

RA 1 – Système céréalier sans élevage conduit en Agriculture Biologique (AB)

Intitulé du cas-type	Système céréalier sans élevage conduit en AB en Rhône-Alpes – RA1
Localisation	Département du Rhône, plaine alluviale
Type de sol	Limono-argilo-sableux drainant
Type de climat	Série climatique 2006-2019
Rotation	Orge d'hiver-Maïs grain-Soja-Blé tendre d'hiver
Pratiqué ou prototype	Pratiqué
N° Cas-types comparables	RA2
Contact	Florian Celette & Jean-François Vian – Isara

I. Contexte

a. Localisation et présentation générale du système de culture

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

L'étude porte sur des systèmes céréaliers (sans élevage) en agriculture biologique de la région Rhône-Alpes. Le dispositif d'étude est localisé sur la plaine alluviale du Rhône (69) au nord-ouest de la petite région agricole du Bas-Dauphiné et à proximité (au Sud-Est) de l'agglomération de Lyon. Ce territoire est classé en zone vulnérable et est soumis à la directive nitrates (obligation de couverts végétaux en interculture longue et courte entre un colza et un semis d'automne...).

Du fait d'une forte spécialisation du territoire dans les cultures céréalières et de l'absence d'élevage, les sources de matières organiques sont limitées. De leur côté, les engrais azotés organiques autorisés en AB sont généralement très coûteux, ce qui conduit nombre de ces fermes céréalières à avoir recours à une fertilisation déficitaire, voire à se passer de fertilisation. En conséquence, ces systèmes céréaliers AB se caractérisent généralement par un déficit azoté important qui pose des problèmes de maintien de la fertilité des sols et s'accompagne d'une nutrition des cultures généralement déficientes.

Le recours à des prairies temporaires de légumineuses (luzerne) est fréquent pour les exploitations qui peuvent valoriser des coupes pour les élevages AB de la zone (notamment dans la région dite des « Mont du Lyonnais », située de l'autre côté du Rhône). Cette période de prairie temporaire permet d'améliorer la fertilité des sols et d'enrichir le sol en azote qui profitera aux cultures suivantes. Cependant, pour les exploitations éloignées des zones d'élevage ou qui n'ont pas développé d'accord avec des exploitations d'élevage, ce levier n'est pas utilisé. Ces exploitations insèrent fréquemment des intercultures composées de légumineuses pures, en intercultures longues (entre céréale à paille et maïs) ou courtes (entre deux céréales à pailles). Ces intercultures sont autorisées si elles sont détruites tardivement au printemps ou au plus près de l'implantation de la culture suivante.

ii. Système de culture présenté

Le système de culture présenté est un système irrigué basé sur une rotation courte (soja-blé-orge-maïs – Figure 1). Il est fréquent rencontré au sein des exploitations en AB sans élevage de ce territoire et plus largement dans la région Rhône-Alpes (zones de plaine). L'objectif de ces systèmes spécialisés en céréales est de maximiser la production des cultures de printemps en valorisant l'irrigation tout en limitant autant que possible le recours aux engrais organiques en raison de leur coût (insertion d'intercultures de légumineuses). Le recours au travail du sol est fréquent (labour ou travail du sol superficiel, faux semis, désherbage mécanique) afin de maîtriser l'enherbement des parcelles.

Le système de culture présenté ici a été étudié chez un agriculteur du territoire dans le cadre d'un suivi d'une expérimentation système mise en place chez lui. Un suivi des performances de ce système est assuré depuis 2012 dans le cadre de différents projets de recherche et développement.

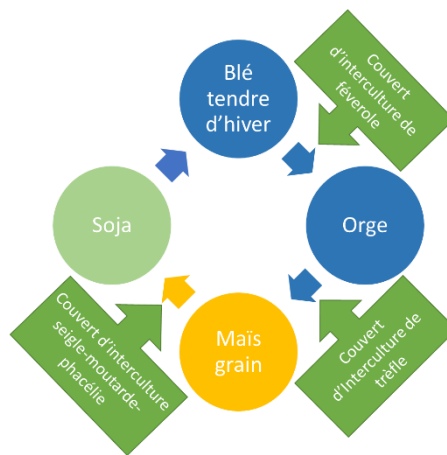


Figure 1 : rotation des cultures

b. Climat

Le climat est de type semi-continental à influence méditerranéenne au Nord de la région Rhône-Alpes, se transformant peu à peu en climat méditerranéen à influence semi-continentale vers le Sud. Les données climatiques présentées sont issues de la station météorologique de Bron, à proximité de la parcelle suivie. Elles correspondent à des données moyennes sur la période 2006-2019.

Les précipitations moyennes annuelles sont de 804 mm/an et la température moyenne annuelle est de 13,2°C. Les mois de décembre, janvier, février et mars sont habituellement secs (entre 45 et 53 mm de pluviométrie) et froids (entre 4,5 et 9°C en mars). Les périodes durant lesquelles les précipitations sont généralement les plus abondantes sont les mois d'octobre et de novembre (90 et 82 mm respectivement). Le printemps et surtout l'été sont chauds et présentent des précipitations non négligeables (entre 60 et 70 mm environ) mais la présence fréquente de vent dans le sillon Rhodanien entraîne une forte évapotranspiration et un déficit hydrique durant la période estivale (Figure 2). La présence de l'irrigation sur ce système de culture permet de compenser ce déficit hydrique apparent.

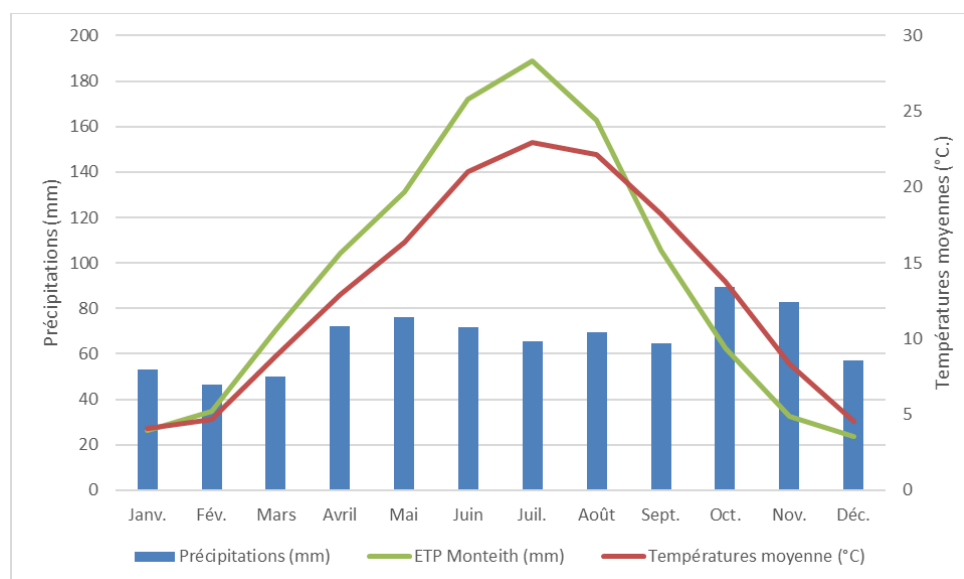


Figure 2 : Données climatiques moyennes (2006-2019) de la station météorologique de Bron

c. Sol sur lequel est « testé le système de culture »

Le sol sur lequel est suivi ce système de culture est un sol limono-argilo-sableux au pH alcalin. Il est drainant et par conséquent très peu soumis à des phénomènes d'hydromorphie. A l'inverse, il est considéré comme très séchant par les agriculteurs. C'est pour les agriculteurs la principale contrainte associée à cette parcelle, notamment lors des épisodes de vent important et/ou de forte évapotranspiration. Le Tableau 1 présente les caractéristiques du sol retenues pour les simulations réalisées pour ce cas-type.

