

PI3 – Rotation maïs grain-blé-colza-blé sur limon battant en Picardie

Intitulé du cas-type	PI 3 : Rotation maïs grain-blé-colza-blé sur limon battant en Picardie
Localisation	Département de l’Oise
Type de sol	Limon battant moyennement profond
Type de climat	Série climatique 2000-2018
Rotation	Maïs grain- Blé-Colza -Blé
Pratiqué ou prototype	Pratiqué
N° Cas-types comparables	PI2, PI4, PI5, PI6, PI7
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.

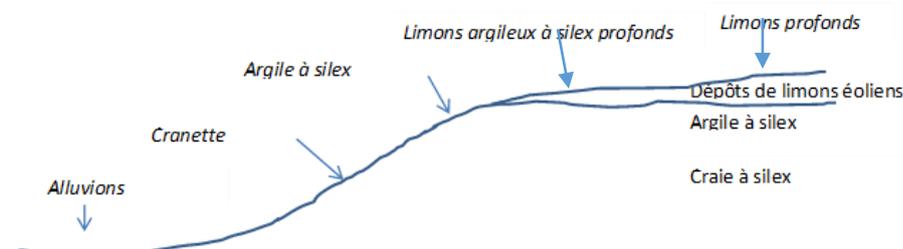


Figure 1 : Répartition typique des sols selon le relief en Plateau Picard

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 présenté

Ce système de culture caractérisé par une rotation simple avec maïs grain et cultures d’hiver (colza/blé/escourgeon) s’observe dans les exploitations de polyculture-élevage (laitier ou taurillon), notamment en année favorable lorsque les besoins en maïs étant couverts, le reste de la sole de maïs (majorée par précaution) est finalement récoltée en grain.

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 (Figure 2). 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).

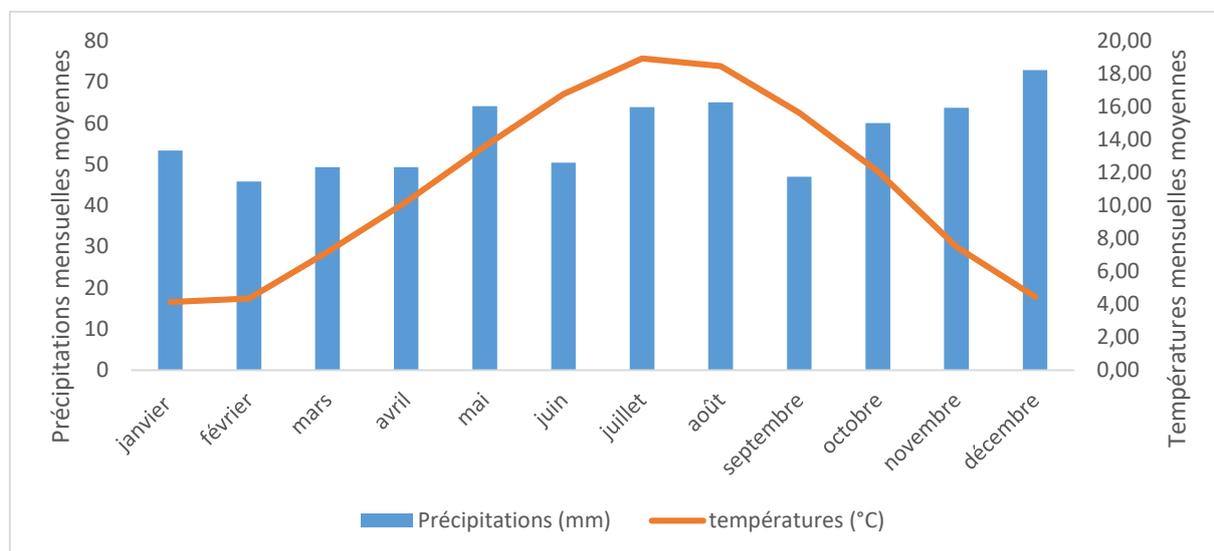


Figure 2 : Diagramme ombrothermique – Beauvais (1999-2018).

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 du sol.

