

PI 2 – Rotation maïs ensilage-blé-colza sur limon battant en Picardie

Intitulé du cas-type	Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur limon en Picardie – PI2
Localisation	Département de l’Oise
Type de sol	Limon battant moyennement profond
Type de climat	Série climatique 2000-2018
Rotation	Maïs ensilage- Blé-Colza -Blé
Pratiqué ou prototype	Pratiqué
N° Cas-types comparables	PI3, 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 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.

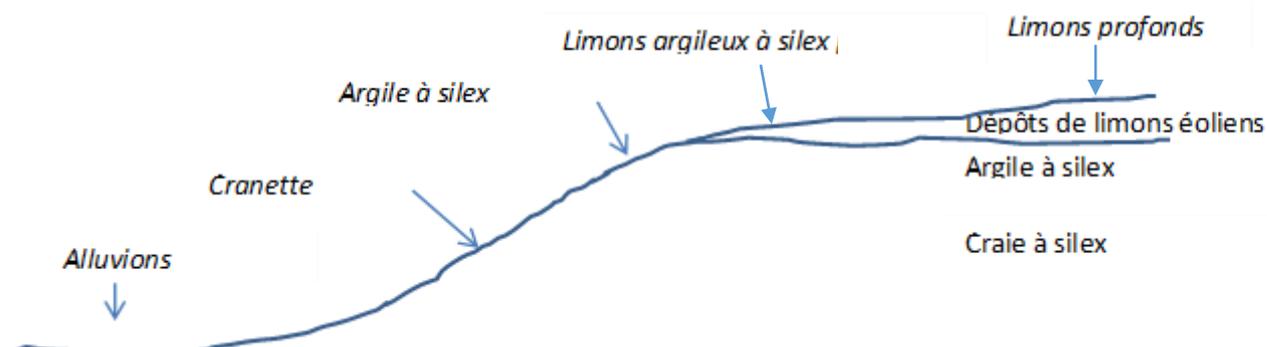


Figure 1 : Répartition typique des sols selon le relief en Plateau Picard

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

Ce système de culture caractérisé par une rotation simple avec maïs ensilage et cultures d’hiver (colza/blé/escourgeon) 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)

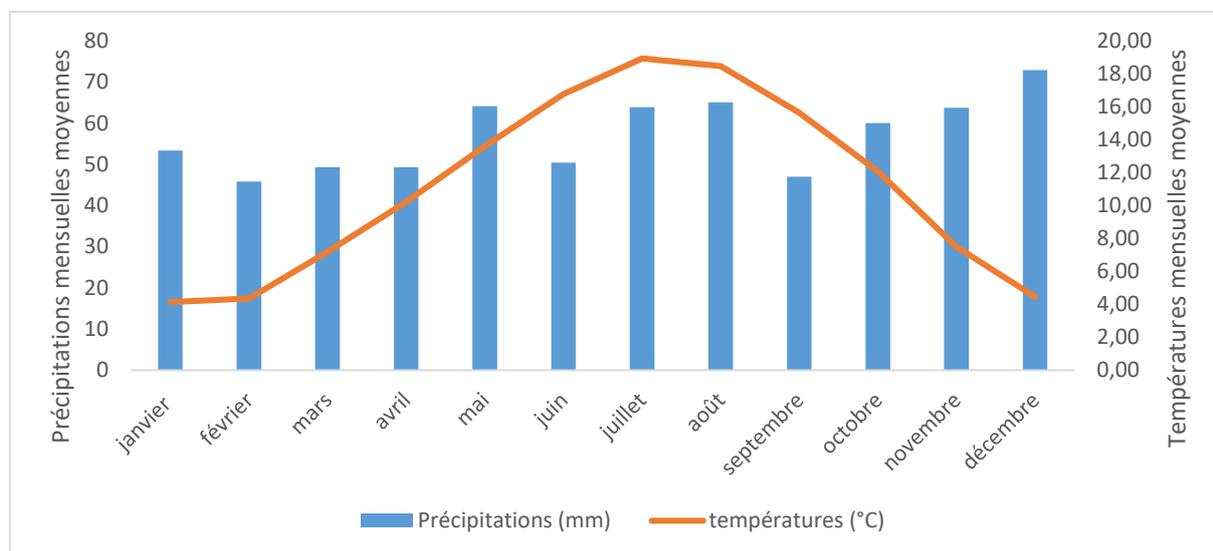


Figure 2 : Diagramme ombrothermique – Beauvais (1999-2018).

c. Sol sur lequel est « testé » le SdC

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	CaCO3 (%)	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, Cec 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 ensilage	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
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	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.

