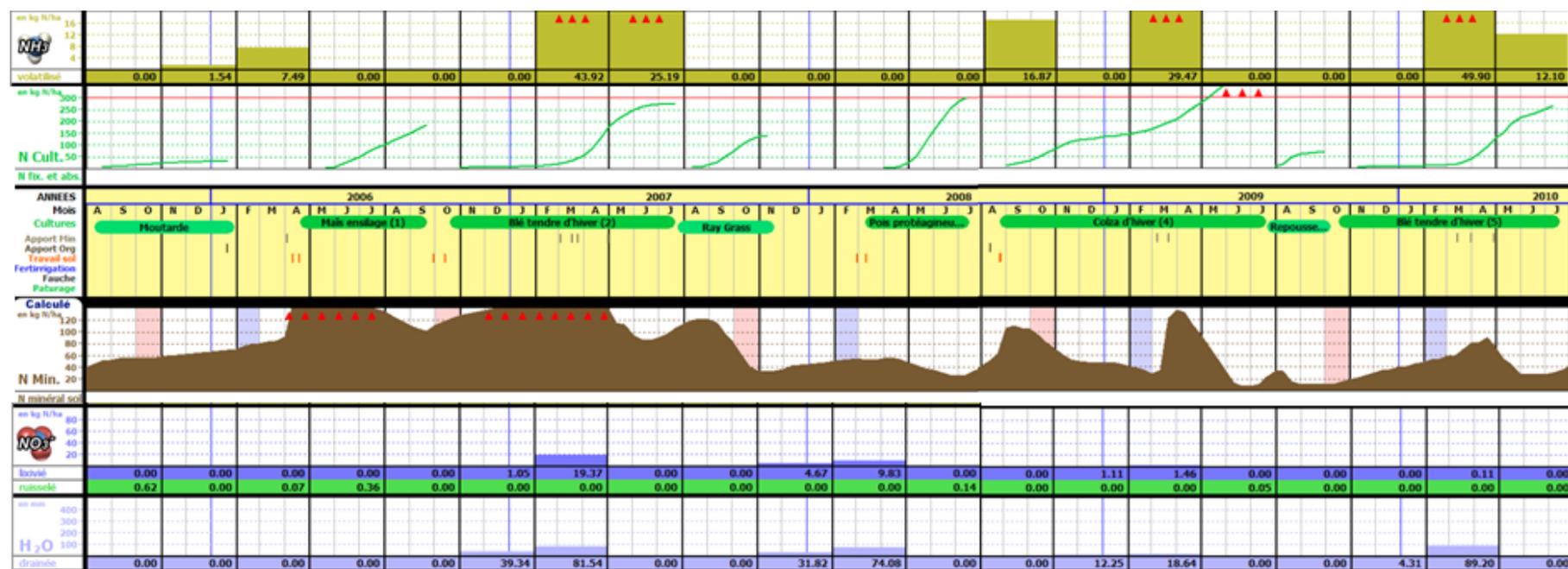


Figure 5 : Dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation, évolution de la quantité d'azote minéral dans le sol et dans la culture de l'été 2005 à l'été 2010.

**VI. Discussion des résultats – diagnostic sur les performances azotées et les pertes**

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	4 kgN lixivié / 100 mm d'eau drainée et 22% de l'azote total apporté volatilisé	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 :

	<b>Haute performance azotée (HPN)</b>
	Performance azotée partielle
	Basse performance azotée

Avec des pertes annuelles de nitrate par lixiviation de 3 kg/ ha/ an et de 22 % des apports par volatilisation de l'ammoniac, cette situation se caractérise par des pertes de nitrate faibles et d'ammoniac élevées. L'objectif n'est donc atteint que pour le nitrate et la performance azoté du système s'avère insuffisante.

Les faibles pertes de nitrates s'expliquent par la conjonction d'une lame d'eau drainante faible et de l'absorption d'une partie de la minéralisation d'été et d'automne par les repousses de colza, le couvert de moutarde qui précède le maïs et le couvert de graminée avant pois. Toutefois, la forte minéralisation et les apports organiques fréquents (2 années /5) constituent des facteurs de risque qui s'expriment plus particulièrement par un stock d'azote minéral élevé à la récolte du maïs ensilage et surtout très élevé au début de l'hiver suivant en raison des faibles besoins en azote du blé à l'automne. Dans une moindre mesure, l'apport de lisier réalisé avant colza sur des résidus de pois riches en azote s'ajoute à la minéralisation des matières organiques du sol et entraîne un nouveau pic d'azote minéral.

Dans cette situation, la quantité N lixiviée s'est avérée peu sensible aux années à risque sur 3 cycles étudiés. Ainsi, la période la plus critique de la rotation, c'est-à-dire l'hiver qui suit le maïs ensilage, connaît à 3 reprises une forte lame drainante entre novembre et avril (de 100 à 170 mm) qui n'entraîne la lixiviation que de 20 kg N /ha au maximum.

Les fortes pertes d'ammoniac résultent conjointement d'un pH élevé et d'apports minéraux sous une forme favorable à la volatilisation (solution azotée) ou organiques sans enfouissement rapide (apport de fumier en janvier pour un labour d'avril, apport de lisier en été). La forme des apports minéraux et les modalités d'enfouissement du fumier et du lisier constituent donc les leviers d'amélioration majeurs.

Le pH de ce type de sol n'atteint de telles valeurs que par des apports d'amendement calcique (classiquement des écumes de sucrerie). Dans les parcelles présentant un pH plus proche de la neutralité, les pertes seront probablement plus faibles.

En outre, la simulation 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.

## VII. Conclusion

Cette situation présente des pertes en nitrates faibles (3 kg / ha/ an pour 100 mm d'eau drainante) et peu sensibles aux années à risque, grâce à une lame d'eau drainante faible et l'absorption d'une partie de la minéralisation d'été et d'automne par les repousses de colza, le couvert de moutarde et, le couvert de graminées entre blé et pois. La forte minéralisation et les apports organiques fréquents (2 années /5) constituent cependant un facteur de risque car à l'origine d'un stock d'azote minéral élevé à la récolte du maïs ensilage et surtout très élevé au début de l'hiver suivant.

Les fortes pertes d'ammoniac (22 % des apports) résultent d'un pH élevé et d'apports minéraux sous forme de solution azotée ou d'apports organiques sans enfouissement rapide mais sont susceptibles d'être minorées ou majorées par les conditions météorologiques dans les heures qui suivent l'épandage.

Ce cas-type peut être comparé avec :

- le cas PI 2 qui s'en distingue par l'absence du pois protéagineux de printemps,
- le cas PI 3 qui ne comporte pas de pois protéagineux et dont le maïs est récolté en grain
- le cas PI 5 qui ne comporte pas de pois protéagineux ni d'apports organiques et dans lequel le maïs est remplacé par la betterave sucrière.