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Densité apparente	Cailloux (%)	Norg (%)	MO (%)	C/N	CaCO ₃ (%)	pH _{eau}	Cec (meq)
0-30	13.6	77.4	9	1.4	0	0.13	2	8.8	0.3	8	10.41
30-65	22	22	9	1.5	0						
65-120	24	24	10	1.5	0						

(Texture, densité, pierrosité, % MO, % CaCO₃, CECE d'après la fiche « Limon battant » 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 grain	Labour, herse rotative et semis mi-avril	20 t de fumier de bovins en janvier Sol 39 : 70 N début avril	néant	Récolte fin octobre 8.5 t / 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 Sol 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	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 déficit fourrager en cas de déficit hydrique, la sole majorée d'une marge de sécurité qui est 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 étant jugée exigeante en main d'œuvre et couteuse 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 corrigées en fonction des dates 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	148
		b2 Exportation par les résidus de récolte exportés	8
c	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		199
d	Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)	d1 Protoxyde d'azote (N ₂ O)	7.2
		d2 Ammoniac (NH ₃)	48
		d3 Nitrate lixivié (NO ₃ ⁻)	1
		d4 Nitrate ruisselé (NO ₃ ⁻)	0
e	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		65

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)	74
a - (b+d)	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)	17
(d3*100)/e	Pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)	2
(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)	7
d2/(a1+a2)	Pertes d'azote sous forme d'ammoniac (NH ₃) en % des apports totaux	21

NB : 1 kg N = 4.43 kg NO₃

Avec des pertes annuelles de nitrate par lixiviation de 2 kg / ha / an pour 100 mm de lame d'eau drainante et de 21 % des apports par volatilisation de l'ammoniac, cette situation se caractérise par des pertes de nitrate négligeables et des pertes d'ammoniac élevées. Elle ne satisfait donc pas les objectifs.

Le bilan apparent est excédentaire (74 kg N/ha/an) mais, compte tenu des pertes (1 kg N/ha/an par lixiviation et 48 kg N/ha/an par volatilisation), le stock d'azote total n'augmente que faiblement (+ 17 kg N/ha/an).

La minéralisation nette de l'azote organique du sol, des résidus de culture et la fertilisation minérale (204 + 168 = 372 kgN/ha/an) dépassent très largement les exportations (148+ 8 kg N/ ha/an) et, même si une partie de cet excédent est mobilisé dans les résidus non exportés (52 kg N /ha /an) ou perdue par volatilisation, la quantité d'azote minéral en jeu apparaît très élevée.

La combinaison de pertes de nitrates négligeables et d'une faible lame drainante se traduit par une concentration en nitrate sous le profil faible.

Les pertes d'ammoniac sont 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.

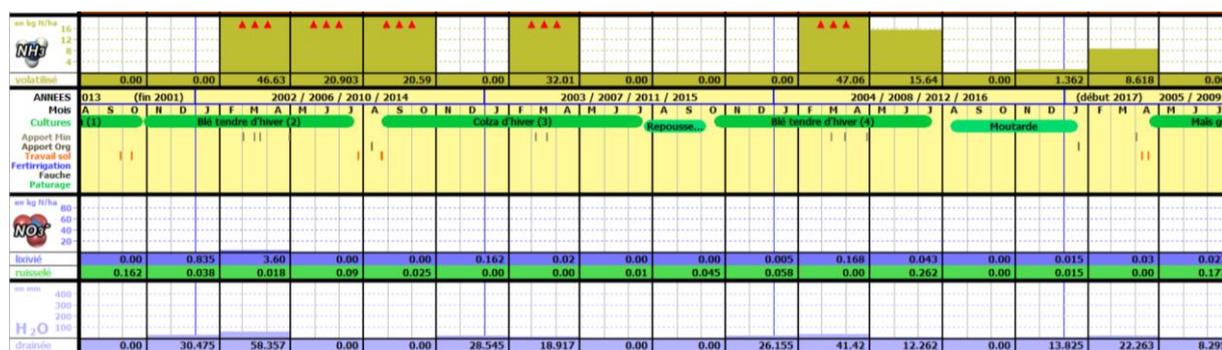


Figure 4 : dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation simulées sur les 18 années climatiques.

