

<b>RA2 – Système céréalier sans élevage conduit en Agriculture Biologique (AB)</b>
--

Intitulé du cas-type	Système céréalier sans élevage conduit en AB en Rhône-Alpes – RA2
Localisation	Département du Rhône, plaine alluviale
Type de sol	Limono-argilo-sableux drainant
Type de climat	Série climatique 2005-2019
Rotation	Maïs grain – Soja – Blé tendre d’hiver +féverole – Orge d’hiver – Maïs grain – Pois chiche – Blé tendre d’hiver – Colza associé
Pratiqué ou prototype	Pratiqué
N° Cas-types comparables	RA1, RA3
Contact	Florian Celette & Jean-François Vian, Isara

<b>I. Contexte</b>
--------------------

**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 déficitaire.

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 couverts d’interculture composés de légumineuses pures en interculture longue (entre céréale à paille et maïs) ou courte (entre deux céréales à pailles). Ces couverts d’interculture de légumineuses pures sont autorisés s’ils sont détruits 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 diversifiée (Figure 1). Ce système est peu rencontré au sein des exploitations en AB sans élevage de ce territoire et plus largement dans la région Rhône-Alpes (zones de plaine). C'est un prototype de système testé chez un agriculteur dans le cadre d'une expérimentation « systèmes de culture ». L'objectif des systèmes AB 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 de couverts d'interculture 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.

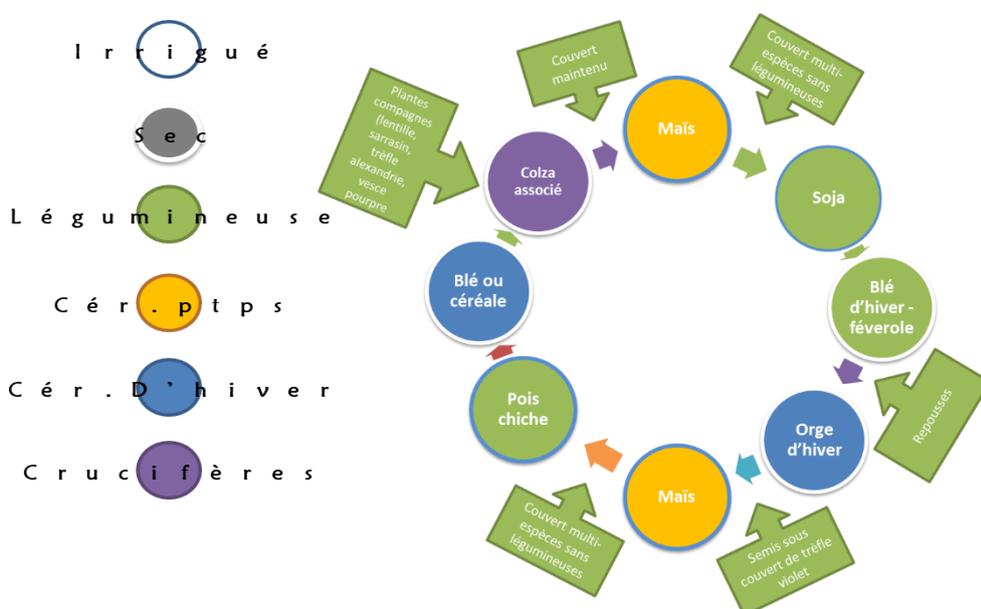


Figure 1 : rotation des cultures

## 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 2005-2019.

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.