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 exigeante en main d'œuvre et coûteuse 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, calculés sur l'ensemble de la succession, ramenés à l'année.

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 (kgN/ha/an)	b1 : Exportation par les récoltes	129
		b2 : Exportation par les résidus de cultures exportés de la parcelle	8
c	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		204
d	Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)	d1 : Protoxyde d'azote (N ₂ O)	7.4
		d2 : Ammoniac (NH ₃)	48
		d3 : Nitrate lessivé (NO ₃ ⁻)	2
		d4 : Nitrate ruisselé (NO ₃ ⁻)	0
e	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		63

NB : N mobilisé dans les résidus non exportés : 94 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)	92
a - (b+d)	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)	35
(d3*100)/e	Pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)	3
(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)	14
d2/(a1+a2)	Pertes d'azote sous forme d'ammoniac (NH ₃) en % des apports totaux	24

NB : 1 kg N = 4.43 kg NO₃⁻

Avec des pertes annuelles de nitrate par lixiviation 3 kg / ha/ an par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante et de 24 % des apports 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 du système s'avère insuffisante.

Le bilan apparent est élevé (92 kg N/ha/an) et, compte tenu des pertes (2 kg N/ha/an par lixiviation et 48 kg N/ha/an par volatilisation), le stock d'azote total augmente (+ 35 kg N/ha/an).

Minéralisation nette de l'azote organique du sol et des résidus et fertilisation minérale (204 + 168 = 372 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 (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.

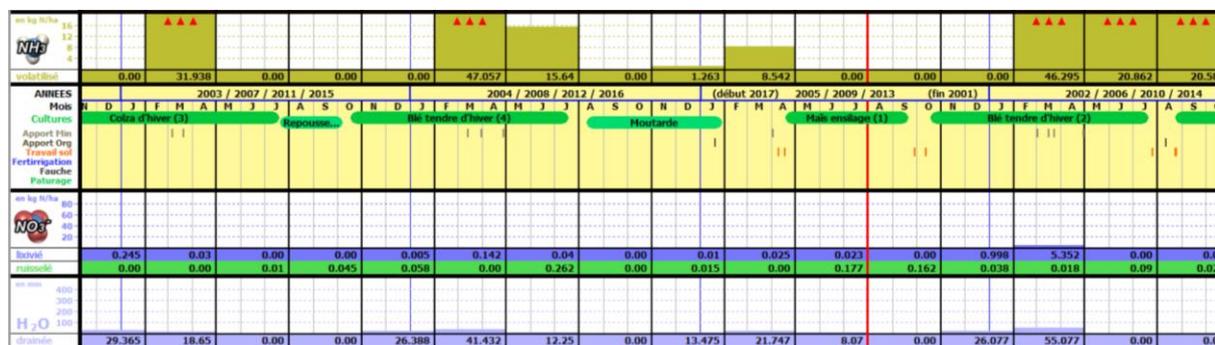


Figure 4 : dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation simulées sur les 18 années climatiques.

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 assez faible sous colza à l'automne et faible en fin d'hiver,
 - o faible sous blé à l'automne puis augment en fin d'hiver (particulièrement sous le blé qui suit le maïs)
 - o 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 moyennes d'azote par lixiviation sur l'ensemble de la série climatique confirme que la lame drainante ne dépasse pas 70 mm / trimestre tant en début qu'en fin d'hiver sauf entre février et avril 2002 (110 mm), seule période où un phénomène de lixiviation est observé sous blé après maïs ensilage (17 kg N/ ha) et entre février et juillet 2016 (136 mm) sous blé mais sans perte de nitrate.

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 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 2006 à l'été 2010 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).