Les obstacles à l'enracinement sont présents à partir de 90 cm de profondeur.

Tableau 1 : principales caractéristiques du sol

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Densité apparente	Cailloux (%)	Norg (%)	MO (%)	C/N	pH _{eau}
0-30	15,5	54,9	29,6	1,52	3	0,101	2,03	10,3	7,36
30-60	22,6	50,5	26,9	1,5	3				
60-90	22,6	50,5	26,9	1,5	3				

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	Irrigation	Récolte (date, destruction et gestion des couverts) et niveau de rendement
Maïs grain (récolte immature)	Mi-avril après plusieurs passages mécaniques superficiels (5-15 cm – outils à dents ou à disques). Implantation au strip-till	3 t/ha de fientes de volailles juste avant le semis (mi-avril) – de 70 à 90 kgN total/ha	40 mm par tour d'eau – 4 tours d'eau en général	De mi à fin septembre. Rendement entre 90 et 100 q/ha
Couvert seigle-moutarde-phacélie	A partir de mi-septembre après un ou deux passages de déchaumeur			De mi à fin mars ; broyage du couvert et enfouissement avec outil à disque (15 cm) ; de 1 à 2 tMS/ha
Soja	De début mai à mi-mai après plusieurs passages mécaniques superficiels (5-15 cm – outils à dents ou à disques). Implantation au strip-till		40 mm par tour d'eau – 4 tours d'eau en général	Mi-septembre. Rendement entre 35 et 45 q/ha
Blé tendre d'hiver	Octobre après 1 ou 2 passage de travail du sol superficiel (outils à dents – 10 cm)	800 kg/ha d'un engrais organique (9% N) – environ 70 kgNtot/ha	Parfois 1 à 2 tours d'eau de 40 mm chacun	Début à mi-juillet. Rendement entre 30 et 50 q/ha
Couvert de féverole	Fin août après un ou deux passages de déchaumeur			Mi-octobre, broyage du couvert et enfouissement avec outil à disque (15 cm) ; ≈ 1,5 tMS/ha
Orge d'hiver	Fin octobre après 1 ou 2 passage de travail du sol superficiel (outils à dents – 10 cm)	500 kg/ha d'un engrais organique (9% N) – entre 40 et 50 kgN total/ha	Parfois 1 à 2 tours d'eau de 40 mm chacun	Mi-juin à fin juin. Rendement entre 30 et 50 q/ha
Couvert de trèfle	Semé après la récolte de l'orge (avec un déchaumage avant)			De mi à fin mars ; broyage du couvert et enfouissement avec outil à disque (15 cm) ; > 2 tMS/ha

Ce système de culture en AB est conduit sans labour (Techniques Culturelles Sans Labour – TCSL). L'objectif de ce système est de maximiser la production du maïs grain et du soja (valorisation de l'irrigation) et de réduire si possible le recours aux engrais organiques *via* l'utilisation de légumineuses et l'amélioration de la fertilité des sols (couverts végétaux et TCSL).

Ce système est basé sur une alternance de deux cultures d'hiver avec deux cultures de printemps, ce qui permet de bien gérer le développement des adventices. Les adventices sont également contrôlées par l'implantation de couverts, par le recours à du travail du sol superficiel avec des outils à dents en période d'interculture et par des passages de bineuses ou de herses étrilles. Le nombre de passages mécaniques dépend du salissement de la parcelle.

Les leviers agronomiques mobilisés dans ce système de culture visent à maximiser la fixation biologique de l'azote *via* l'insertion de couverts végétaux de légumineuses en pure (couvert autorisé pour les exploitations en AB ou si ces couverts sont détruits après le 15 mars) afin d'enrichir le sol en azote pour la nutrition des cultures suivantes. L'agriculteur apporte des compléments azotés sous forme d'engrais organiques pour les cultures de maïs grain, blé tendre d'hiver et orge d'hiver. Mais un des objectifs de ce système est de réduire leur quantité (grâce aux couverts végétaux) étant donné

leur coût important et la non maîtrise de la synchronicité entre leur dynamique de minéralisation et les besoins des cultures (fortement dépendante des conditions climatiques de l'année considérée).

Les couverts d'interculture sont implantés le plus tôt possible derrière la récolte des cultures de vente avec en général une préparation superficielle du sol afin de détruire les adventices présentes. Ils sont ensuite détruits le plus proche possible des dates de semis des cultures de vente afin de permettre une production de biomasse la plus importante possible, un contrôle des adventices et l'apport d'azote pour la culture suivante. L'objectif principal de ces couverts végétaux est bien l'apport d'azote et leur effet concurrentiel vis-à-vis des adventices. Ils sont détruits mécaniquement par broyage et rapidement enfouis par plusieurs passages d'outils de travail du sol superficiel. Ils sont en général assez bien réussis, notamment le couvert d'interculture longue entre le blé tendre d'hiver et le maïs grain. Ce couvert est important pour augmenter la fourniture d'azote pour le maïs grain et réduire les apports d'engrais organiques coûteux.

Le rendement des cultures est au-dessus ou dans la moyenne des références régionales. La variabilité des rendements est plus importante pour le blé tendre d'hiver car la productivité dépend principalement des conditions climatiques de printemps. Les rendements des cultures d'été (maïs grain et soja) sont assez stables.

Selon les conditions climatiques de l'année et les conditions de passages des engins agricoles, des difficultés de maîtrise de l'enherbement peuvent survenir, notamment les années humides au printemps ou à l'automne qui limitent le recours au désherbage mécanique et rendent les cultures moins concurrentielles vis-à-vis du développement des adventices.