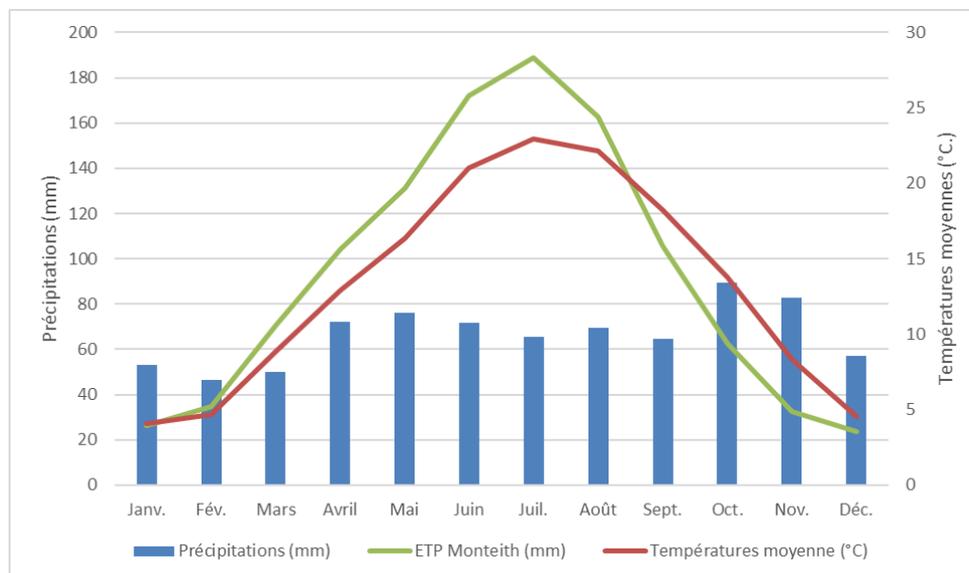


Figure 2 : Données climatiques moyennes (2003-2018) de la station météorologique de Bron

### 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 <sub>eau</sub>
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				

<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	Irrigation	Récolte (date, destruction et gestion des couverts) et niveau de rendement
<b>Maïs grain (récolte immature)</b>	Mi-avril après labour (mi-mars) et plusieurs passages mécaniques superficiels pour reprise et faux semis (5-15 cm – outils à dents ou à disques). Implantation au semoir monograine.	3t/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 110 q/ha
<b>Couvert moutarde-seigle-phacélie</b>	A partir de mi-septembre après un ou deux passages de déchaumeur			Fin février ; broyage du couvert et enfouissement par labour (25 cm) ; ≈ 1 tMS/ha
<b>Soja</b>	Labour fin février. Semis début mai après plusieurs passages mécaniques superficiels (5-15 cm – outils à dents ou à disques). Implantation au semoir monograine.		40 mm par tour d'eau – 4 tours d'eau en général	Mi-septembre. Rendement entre 35 et 45 q/ha
<b>Blé tendre d'hiver - féverole</b>	Mi-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		Début à mi-juillet. Rendement du blé entre 40 et 50 q/ha
<b>Couvert de féverole</b>	Fin août après deux passages de déchaumeur			Mi-octobre, broyage du couvert et enfouissement par labour (25 cm) ; ≈ 1,5 tMS/ha
<b>Orge d'hiver (brassicole)</b>	Labour mi-octobre. Semis 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		Fin juin. Rendement entre 40 et 50 q/ha
<b>Couvert de trèfle</b>	Semé sous couvert de l'orge (semis début mars à la volée avec un passage de herse étrille pour enfouir partiellement les graines)			Mi-mars ; broyage du couvert et enfouissement avec labour (25 cm) ; > 2 tMS/ha
<b>Maïs grain (récolte immature)</b>	Mi-avril après labour (mi-mars) et plusieurs passages mécaniques superficiels pour reprise et faux semis (5-15 cm – outils à dents ou à disques). Implantation au semoir monograine	3t/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 environ 100 q/ha
<b>Couvert moutarde-seigle-phacélie</b>	A partir de fin septembre après un ou deux passages de déchaumeur			Fin février ; broyage du couvert et enfouissement par labour (25 cm) ; ≈ 1 tMS/ha
<b>Pois chiche</b>	Labour fin janvier. Semis mi-février après plusieurs passages mécaniques pour reprise du labour et faux-semis (5-15 cm – outils à dents ou à disques). Implantation au semoir monograine		35 mm par tour d'eau – 3 tours d'eau en général	Récolte fin juillet. Rendement attendu (10-15 q/ha)
<b>Blé tendre d'hiver</b>	Mi-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)		Début à mi-juillet. Rendement entre 40 et 50 q/ha
<b>Colza associé</b>	Semis mi-août après plusieurs passages mécaniques superficiels (5-15 cm – outils à dents ou à disques). Semis avec mélange de plantes compagnes (avec légumineuse)	800 kg/ha d'un engrais organique (9% N)		Récolte début juillet. Rendement attendu (15-20 q/ha).
<b>Couvert maintenu ou semis d'un couvert plurispécifique avec légumineuses</b>	Semé avec le colza ou fin août selon l'option			Mi-mars ; broyage du couvert et enfouissement avec labour (25 cm) ; > 2 tMS/ha