Lixiviation des nitrates

En moyenne, sur les 4 cycles de la rotation,

- la période de drainage a lieu en automne et hiver et la quantité d'eau drainée apparaît
 - o moyenne sous colza à l'automne et faible en fin d'hiver,
 - o moyenne sous blé à l'automne puis assez élevée en fin d'hiver (particulièrement sous le blé qui suit le maïs grain)
 - o assez faible sous moutarde
- les pertes par lixiviation sont nulles ou quasi nulles.

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 du drainage et des pertes de nitrate par lixiviation sur l'ensemble de la série climatique confirme que la lame drainante hivernale ne dépasse 100 mm qu'à 3 reprises et qu'un seul épisode de lixiviation -limité à 9 kg N/ha- est observé sous blé après maïs grain pour une lame drainante hivernale de 168 mmm.

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 diffèrent assez peu suivant les scénarii climatiques.

A titre d'exemple, la figure 5 présente les dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation de l'été 2009 à l'été 2013 d'une part (partie supérieure), l'évolution de la quantité d'azote minéral dans le sol et dans la culture d'autre part (partie inférieure).

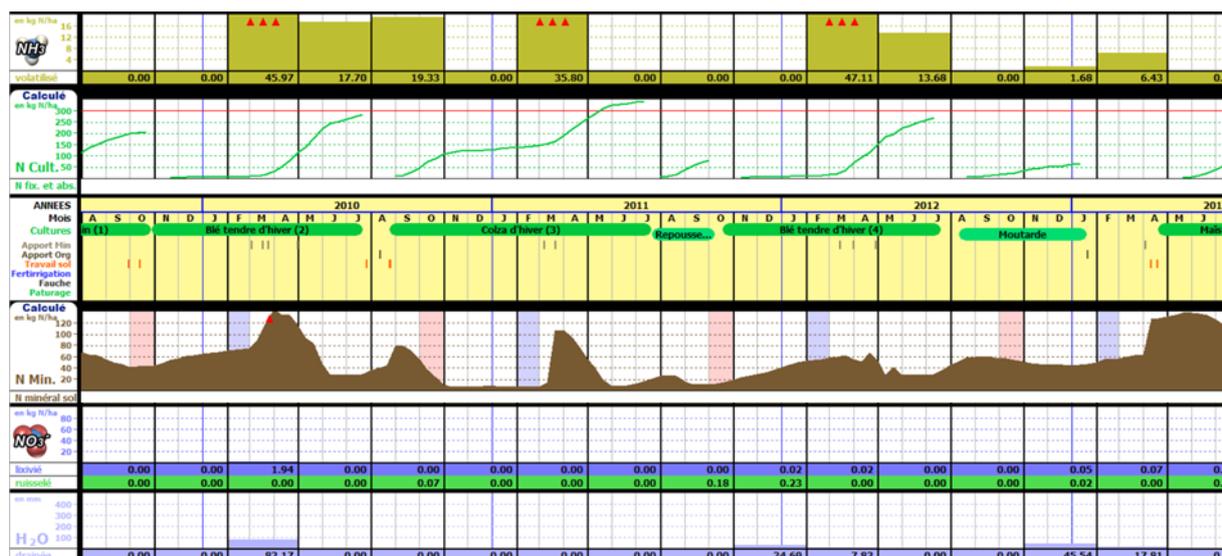


Figure 5 : Dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation, évolution de la quantité d'azote minéral dans le sol et dans la culture de l'été 2009 à l'été 2013.