III. Résultats attendus en termes de maîtrise de l'azote

Ce système de culture est conduit dans une zone vulnérable. Les pollutions diffuses en azote sont donc un sujet important au sein de ce territoire. Néanmoins, les leviers agronomiques mobilisés dans ce système de culture visent à maximiser la fixation biologique de l'azote *via* l'insertion de couverts végétaux de légumineuses en pure afin d'enrichir le sol en azote pour la nutrition des cultures suivantes. L'agriculteur apporte des compléments azotés sous forme d'engrais organiques pour les cultures de maïs grain, blé tendre d'hiver et orge d'hiver. Mais un des objectifs de ce système est de réduire leur quantité (grâce aux couverts végétaux) étant donné leur coût important et la non maîtrise de la synchronicité entre leur dynamique de minéralisation et les besoins des cultures (fortement dépendante des conditions climatiques de l'année considérée).

Les attentes en termes de performances azotées ont été fixées vis-à-vis de la qualité de l'eau (potabilité) et de l'air. Ces seuils ont été déterminés dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N et sont présentés dans le Tableau 3.

Dans ce projet, nous visons un « système à hautes performances azotées (HPN) » présentant les performances suivantes :

- vis-à-vis de la qualité de l'eau pour les pertes en nitrates : moins de 10 kg N pour 100 mm d'eau drainée, pour parvenir au seuil de potabilité 50 mg/l de nitrate ;
- vis-à-vis de la qualité de l'air pour les pertes en ammoniac : moins de 10 % de pertes par volatilisation pour 100 kg N/ha apportés, conformément aux valeurs couramment mesurées au champ.

Tableau 3 : Seuils de satisfaction des pertes en nitrate 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			

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

IV. Présentation des simulations réalisées avec Syst'N®

Les données utilisées pour simuler les performances azotées de ce système de culture sont issues de la station météorologique de Bron, proche des parcelles suivies. Nous avons pris 14 années climatiques, de 2006 à 2019.

Le couvert d'interculture plurispécifique entre le maïs et le soja (seigle-moutarde-phacélie) a été remplacé par un couvert de moutarde dans les simulations.

Des fientes de volaille séchées sous hangar ont été utilisées pour simuler la fertilisation organique du maïs grain et un engrais organique paramétré avec les teneurs en N de l'engrais organique utilisé sur les cultures de blé tendre d'hiver et d'orge d'hiver de l'exploitation ont été utilisés.

V. Evaluation des pertes d'azote

a. Présentation des résultats moyens du système de culture

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

Les entrées moyennes d'azote pour ce système de culture sont de 154 kgN/ha/an. Les entrées exogènes issues des engrais organiques représentent 48 kgN/ha/an et les entrées issues de la fixation biologique de l'azote atmosphériques représentent 106 kg/ha/an. Les entrées d'azote par fixation biologique de l'azote par les légumineuses sont très élevées dans cette situation. Elles sont principalement dues au soja bien sûr mais également aux couverts d'interculture (trèfle et féverole). Tous les ans dans ce système, une légumineuse est cultivée.

Les sorties moyennes d'azote à l'échelle du système de culture sont de 107 kgN/ha/an (issues de l'exportation des grains des récoltes). Les résidus de culture ne sont pas exportés ; l'immobilisation d'azote dans ces résidus de culture est de 42 kgN/ha/an en moyenne.

Les pertes moyennes de nitrate par lixiviation à l'échelle de la succession culturale étudiée sont de 29 kg/ha/an tandis que les pertes d'azote par volatilisation de l'ammoniac (NH₃) sont nulles.

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	0
		a2 : Apport: fertilisation organique	48
		a3 : Fixation biologique d'azote	106
b	Sorties d'azote (kgN/ha/an)	b1 : Exportation par les récoltes	107
		b2 : Exportation par les résidus de cultures exportés de la parcelle	0
c	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		116
d	Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)	d1 : Protoxyde d'azote (N ₂ O)	0,1
		d2 : Ammoniac (NH ₃)	0
		d3 : Nitrate lessivé (NO ₃ ⁻)	29
		d4 : Nitrate ruisselé (NO ₃ ⁻)	1
e	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		203

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)	47
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)	14
(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)	63
d2/(a1+a2)	Pertes d'azote sous forme d'ammoniac (NH ₃) en % des apports totaux	00

Le bilan apparent à l'échelle pluriannuelle de ce système de culture est de +47 kgN/ha/an. Ce bilan est élevé et indique un enrichissement du milieu en azote. Cet enrichissement est principalement dû à la fixation biologique de l'azote par les légumineuses cultivées tout au long de la succession culturale. Cet enrichissement du milieu se fait donc sous forme organique : azote accumulé au sein de la biomasse aérienne et racinaire des couverts de légumineuses, apports d'engrais organiques et azote contenu dans les résidus de récolte des cultures.

Si l'on soustrait au bilan apparent les pertes d'azote du système de culture (Tableau 4 – d) il apparaît que le sol s'enrichit en azote en moyenne de 17 kg/ha/an. Là encore cet enrichissement semble se faire sous forme organique principalement (fixation biologique de l'azote, apports d'engrais organiques et résidus de récolte).

Les pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante sont de 14 kg. Si on convertit cette quantité d'azote en nitrate les pertes par lixiviation des nitrates s'élèvent alors à 63 kg ce qui correspond à une concentration moyenne en nitrate supérieur au seuil de potabilité des eaux (50 mgNO₃⁻/l). En revanche, les pertes d'azote par volatilisation de l'ammoniac sont nulles pour cette situation.

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

La Figure 3 présente les dynamiques des pertes moyennes d'azote par lixiviation. Les pertes indiquées sont des moyennes calculées pour chaque culture pour les années climatiques sur lesquelles la culture (ou le couvert) concernée est présente.

Ce graphique permet de repérer 3 grandes périodes de pertes d'azote par lixiviation :

- Pendant la période automnale-hivernale sous les céréales à paille (blé tendre d'hiver et orge d'hiver) : de novembre à avril les pertes d'azote par lixiviation s'élèvent à 17 kgN/100 mm d'eau drainée sous blé tendre d'hiver et à 13 kgN/100 mm d'eau drainée pour l'orge d'hiver.
- Pendant la période automnale-hivernale sous le couvert d'interculture de trèfle : de novembre à avril les pertes d'azote par lixiviation s'élèvent à 24 kgN/100 mm d'eau drainée.
- Pendant la période d'implantation du maïs qui suit le couvert d'interculture longue de trèfle : de mai à juillet les pertes d'azote par lixiviation s'élèvent à 25 kgN/100 mm d'eau drainée.

Les autres périodes du système présenté présentent de faibles risques vis-à-vis de la qualité de l'eau (< 10 kgN/100 mm d'eau drainée).

Ces pertes sont néanmoins variables selon les années climatiques que l'on considère. Les Figures 4 et 5 permettent d'analyser des périodes pour lesquelles des pertes d'azote par lixiviation importantes et faibles ont été simulées sur les périodes identifiées précédemment. L'ensemble des simulations sur les 14 années de simulations sont présentées en Annexe. Ces figures permettent d'analyser l'effet des différents paramètres du système de culture (climat, sol, succession et réussite des couverts/cultures) sur les pertes d'azote par lixiviation sur les 14 années de simulations.