Ce système de culture s'appuie sur une rotation de 8 ans construite sur une alternance tous les deux ans de cultures d'hiver et de printemps et maximise la présence de couverts végétaux et d'associations de culture. La date de destruction des couverts dépend de leur état et de la nécessité d'avoir recours ou non à un labour.

L'alternance de cultures de printemps et de cultures d'hiver vise à réguler le développement de la flore adventice et d'éviter l'apparition d'espèces problématiques (vivaces notamment). Les adventices sont également contrôlées par l'implantation de couverts, par le recours au labour (pas systématique) et à divers travaux du sol superficiels avec des outils à dents en interculture et par des passages de bineuses ou de herses étrilles pendant la culture. Le nombre de passages mécaniques dépend du salissement de la parcelle.

L'agriculteur apporte des engrais organiques pour les cultures de maïs grain, blé tendre d'hiver et orge d'hiver afin de pallier en partie les carences azotées souvent observées dans ce type de système de production. Pour autant, un des objectifs de ce système est d'améliorer la nutrition azotée des cultures et réduire la quantité d'engrais utilisés 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).

La rotation des cultures de ce système a été réfléchi pour maintenir une proportion de cultures à forte valeur ajoutée en AB importante mais aussi pour réduire globalement les besoins en azote de la rotation. L'objectif fixé est que cela ne pénalise pas la marge brute moyenne annuelle. De plus, les couverts végétaux implantés contiennent souvent des légumineuses, parfois même en pur (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.

Les couverts végétaux ont aussi vocation à couvrir et protéger les sols et réguler le développement des adventices. Afin de maximiser leur développement, ils sont implantés le plus tôt possible derrière la récolte des cultures de vente, voire en association avec les cultures de vente. Ils sont ensuite détruits au plus près 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. Ils sont en général plutôt bien développés (biomasse sèche supérieure à 1, voire 2 T/ha).

Globalement, le niveau de production des cultures est comparable, voire supérieur à ce qui est observé en moyenne dans la région (en AB). La variabilité des rendements est plus importante pour le blé tendre d'hiver car la productivité dépend fortement des conditions climatiques de printemps. L'irrigation des cultures de printemps (maïs grain et soja) permet ainsi une bonne stabilité des rendements.

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.

### **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 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

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 15 années climatiques, de 2005 à 2019.

La culture de pois chiche a été remplacée par une culture de pois de printemps (pois chiches non encore paramétré dans la version Syst'N® 1.5). Les couverts d'interculture plurispécifiques avec des légumineuses ont été remplacés par un couvert de légumineuse fourragère et les couverts d'interculture sans légumineuses ont été remplacés par des couverts de moutarde pure (une des espèces présente dans les couverts plurispécifiques).

Enfin, la version Syst'N® 1.5 ne permettant pas de simuler des associations de culture, le couvert semé à la volée dans la culture d'orge d'hiver au printemps a été remplacé par un semis d'une légumineuse

fourragère le lendemain de la récolte de l'orge et l'association blé-féverole ou le colza associé aux légumineuses ont été remplacés respectivement par un blé et un colza non associés.

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

## V. Evaluation des pertes d'azote

### a. Présentation des résultats moyens du système de culture

Les flux d'azote moyens 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 121 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 (soja + pois chiche + intercultures de légumineuses) représentent 73 kgN/ha/an.

Les sorties moyennes d'azote à l'échelle du système de culture sont de 92 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 24 kg/ha/an tandis que les pertes d'azote par volatilisation de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) sont de 1 kg/ha/an.