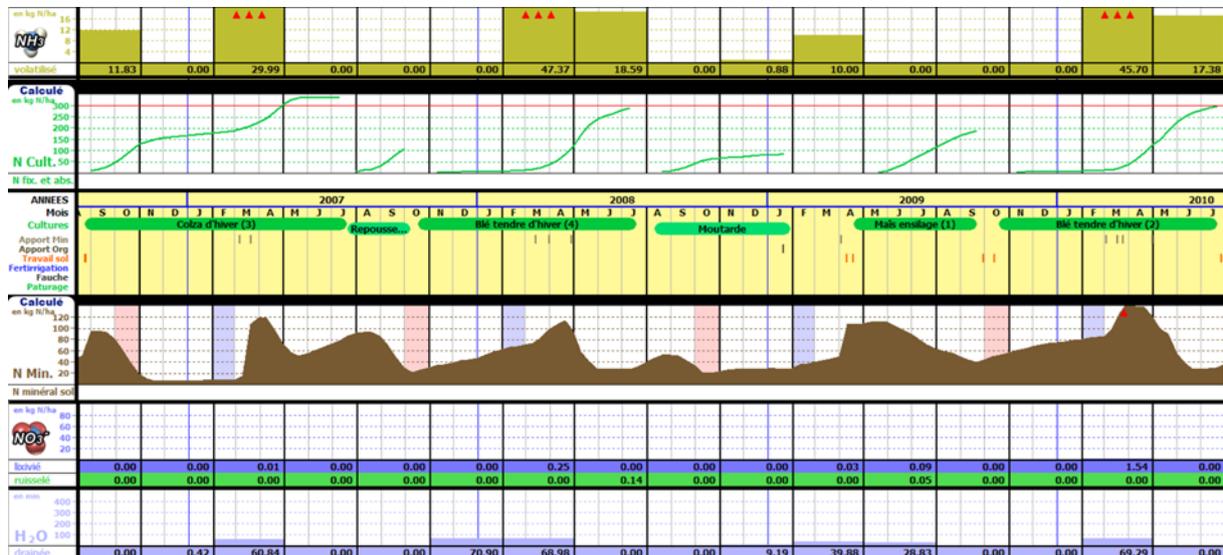


Figure 5 : Dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation, évolution de la quantité d'azote minéral dans le sol et dans la culture de l'été 2006 à l'été 2010.

Les besoins précoces du colza absorbent le produit de la minéralisation estivale des matières organiques du sol et du lisier et maintiennent ainsi le stock fin 2006 à un niveau très faible qui se traduit par l'absence de lixiviation malgré une lame drainante moyenne et les apports minéraux en fin d'hiver (il est vrai amputés par une forte volatilisation). Au printemps la croissance rapide du colza mobilise une part importante de l'azote apporté mais la quantité d'azote minéral dans le sol connaît une forte

augmentation en fin de printemps -début d'été avec la minéralisation des matières organiques du lisier puis du sol qui coïncide avec la fin de l'absorption par la culture.

L'effet des repousses de colza (absorption de l'ordre de 100 kg N/ ha) sur la quantité d'azote minéral dans le sol apparaît très nettement (- 60 kg N/ ha). Leur destruction à l'implantation du blé -dont les prélèvements automnaux sont négligeables- se traduit par une reprise de l'augmentation du stock d'azote minéral du sol sous l'effet de la minéralisation automnale des matières organiques du sol, des repousses maïs dans des limites qui suffisent à neutraliser l'effet des lames drainantes -moyennes- de novembre 2007 à avril 2008.

Fin mars début avril 2008 le pic d'azote minéral dans le sol consécutif aux apports est contenu puis réduit par la volatilisation et la forte croissance des besoins du blé et laisse à la récolte en juillet 2008 environ 30 kg N/ha dans le sol.

L'implantation de la moutarde permet d'absorber le produit de la minéralisation estivale et automnale des matières organiques du sol et de maintenir ce niveau jusqu'en février sans lixiviation

Malgré les pertes par volatilisation -modérées-, la quantité d'azote minéral dans le sol augmente fortement avec l'apport de fumier en janvier 2009 puis les apports minéraux. Elle se maintient à un niveau élevé pendant plusieurs mois pour ne diminuer significativement qu'en d'été. Les besoins tardifs et limités du maïs ne permettent pas d'atteindre un stock de moins de 40 kg N /ha à la récolte, auquel s'ajoutera la minéralisation automnale des matières organiques du sol et du fumier que les faibles besoins du blé ne viennent pas compenser. Il atteint ainsi durant l'hiver 2009/2010 un niveau exceptionnel de 80 kg N/ha qui, grâce à une lame d'eau drainante modérée n'entraîne qu'une lixiviation négligeable, et dépasse 120 kg N/ ha avec la fertilisation minérale de printemps.