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

RA1 – Système céréalier sans élevage conduit en AB

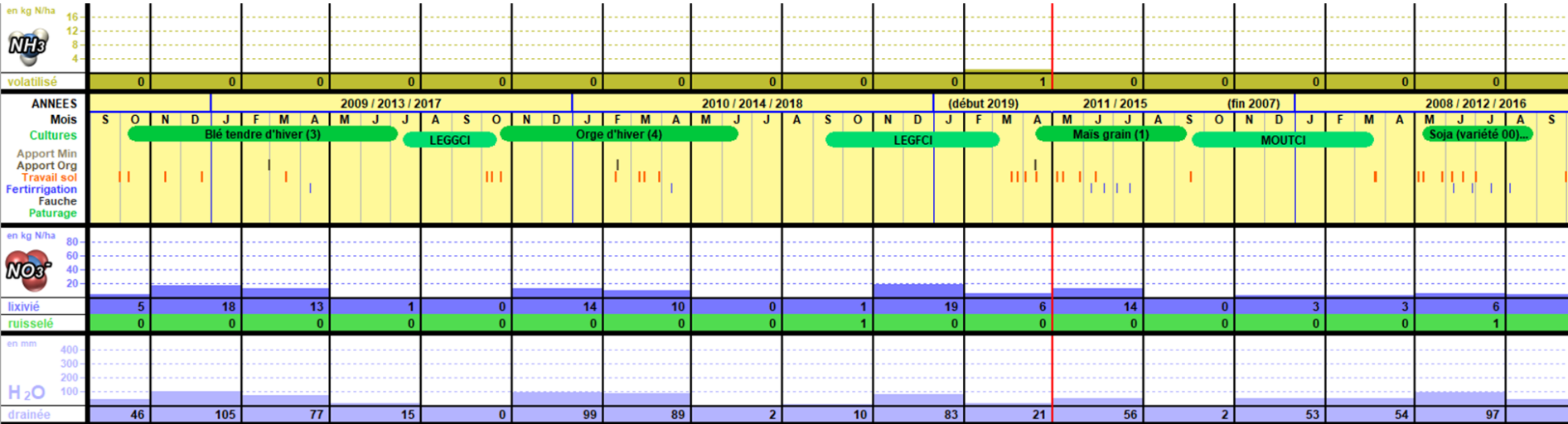


Figure 3 : Dynamique des pertes moyennes d'azote par lixiviation et volatilisation simulées sur 14 années climatiques (2006-2019).

RA1 – Système céréalier sans élevage conduit en AB

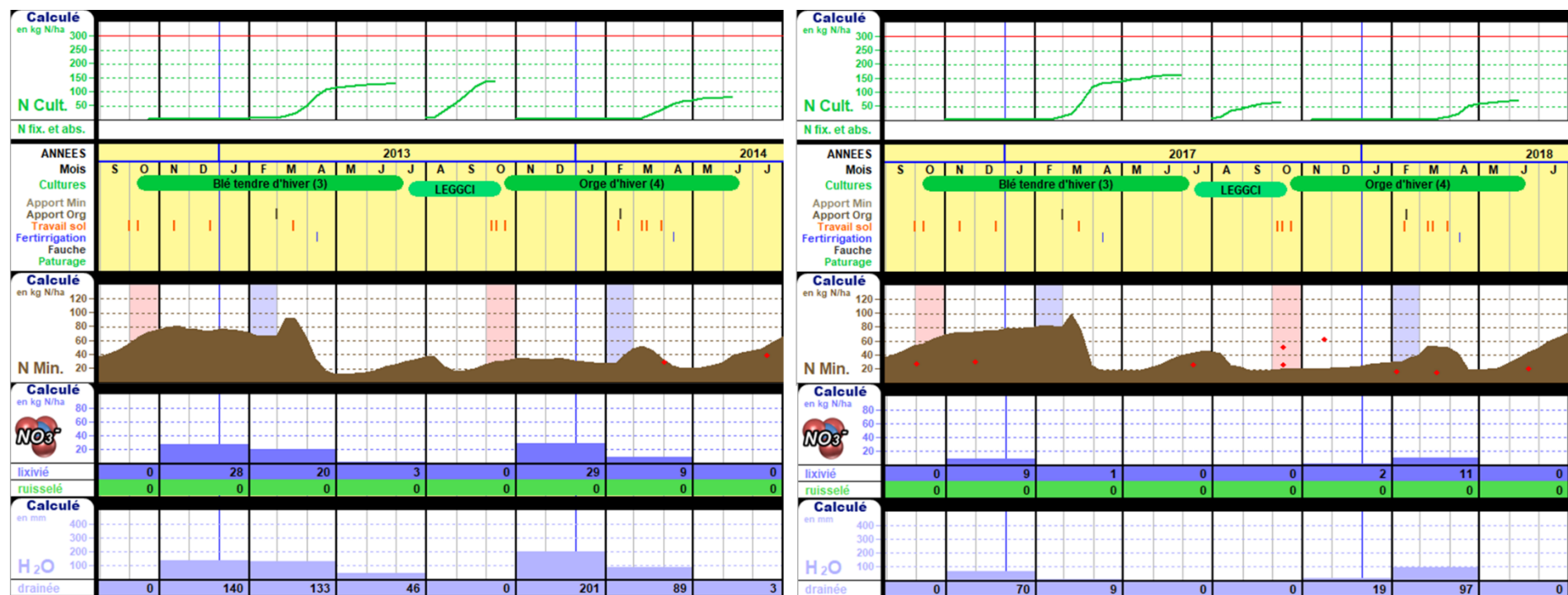


Figure 4 : Dynamiques d'azote en 2013-2014 (trimestres à fort risque de lixiviation) et 2017-2018 (trimestres à faible risque de lixiviation) : absorption d'azote par les céréales à paille et le couvert d'interculture de féverole, quantités d'azote minéral dans le profil de sol, pertes d'azote par lixiviation et lame d'eau drainante simulées.