Tableau 4 : Flux moyens simulés à l'échelle annuelle du système de culture présenté

<b>a</b>	<b>Entrées d'azote (kgN/ha/an)</b>	<b>a1</b> : Apport: fertilisation minérale	0
		<b>a2</b> : Apport: fertilisation organique	51
		<b>a3</b> : Fixation biologique d'azote	71
<b>b</b>	<b>Sorties d'azote (kgN/ha/an)</b>	<b>b1</b> : Exportation par les récoltes	95
		<b>b2</b> : Exportation par les résidus de cultures exportés de la parcelle	0
<b>c</b>	Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kgN/ha/an)		110
<b>d</b>	<b>Pertes d'azote moyennes annuelles (kgN/ha/an)</b>	<b>d1</b> : Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	0,1
		<b>d2</b> : Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	1
		<b>d3</b> : Nitrate lessivé (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	23
		<b>d4</b> : Nitrate ruisselé (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0
<b>e</b>	Lame d'eau drainante annuelle (mm d'eau/an)		185

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.

<b>a-b</b>	Bilan apparent : Entrées – Sorties par exportation (kgN/ha/an)	27
<b>a - (b+d)</b>	Variation du stock d'azote total dans le sol (kgN/ha/an)	3
<b>(d3*100)/e</b>	Pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante (kgN/100 mm)	12
<b>(d3*100*4.43)/e</b>	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)	55
<b>d2/(a1+a2)</b>	Pertes d'azote sous forme d'ammoniac (NH <sub>3</sub> ) en % des apports totaux	0,02

Le bilan apparent à l'échelle pluriannuelle de ce système de culture est de +27 kgN/ha/an. Ce bilan 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 ne s'enrichit pas en azote ou de façon négligeable (3 kg/ha/an).

Les pertes d'azote par lixiviation pour 100 mm de lame d'eau drainante sont de 12 kg. Si on convertit cette quantité d'azote en nitrate les pertes par lixiviation des nitrates s'élèvent alors à 55 kg ce qui correspond à une concentration moyenne en nitrate supérieure au seuil de potabilité des eaux (50 mgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l). En revanche, les pertes d'azote par volatilisation de l'ammoniac sont négligeables 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 les années climatiques sur lesquelles la culture (ou le couvert) concernée est présente.

Ce graphique permet de repérer 2 grandes périodes de pertes d'azote par lixiviation :

- Pendant la période automnale-hivernale sous le blé tendre d'hiver : de novembre à avril les pertes d'azote par lixiviation s'élèvent à 14 kgN/100 mm d'eau drainée lors de la saison 2015-2016 et peuvent atteindre juste sur la période de novembre à janvier de la saison 2010-2011 à 22 kgN/100 mm d'eau drainée.
- Pendant la période automnale-hivernale sous le couvert d'interculture de trèfle et après sa destruction : de novembre à avril les pertes d'azote par lixiviation s'élèvent à 25 kgN/100 mm d'eau drainée lors de la saison 2013-2014 et à 14 kgN/100 mm d'eau drainée pour la saison 2017-2018.

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). Les pertes simulées sous le couvert de moutarde pour la saison 2014-2015 (de novembre à janvier) s'élèvent à 10 kgN/100 mm d'eau drainée mais sont nulles pour la saison 2018-2019.

On voit ici que les pertes d'azote par lixiviation sont variables selon les années climatiques. Les figures 4, 5 et 6 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 et par volatilisation sur les 15 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.**

RA2 – Système céréalier sans élevage conduit en AB

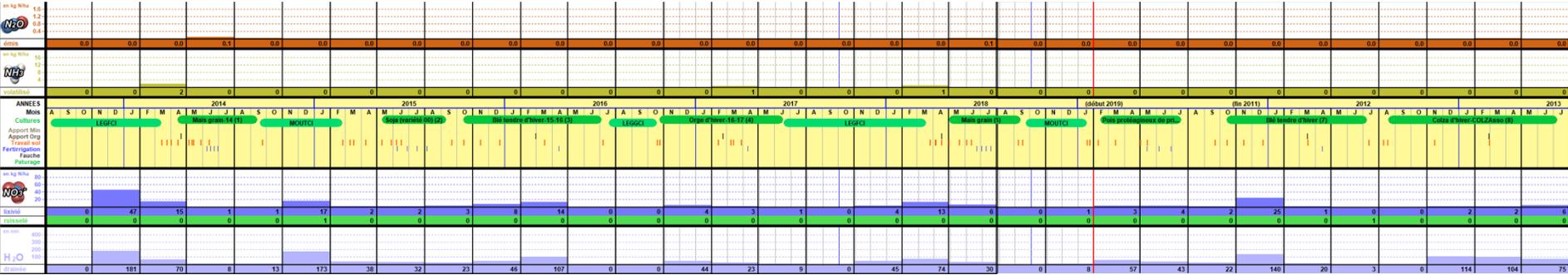


Figure 3 : Dynamique des pertes moyennes d’azote par lixiviation et volatilisation simulées sur 14 années climatiques (2005-2019).