A la récolte du maïs grain, malgré les prélèvements par la culture durant l'été 2009, en raison de la minéralisation estivale des matières organiques et du fumier apporté avant l'implantation, le stock d'azote minéral du sol est assez élevé. Il continue d'augmenter en fin d'automne, en l'absence d'absorption significative par le blé à l'automne puis connaît un pic avec les apports de fin d'hiver et de printemps. Toutefois, le drainage, assez élevé entre février et avril, ne se traduit que par une très faible lixiviation, grâce à la mobilisation du stock par le couvert en croissance. Celui-ci consomme une grande part du stock mais la quantité d'azote minéral augmente à nouveau en été 2010 sous l'effet de minéralisation estivale des matières organiques du sol. L'implantation précoce du colza et sa croissance à l'automne permettent une réduction de la quantité d'azote minéral à un niveau minimal et contribuent également à la limitation de la lame drainante, d'où l'absence de lixiviation. Un nouveau pic s'observe avec les apports de fin d'hiver mais est rapidement consommé par la culture et à la récolte du colza le stock est à nouveau très faible. Il augmente légèrement avec la minéralisation estivale mais est absorbé par les repousses de colza. Faute de prélèvements par le blé qui suit, la minéralisation des repousses et de la matière organique du sol entraîne une augmentation du stock. Cependant, la combinaison d'une lame drainante et d'un reliquat minéral moyens permet d'éviter la lixiviation. Le stock augmente avec les apports de fin d'hiver et de printemps puis mais reste, à date comparable, reste toujours nettement inférieur à celui observé sous blé après maïs. Il diminue en fin de printemps avec la forte absorption par le blé sans atteindre le niveau minimal constaté après colza. La moutarde limite l'augmentation du stock due à la minéralisation des matières organiques du sol et le reliquat entrée hiver moyen est suffisamment faible pour ne pas être affecté par un drainage modéré en fin d'automne et faible en fin d'hiver. L'apport précoce de fumier et les apports minéraux à l'implantation induisent dès avril forte augmentation du stock que la croissance du maïs finit par entamer significativement en juillet.

Emissions d'ammoniac

En moyenne, sur les 4 cycles de la rotation, les émissions d'ammoniac, élevées, concernent surtout colza et blé 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 0 à 34 kg N/ha).

VI. Diagnostic des performances azotées et discussion des résultats

Avec des pertes annuelles de nitrate par lixiviation de 1.5 kg N/ha pour 100 mm de lame drainante et des pertes par volatilisation de l'ammoniac de 21 % des apports, cette situation se caractérise par des pertes de nitrates faibles et d'ammoniac élevées. L'objectif n'est donc atteint que pour le nitrate et la performance azoté du système s'avère partielle (Tableau 4).

Tableau 5 : Seuils de satisfaction des pertes en nitrates et en ammoniac du cas-type PI 3

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	Volatilisation = 21% des apports Lixiviation = 2 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

Dans cette situation, la quantité N lixiviée s'est avérée peu sensible aux années à risque malgré une simulation de la rotation menée sur 4 scénarii climatiques. La période la plus critique de la rotation, c'est-à-dire l'hiver qui suit le maïs grain, connaît une année sur 4 une forte lame drainante (de 168 mm) entre novembre et avril qui n'entraîne la lixiviation que de 9 kg N /ha au maximum. Malgré un drainage de 140 mm entre novembre 2007 et mars 2008, sous le blé qui suit les repousses de colza, le stock d'azote minéral ne subit pas de lixiviation.

Les faibles pertes de nitrates s'expliquent par la conjonction d'une lame d'eau drainante faible d'une part et de l'absorption d'une partie de la minéralisation d'été et d'automne par les repousses de colza, le couvert de moutarde et, dans une moindre mesure le maïs grain. Toutefois, la forte minéralisation et les apports organiques fréquents (2 années /4) constituent un facteur de risque qui s'exprime plus particulièrement par un stock d'azote minéral assez élevé à la récolte du maïs grain et surtout au début de l'hiver suivant en raison des faibles besoins en azote du blé à l'automne.

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). 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.

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.

VII. Conclusion

Cette situation présente des pertes en nitrates faibles (1.5 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, dans une moindre mesure le maïs grain. La forte minéralisation et les apports organiques fréquents (2 années /4) constituent cependant un facteur de risque car à l'origine d'un stock d'azote minéral assez élevé à la récolte du maïs grain et surtout au début de l'hiver suivant.

Les pertes d'ammoniac (37 % 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 ne s'en distingue que par la date de récolte du maïs, récolté en ensilage et non en grain.

De même, la betterave sucrière se substitue au maïs dans le cas PI 5 et un pois protéagineux de printemps est introduit avant colza dans le cas PI 4.

Enfin, le système de culture du cas PI 2 est appliqué en argile à silex dans le cas PI 6 et en limon argileux à silex dans le cas PI 7.