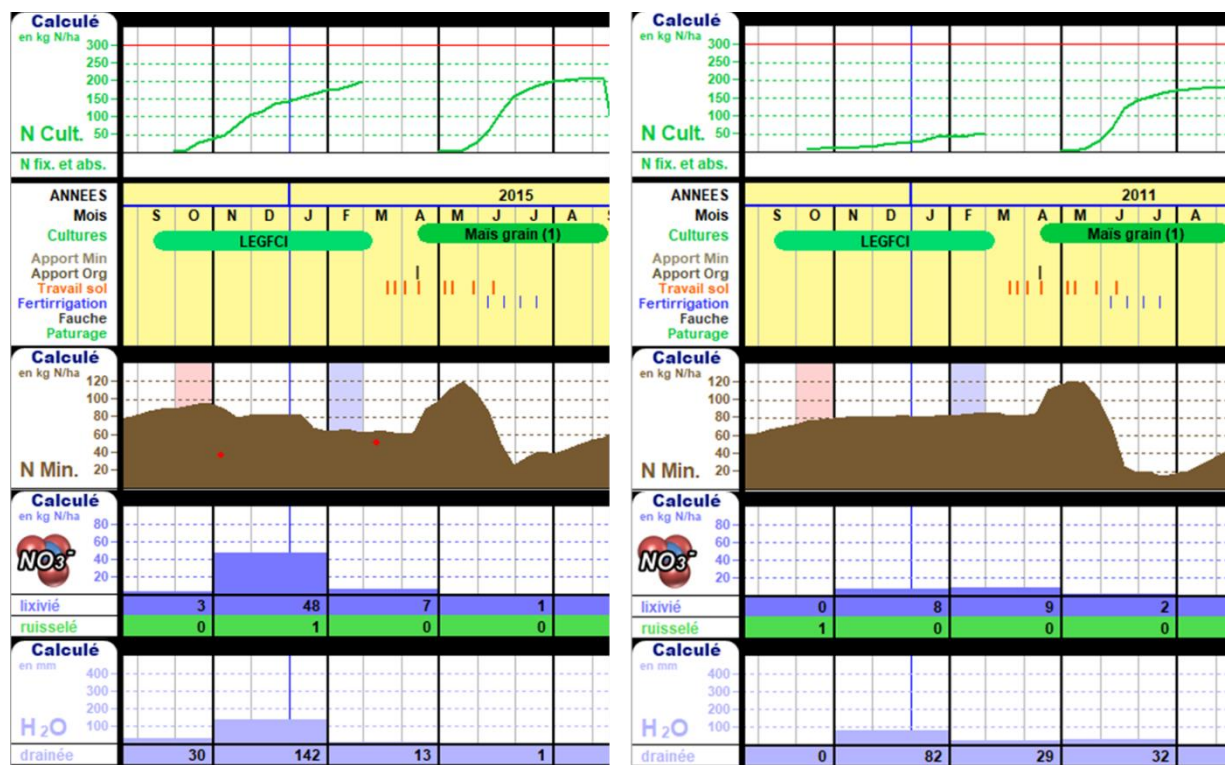


Figure 5 : Dynamiques d'azote en 2014-2015 (trimestres à fort risque de lixiviation) et 2010-2011 (trimestres à faible risque de lixiviation) : absorption d'azote par le couvert d'interculture de trèfle et le maïs grain, quantités d'azote minéral dans le profil de sol, pertes d'azote par lixiviation et lame d'eau drainante simulées.

Analyse des dynamiques d'azote sous les cultures de céréales à paille

La Figure 4 présente les dynamiques de l'azote sous le blé tendre d'hiver, l'orge d'hiver et le couvert d'interculture d'été (féverole) implanté entre le blé et l'orge.

Les périodes de pertes importantes d'azote se situent pendant les mois de novembre à avril des années 2012-2013 et 2013-2014. Elles s'élèvent à 17 kgN/mm d'eau drainée sous le blé tendre d'hiver et à 13 kgN/100 mm d'eau drainée sous l'orge d'hiver. En revanche pour ces mêmes périodes lors des années 2016-2017 et 2017-2018 les pertes d'azote par lixiviation sont faibles et proches de 10 kgN/100 mm d'eau drainée.

Les quantités d'azote minéral dans le sol sous le blé tendre d'hiver au mois d'octobre se situent aux alentours de 60 kgN/ha que ce soit en 2012 ou en 2016. Lors de la période automnale les besoins en azote du blé sont faibles (voir les courbes d'accumulation de l'azote dans la biomasse du blé). En 2016 l'azote minéral du sol issu de la minéralisation basale du sol et des résidus de culture du soja s'accumulent dans le profil de sol (courbe de l'azote minéral du sol) tandis qu'en 2012 cet azote est lixivié en raison d'une lame d'eau drainante plus importante (automne et hiver pluvieux en 2012). Dès fin février les besoins en azote du blé sont importants. L'azote minéral du sol est absorbé et s'accumule au sein de la biomasse du blé ce qui explique la forte baisse de la concentration en azote minéral du sol. La phase d'absorption est cependant plus tardive en 2013 en comparaison de l'année 2017. Ce délai, qui s'explique par des conditions climatiques peu favorables au développement du blé en 2013, est à l'origine des pertes d'azote par lixiviation.

Les quantités d'azote minéral dans le sol sous l'orge d'hiver pendant la période automnale et hivernale se situent aux alentours de 40 kgN/ha en 2013 contre 20 kgN/ha en 2017. Cette différence de concentration en azote minéral dans le sol semble provenir d'une différence de développement du couvert d'interculture de féverole précédent l'orge. En 2013 l'azote accumulé au sein de la biomasse est très important. La restitution de cette biomasse au sol enrichit par conséquent le milieu de façon importante par rapport à l'année 2017. La lame d'eau drainante plus importante en 2013 (automne pluvieux par rapport à 2017) combinée aux faibles besoins en azote de l'orge lors de cette même période explique les pertes plus importantes simulées lors de cet automne 2013.

Analyse des dynamiques d'azote sous le couvert d'interculture de trèfle et le maïs grain suivant

L'analyse des dynamiques d'azote simulées pendant la culture du maïs et après l'interculture de trèfle (Figure 5) montre que les pertes d'azote par lixiviation sous la culture du maïs sont faibles. Cependant des pertes d'azote par lixiviation peuvent survenir lors de la phase d'installation du maïs en cas de printemps pluvieux (printemps 2007 – Annexe 1). Les pertes d'azote par lixiviation arrivent lors de la phase d'interculture de trèfle et après sa destruction. Ces pertes peuvent être très importantes lors d'automne-hiver pluvieux (Figure 5 – automne-hiver 2014-2015). L'accumulation d'azote minéral dans le sol simulé sous ce couvert d'interculture étant alors lixivié.

Analyse des dynamiques d'azote lors des autres périodes de la succession culturale

L'analyse des dynamiques d'azote simulées sur les autres périodes du système de culture montre que les pertes d'azote par lixiviation sont très faibles (<10 kgN/100 mm d'eau drainée) quelle que soit l'année climatique considérée (cf. Annexe). Sous la culture de soja les pertes sont faibles ainsi que lors des périodes de fin de printemps et d'été sous les cultures de céréales à paille de maïs. Cela signifie *a priori* que l'azote issu des apports d'engrais organiques et/ou de l'effet du couvert d'interculture longue de trèfle avant le maïs sont bien valorisées par ces cultures (cf. Annexe).