RA2 – Système céréalier sans élevage conduit en AB

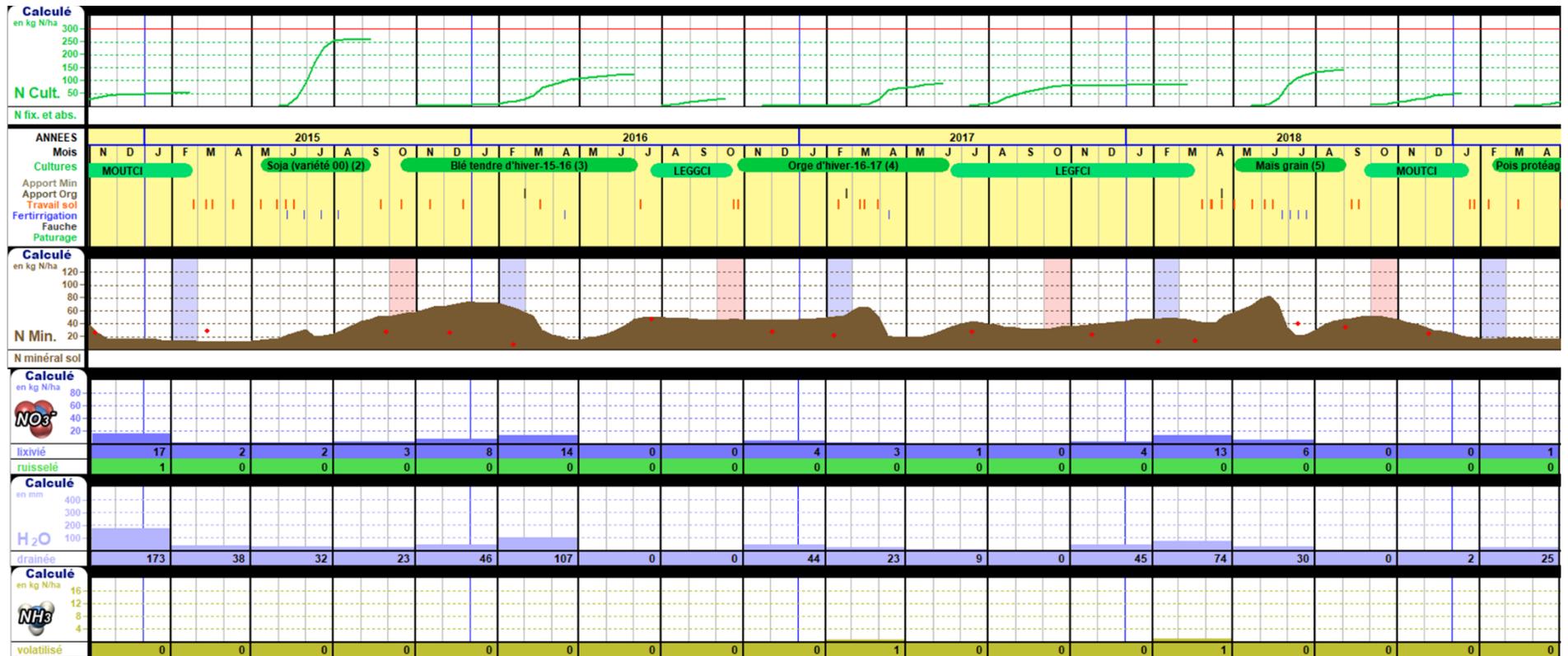


Figure 6 : Dynamiques de l'azote au sein des peuplements végétaux, dans le profil de sol et pertes d'azote par lixiviation ( $\text{NO}_3^-$ ), lame d'eau drainante (mm) et pertes d'azote par volatilisation ( $\text{NH}_3$ ) – Période 2014-2019.