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. 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	3 kgN lixivié / 100 mm d'eau drainée et 21% 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 :

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

Avec des pertes annuelles de nitrate par lixiviation de 3 kg/ ha/ an et de 21 % des apports 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 du système s'avère partielle.

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. 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 175 à 200 mm) qui n'entraîne la lixiviation que de 25 kg N/ha au maximum.

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 ensilage. 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 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.

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.

VI. 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 moyenne 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 ensilage. 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 élevé à la récolte du maïs ensilage et surtout très élevé au début de l'hiver suivant.

Les pertes d'ammoniac (21 % 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 3 qui ne s'en distingue que par la date de récolte du maïs, récolté en grain et non en ensilage.

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.

Annexe : Dynamiques sol-plante-atmosphère de l'azote du cas-type PI 2

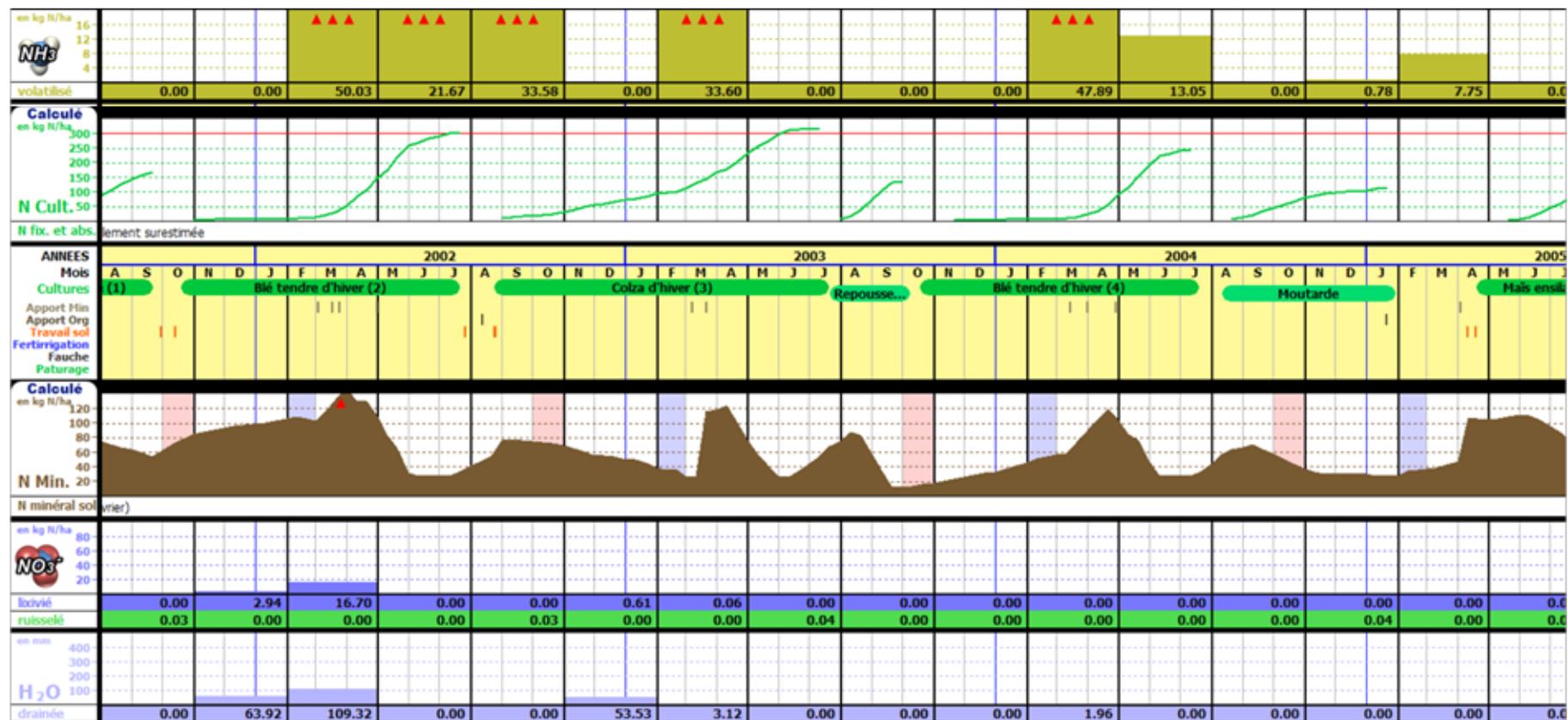


Figure 6 : Dynamiques de l'azote au sein des peuplements végétaux, dans le profil de sol et pertes d'azote par lixiviation (NO₃⁻) et volatilisation (NH₃) et lame d'eau drainante (mm) – Période 2002-2005.