VI. Diagnostic des performances azotées et discussion des résultats

Les pertes totales d'azote par lixiviation sont en moyenne de 29 kgN/ha/an tandis que les pertes annuelles d'azote par volatilisation (NH_3) sont nulles. La très faible proportion d'ammonium (NH_4^+) contenue dans les engrais organiques épandus et leur épandage dans un couvert végétal (blé et orge) et/ou enfouis rapidement après épandage (travail du sol avant le maïs ou herse étrille sous les cultures de céréales à paille) expliquent l'absence de pertes d'azote par volatilisation. Par rapport aux objectifs de performances azotées fixés, ce système de culture est considéré comme un système qui a une performance azotée partielle (Tableau 6). Si ce système est performant d'un point de vue des pertes d'azote par volatilisation (< 5 % des apports totaux d'azote), il ne l'est pas vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation avec plus de 10 kgN/100 mm d'eau drainée en moyenne.

Tableau 6 : Performance azotée du système de culture RA1.

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			
Lixiviation de nitrate : 5 à 10 kgN/100 mm de lame d'eau drainante			
Lixiviation de nitrate : > 10 kgN/100 mm de lame d'eau drainante			14 kgN lixivié / 100 mm de lame drainante et 0% de l'azote total apporté volatilisé

Légende :

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

La faible performance azotée de ce système vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation provient essentiellement des pertes d'azote lors des périodes automnales et hivernales sous les cultures de céréales à paille (blé et orge). Chacune de ces cultures est précédée par une légumineuse à graine : soja pour le blé et féverole (couvert d'interculture) pour l'orge. Les reliquats d'azote minéral dans le profil de sol à l'entrée de la période drainante (octobre-novembre) sont souvent élevés sous le blé (60 kgN/ha) et plus faible sous l'orge (de 20 à 40 kgN/ha). Cet azote minéral a pour origine :

- Les reliquats d'azote minéral post-récolte du soja qui sont en moyenne de 40 kgN/ha et des reliquats d'azote minéral à la destruction de la féverole qui sont en moyenne de 20 kgN/ha.
- De la minéralisation basale de l'azote organique du sol depuis la récolte de la culture précédente du blé et depuis la destruction du couvert d'interculture de féverole avant l'orge.
- De la minéralisation des résidus de culture du soja ou de la féverole.

Lorsque ces reliquats azotés dépassent ou approchent 40 kgN/ha en octobre-novembre des pertes d'azote par lixiviation sont courantes sous le blé et l'orge. Les faibles besoins en azote du blé et de l'orge sur la période automnale/hivernale ne permettent pas d'immobiliser cet azote minéral du sol. Ces périodes automnales représentent donc le principal risque de ce système de culture. Les effets précédents des légumineuses à graines génèrent un risque sur la période simulée en 2008-2009 et 2012-2013. Seule la période 2016-2017 génère de faibles pertes d'azote par lixiviation en raison d'un automne et un hiver particulièrement secs (cf. Annexe). Ce risque semble donc être structurel ici et

fortement accentué lors des automnes et hivers pluvieux. D'autres pertes d'azote par lixiviation, mais souvent moindre, peuvent survenir entre janvier et février sous ces mêmes cultures. Les causes de ces pertes sont les mêmes que celles évoquées précédemment (effet précédent, minéralisation basale de l'azote organique du sol).

La 2^{ème} période identifiée comme étant à risque vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation est la période du couvert d'interculture de trèfle entre l'orge et le maïs grain. Cependant, l'ensemble des simulations réalisées semble indiquer ici que la pluviométrie automnale et hivernale soit le principal facteur expliquant les pertes d'azote par lixiviation sous ce couvert de légumineuse fourragère. Ces pertes importantes d'azote par lixiviation ont été simulées uniquement lors de l'automne-hiver 2014-2015 exceptionnellement pluvieux ; en 2006-2007, 2010-2011 et 2018-2019 les pertes d'azote par lixiviation simulées sont faibles sous ce couvert d'interculture (Annexe 1). Il apparaît également qu'après la destruction de ce couvert de légumineuse, les pertes d'azote par lixiviation sont très faibles, même lors des premiers stades de développement du maïs grain (à l'exception de l'année 2007 avec un printemps très pluvieux). L'ensemble de l'azote accumulé au sein de la biomasse du couvert de trèfle et l'apport d'engrais organique à l'implantation du maïs semblent donc être bien valorisés par le maïs. La destruction tardive de ce couvert de légumineuse apparaît comme une pratique vertueuse vis-à-vis des risques de pertes d'azote par lixiviation. Cependant, cette destruction et enfouissement tardif n'est possible que si les adventices sont globalement bien maîtrisées. En effet, en cas de salissement de la parcelle, les agriculteurs en AB ont plutôt tendance à détruire les couverts d'interculture plus précocement afin de réaliser un ou plusieurs faux semis avant l'implantation des cultures de printemps. En cas de destruction plus précoce de ce couvert d'interculture de légumineuse, des pertes d'azote par lixiviation pourraient survenir au cours des mois de mars et mai. Par ailleurs, les printemps pluvieux peuvent également générer des risques de pertes d'azote par lixiviation lors des phases d'implantation du maïs, quelle que soit la date de destruction du couvert d'interculture de trèfle.

A la récolte du maïs les reliquats d'azote minéral du sol varient de 40 à 60 kgN/ha. Cependant la récolte précoce du maïs grain (récolte en épis – mi-septembre) et l'implantation rapide d'un couvert d'interculture plurispécifique (moutarde, seigle, phacélie) permet d'immobiliser cet azote minéral du sol (Annexe 1). Ces espèces ont des capacités d'absorption précoce en azote ce qui réduit les risques de lixiviation de l'azote minéral du sol. Enfin, de la destruction de ce couvert d'interculture jusqu'à la récolte du soja les pertes d'azote par lixiviation sont très faibles et plutôt rares (< 5 kgN/100 mm d'eau drainée).

A l'échelle pluriannuelle de ce système de culture la faible performance azotée vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation doit être nuancée. En effet, le type de sol sur lequel est pratiqué ce système de culture est un sol drainant et la lame d'eau drainante est très faible. La moindre unité d'azote lixivié entraîne ainsi une forte concentration en azote de la lame d'eau drainée. Comme attendu, l'introduction importante de légumineuses dans la rotation permet de fixer des quantités d'azote importantes dans le système de culture. Ces légumineuses sont ainsi largement favorisées et permettent grandement d'améliorer la nutrition azotée des cultures. Cependant, les simulations réalisées avec Syst'N® semblent surestimer l'accumulation d'azote au sein du soja et du couvert de trèfle de longue durée (mesures réalisées *in situ* qui montrent une moindre concentration en azote que dans les simulations). Les flux entrants d'azote dans cette situation sont certainement moins importants dans la réalité que ce qui est simulé ici. Par ailleurs, les simulations surestiment également les reliquats azotés post-récolte du soja et l'accumulation d'azote au sein du profil de sol au cours des périodes automnales et hivernales (quantités mesurées *in situ* plus faibles que les quantités simulées). Les flux d'azote sont moindres dans la réalité et les pertes d'azote par lixiviation sont donc probablement plus faibles par rapport aux pertes simulées et notamment sous les cultures de céréales à paille.