#### Analyse des dynamiques d'azote pour la période 2005-2010 – Figure 4

L'analyse de cette 1<sup>ère</sup> période montre 3 grandes situations pour lesquelles des pertes d'azote par lixiviation sont importantes et dépassent les 10 kgN/100 mm d'eau drainée.

- Pendant les périodes du couvert d'interculture composé d'une légumineuse fourragère (trèfle) implantée entre le colza et le maïs (2005-2006) et entre l'orge d'hiver et le maïs (2009-2010). En 2005-2006 les pertes s'élèvent à 15 kgN/100 mm d'eau drainée lors de la période février-avril. Le développement du couvert végétal a permis pendant la période hivernale de maintenir la quantité d'azote minéral du sol aux alentours de 40 kgN/ha et de limiter la lame d'eau drainante. Les pertes sont nulles pendant cette phase du couvert d'interculture. Elles surviennent entre mars et avril après la destruction et l'enfouissement de la biomasse du couvert par labour. La minéralisation basale de l'azote organique du sol entraîne une accumulation d'azote minéral dans le sol qui n'est plus immobilisé par le couvert d'interculture, générant ainsi des pertes par lixiviation lors des pluies printanières entre la destruction du couvert et les premiers stades de développement du maïs. En 2009-2010 les pertes s'élèvent à 20 kgN/100 mm d'eau drainée lors de la période novembre-avril. Ce couvert végétal s'est moins développé que le 1<sup>er</sup> (courbe d'absorption de l'azote dans la biomasse végétale plus faible) et l'immobilisation de l'azote minéral et l'absorption d'eau du sol a par conséquent été moindre. L'azote minéral du sol s'est donc accumulé dans le sol pour atteindre 60 kgN/ha et a été en parti entraîné par la lame d'eau drainante. De l'azote est également perdu entre la destruction du couvert d'interculture et l'implantation du maïs, les facteurs expliquant ces pertes sont les mêmes que ceux mentionnés pour la période 2006.
- Pendant la période automnale et hivernale sous le blé tendre d'hiver (2007-2008). Ces pertes s'élèvent à 9 kgN/100 mm d'eau drainée ; elles sont majoritairement concentrées à l'automne 2007. Les quantités d'azote minéral dans le sol sous le blé tendre d'hiver au mois d'octobre se situent aux alentours de 40 kgN/ha et s'accumulent dans le profil de sol pour atteindre plus de 60 kgN/ha. Cet azote minéral est issu des reliquats d'azote minéral à la récolte du soja (40 kgN/ha), de la minéralisation basale de l'azote organique du sol et des résidus de culture du soja. Lors de la période automnale et hivernale les besoins en azote du blé sont faibles (voir les courbes d'accumulation de l'azote dans la biomasse du blé) ce qui explique les pertes d'azote simulée sur cette période. 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.
- Pendant la succession du couvert d'interculture de féverole et de l'orge d'hiver sur la période août-avril 2008-2009. Une fin d'été exceptionnellement pluvieuse explique les pertes d'azote simulée lors de l'été 2008 sous le couvert d'interculture (11 kgN/100 mm d'eau drainée). La quantité d'azote minéral dans le profil de sol au moment de l'enfouissement de la féverole est de 40 kgN/ha. Cet azote en raison d'un automne 2008 pluvieux et des faibles besoins en azote de l'orge d'hiver expliquent les pertes d'azote lors de la période automnale de 2008. Ces pertes importantes s'élèvent à 22 kgN/100 mm d'eau drainée. Les pertes d'azote pendant l'hiver 2009 sont plus faibles (9 kgN/100 mm d'eau drainée) et sont dues à l'accumulation de l'azote minéral dans le profil de sol issu de la minéralisation basale de l'azote organique du sol et des résidus du couvert d'interculture de féverole.