Cas-type PI 2 – Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur limon battant en Picardie

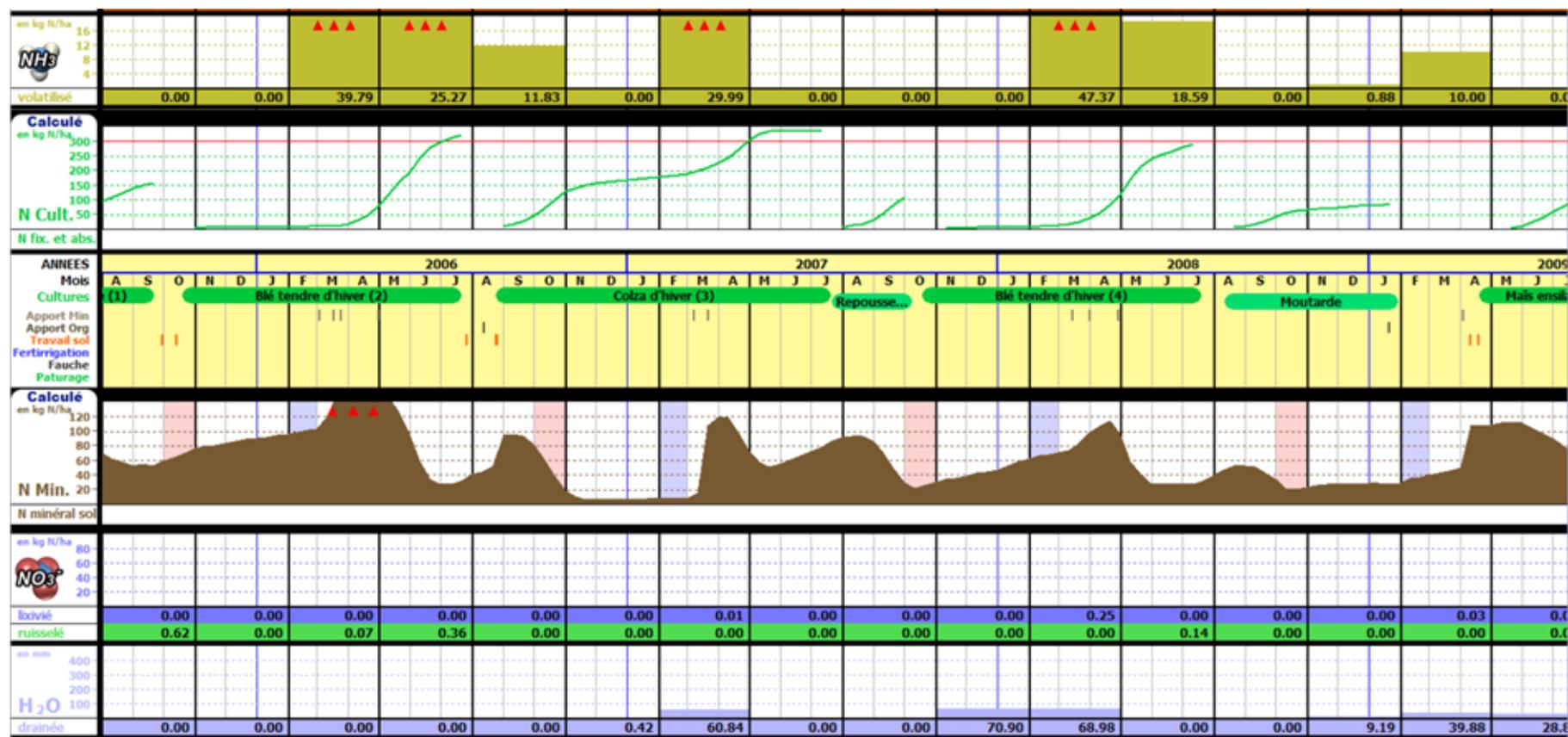


Figure 7 : Dynamiques de l'azote au sein des peuplements végétaux, dans le profil de sol et pertes d'azote par lixiviation (NO₃⁻) et volatilisation (NH₃) et lame d'eau drainante (mm) – Période 2005-2009.