Les résultats des simulations, si elles doivent encore être consolidées, suggèrent de revoir la gestion du couple soja-blé et plus généralement le couple « légumineuse à graine – céréales à paille ». Il pourrait donc être pertinent de favoriser plutôt une culture qui a la capacité de pousser rapidement avant l'hiver (colza ? mais cette culture pose d'autres problèmes en AB et la date de récolte du soja est trop tardive). Ou alors il faudrait planter ces céréales plus précocement. Mais, en AB, les semis précoces de céréales peuvent générer des difficultés de maîtrise des adventices et augmentent les risques par exemple d'attaques de pucerons (et par conséquent augmentent le risque de jaunisse nanisante de l'orge).

VII. Conclusion

Ce système de culture a une performance azotée partielle : haute performance vis-à-vis des pertes d'azote par volatilisation et plutôt basse performance vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation.

Cette faible performance vis-à-vis des pertes de nitrates vient des pertes simulées lors de la période automnale et hivernale sous les cultures de céréales à paille (blé et orge). Ces pertes sont dues aux faibles besoins en azote de ces cultures lors de cette période et d'une accumulation d'azote minéral dans le sol qui peut dépasser 60 kgN/ha en raison de l'effet précédent des légumineuses à graines (soja et couvert de féverole). La fréquence des automnes et hivers pluvieux et le caractère drainant du sol font donc de ces phases des périodes structurellement à risque vis-à-vis des pertes d'azote par lixiviation. Cependant, l'outil Syst'N® surestime l'accumulation d'azote au sein du soja et de la féverole et la quantité d'azote minéral dans le sol qui s'accumule lors de cette période automnale et hivernale. Les flux d'azote sont moindres dans la réalité et les pertes d'azote par lixiviation sont donc probablement plus faibles par rapport aux pertes simulées.

En revanche, la séquence des deux cultures de printemps est plutôt vertueuse ici d'un point de vue des pertes d'azote par lixiviation (pertes < 5 kgN/100 mm d'eau drainée). Le maïs valorise bien l'ensemble de l'azote issu de la minéralisation de la biomasse du couvert d'interculture de trèfle et de la minéralisation de l'engrais organique. La destruction tardive (mi à fin mars) de ce couvert d'interculture permet de réduire les risques de pertes d'azote par lixiviation. De même, la récolte précoce du maïs et l'implantation rapide après la récolte d'un couvert d'interculture, qui a une bonne capacité d'absorption précoce de l'azote minéral du sol, limitent les risques de lixiviation de l'azote entre le maïs et le soja.

La part importante de légumineuses (fourragères et à graines) cultivées dans ce système de culture permet d'augmenter les flux d'azote et de réduire les apports d'engrais organiques (très chers en AB). Ces légumineuses permettent grandement d'améliorer la nutrition azotée des cultures mais peuvent également générer des risques de pertes d'azote par lixiviation après leur récolte ou leur destruction pour les couverts d'interculture. Cependant, il est important de rappeler que les pertes simulées pour ce système de culture sont très certainement surestimées. Par ailleurs, la nature drainante du sol et la faible lame d'eau drainante entraînent une forte concentration en azote de la lame d'eau drainée malgré des pertes d'azote moyennes annuelles modérées (29 kgN/ha/an). Il est également important de préciser que ce système de culture céréalier spécialisé en AB est fréquemment rencontré dans la vallée du Rhône mais reste peu courant en France et n'est donc pas représentatif des « systèmes AB ».

Annexe : Dynamiques sol-plante-atmosphère de l'azote du cas-type RA 1

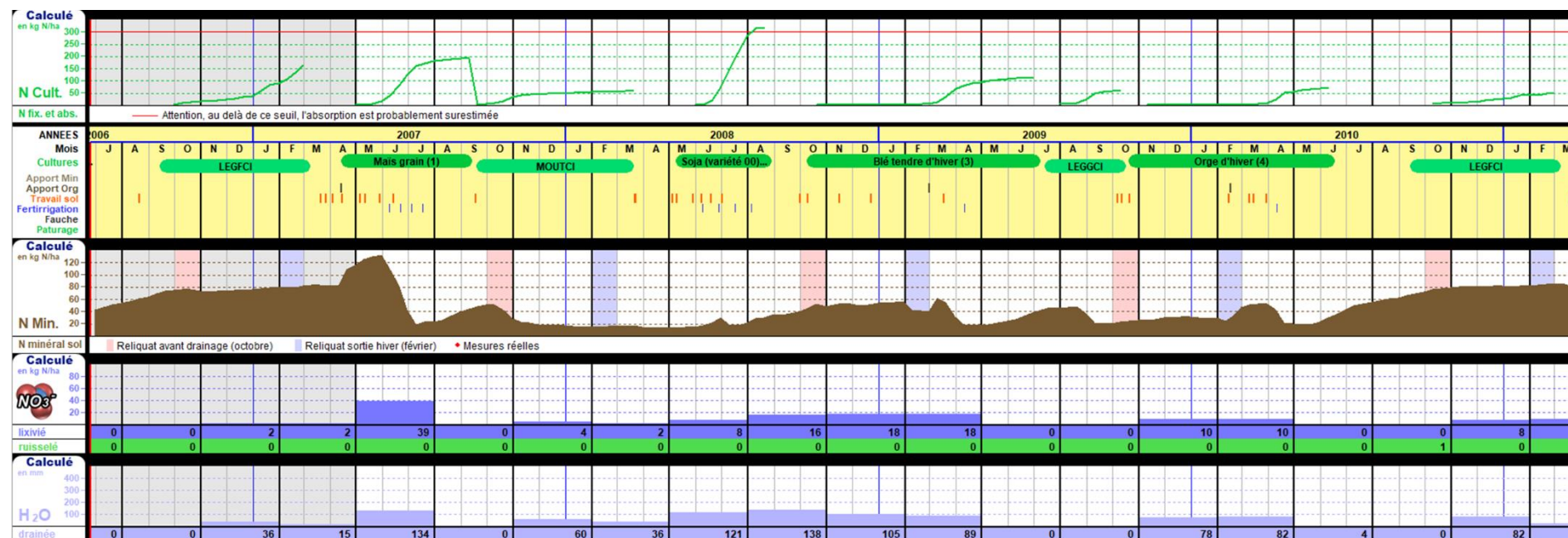


Figure 6 : Dynamiques de l'azote au sein des peuplements végétaux, dans le profil de sol et pertes d'azote par lixiviation (NO_3^-) et lame d'eau drainante (mm) – Période 2006-2011.