Cas-type PI 2 – Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur limon battant en Picardie

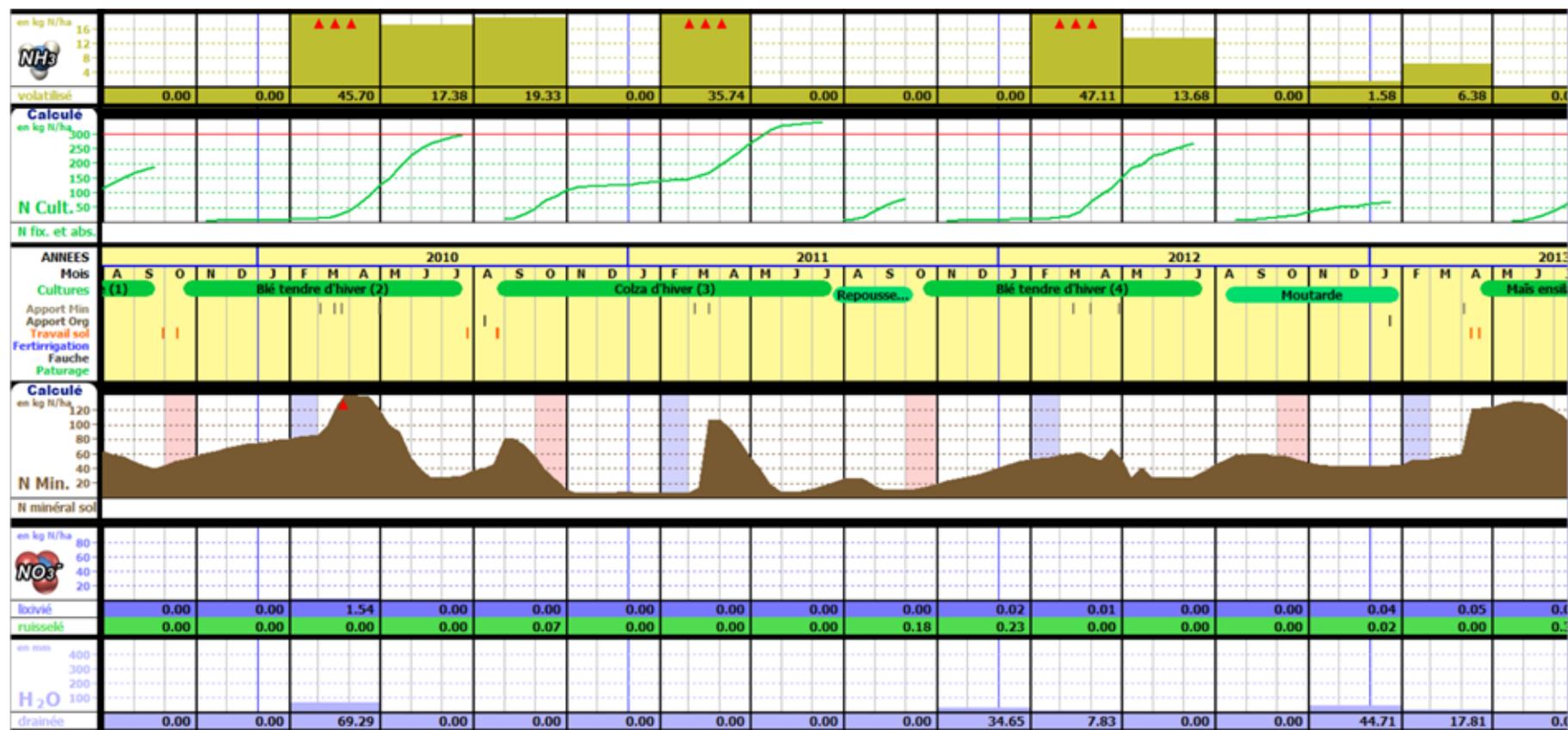


Figure 8 : Dynamiques de l'azote au sein des peuplements végétaux, dans le profil de sol et pertes d'azote par lixiviation (NO₃) et volatilisation (NH₃) et lame d'eau drainante (mm) – Période 2009-2013.