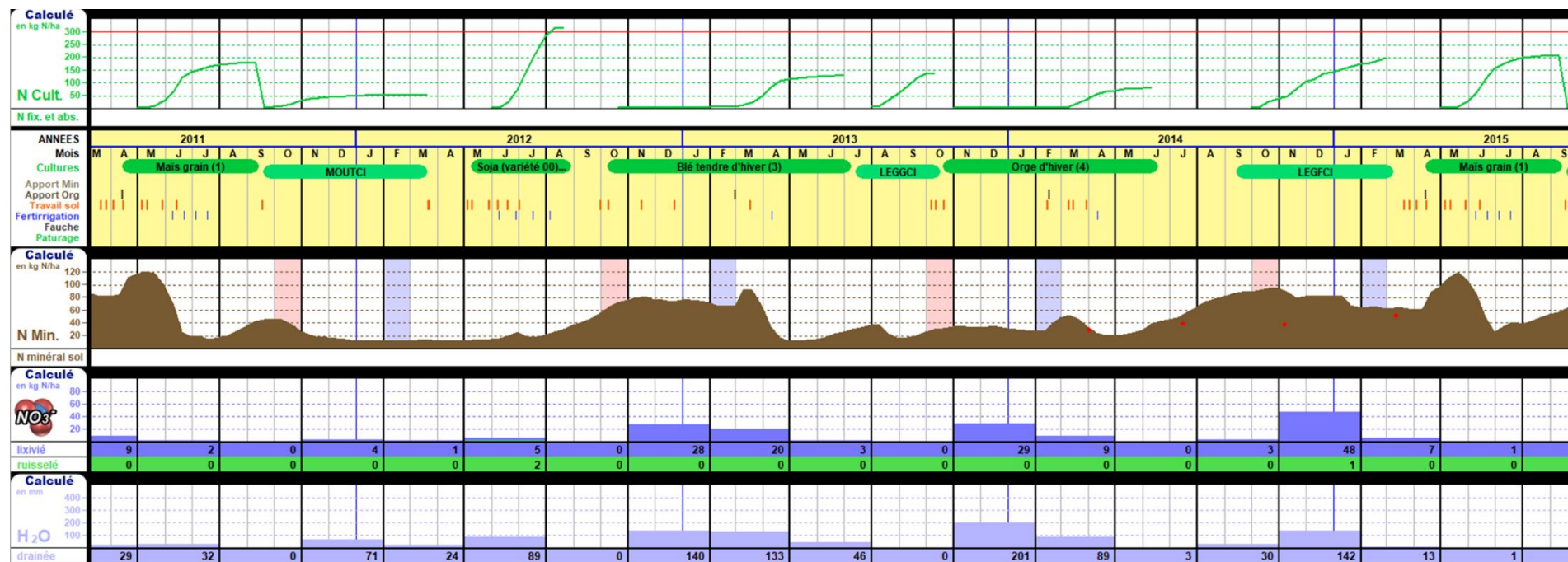


Figure 7 : Dynamiques de l'azote au sein des peuplements végétaux, dans le profil de sol et pertes d'azote par lixiviation (NO₃) et lame d'eau drainante (mm) – Période 2011-2015.

RA1 – Système céréalier sans élevage conduit en AB

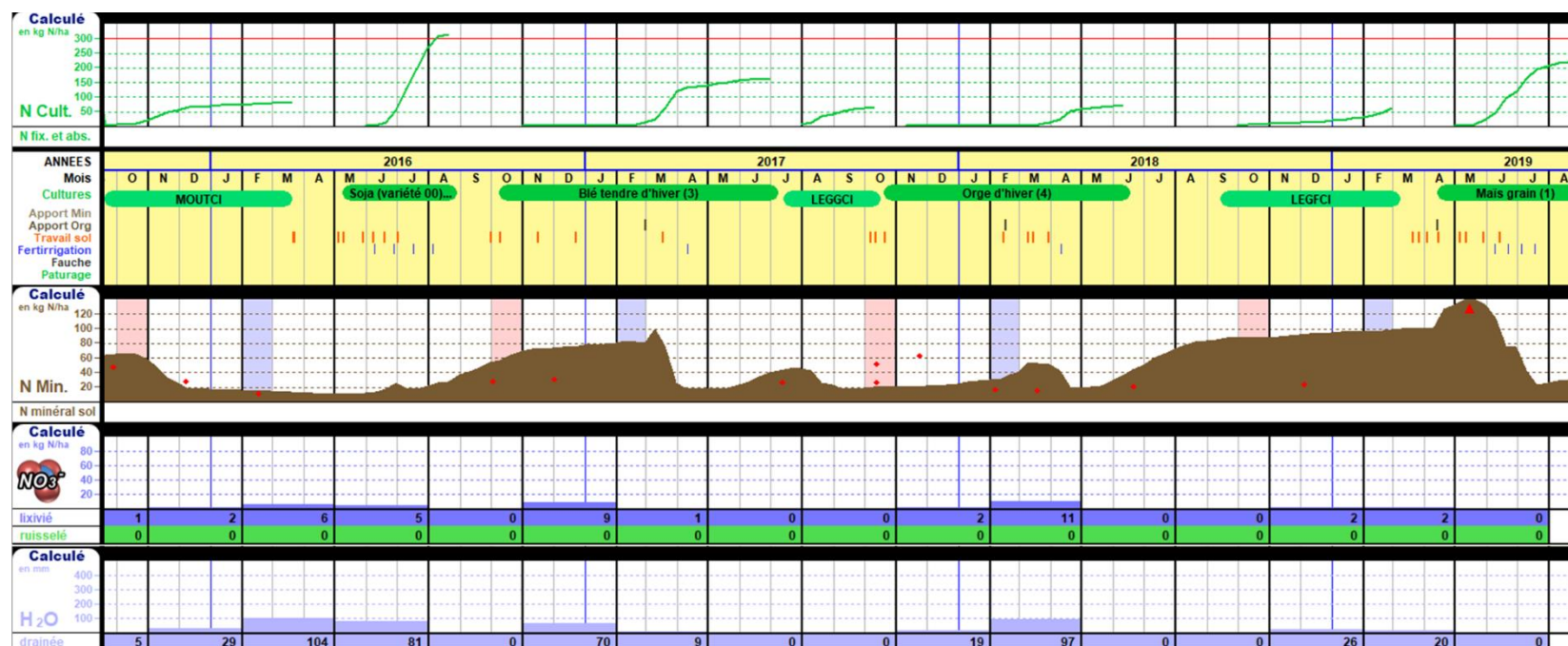


Figure 8 : Dynamiques de l'azote au sein des peuplements végétaux, dans le profil de sol et pertes d'azote par lixiviation (NO_3^-) et lame d'eau drainante (mm) – Période 2015-2019.