Cas-type PI 2 – Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur limon battant en Picardie

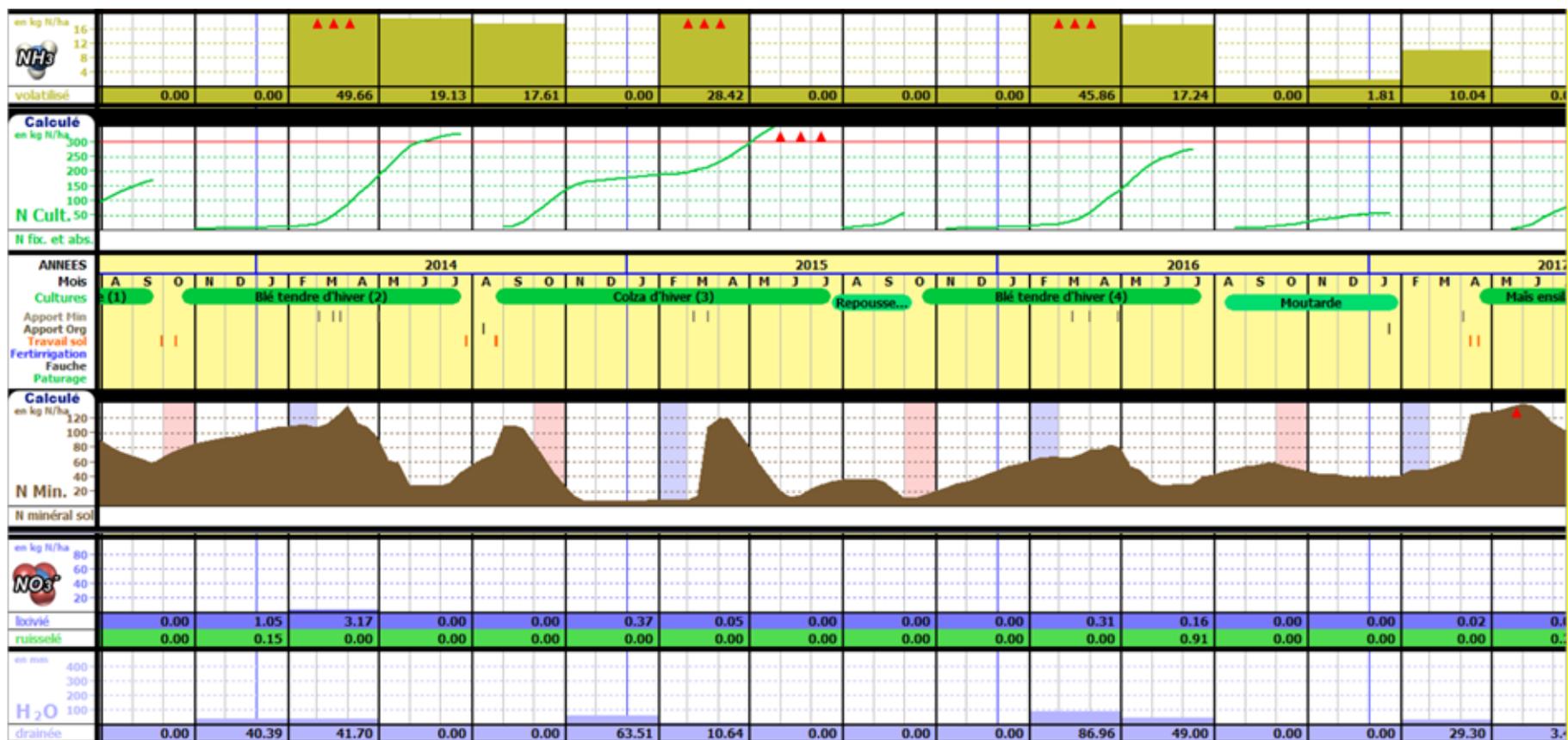


Figure 9 : Dynamiques de l'azote au sein des peuplements végétaux, dans le profil de sol et pertes d'azote par lixiviation (NO₃⁻) et volatilisation (NH₃) et lame d'eau drainante (mm) – Période 2013-2017.