Lors de la phase de succession maïs-couvert de moutarde-soja les pertes d'azote par lixiviation sur cette période 2005-2010 sont faibles (< 5 kgN/100 mm d'eau drainée). L'azote issu de la minéralisation de la biomasse du couvert de trèfle et l'engrais organique apporté à l'implantation du maïs est très

bien valorisé par le maïs. L'interculture entre le maïs et le soja semble aussi efficace pour immobiliser les reliquats azotés pourtant importants à l'automne (> 60 kgN/ha).

A noter que 3 kgN sous forme d'ammoniac sont perdus après l'épandage de l'engrais organique à l'implantation du maïs (avril 2006). Cela représente 3 % de la quantité d'azote total apporté par cet engrais organique.

### **Analyse des dynamiques d'azote pour la période 2010-2014 – Figure 5**

L'analyse de cette 2<sup>nd</sup>e période montre 3 grandes situations pour lesquelles des pertes d'azote par lixiviation sont importantes et dépassent les 10 kgN/100 mm d'eau drainée.

- Sous la culture du maïs au printemps 2010 les pertes d'azote par lixiviation s'élèvent à 26 kgN/100 mm d'eau drainée. Ces pertes sont dues à une accumulation de l'azote minéral dans le profil de sol (> 60 kgN/ha) conjugué à des conditions climatiques pénalisantes pour le développement du maïs. La courbe d'accumulation de l'azote au sein de la biomasse du maïs est très faible lors des premiers mois (froid et pluies). L'azote qui s'accumule alors dans le profil (issu de la minéralisation basale de l'azote organique du sol et de la minéralisation du couvert d'interculture enfoui et de l'engrais organique apporté) est alors entraîné par la lame d'eau drainante. Ce phénomène n'est pas observé sous le maïs en 2014 car les conditions d'implantation du maïs en 2014 étaient favorables (accumulation d'azote dans la biomasse du maïs rapide et importante).
- La seconde période identifiée est à l'automne 2012 (de novembre 2012 à janvier 2013) sous blé tendre d'hiver. Ces pertes sont dues à une accumulation importante d'azote minéral dans le sol qui atteint 100 kg/ha en octobre. Cet azote est issu de la minéralisation basale de l'azote organique du sol (qui n'est absorbé par aucune culture ou couvert lors de l'été) et de la minéralisation des résidus de culture du pois chiche récolté en juillet. Les faibles besoins en azote de l'orge lors de la période hivernale et ses faibles prélèvements d'eau expliquent alors les pertes simulées dans cette situation.
- La troisième période identifiée est à l'automne-hiver 2013-2014 sous le couvert d'interculture composé d'une légumineuse fourragère (trèfle) implantée entre le colza et le maïs. Entre novembre et janvier les pertes s'élèvent à 26 kgN/100 mm et à 21 kgN/100 mm d'eau drainée entre février et avril. Ces pertes s'expliquent en grande partie par un hiver 2014 très pluvieux.

Les autres phases de cette période 2010-2014 les pertes d'azote par lixiviation sont faibles (< 5 kgN/100 mm d'eau drainée). L'azote issu de la minéralisation de la biomasse du couvert de trèfle et l'engrais organique apporté à l'implantation du maïs est très bien valorisé par le maïs (notamment en 2014). L'interculture entre le maïs et le pois chiche semble aussi efficace pour immobiliser les reliquats azotés à l'automne 2014 (> 40 kgN/ha). Les pertes d'azote par lixiviation sous le pois chiche et le colza sont, elles-aussi, faibles (< 5 kgN/100 mm d'eau drainée).

A noter que 2 kgN sous forme d'ammoniac sont perdus après l'épandage de l'engrais organique à l'implantation du maïs (avril 2014). Cela représente moins de 3% de la quantité d'azote total apporté par cet engrais organique.

### **Analyse des dynamiques d'azote pour la période 2014-2019 – Figure 6**

L'analyse de cette 3<sup>ème</sup> période montre également 3 grandes situations pour lesquelles des pertes d'azote par lixiviation sont dépassent les 10 kgN/100 mm d'eau drainée.

- Sous le couvert d'interculture de moutarde en automne 2014 les pertes d'azote par lixiviation s'élèvent à 10 kgN/100 mm d'eau drainée. L'azote minéral dans le profil de sol est lixivié. Cet azote est issu des reliquats azotés post-récolte du maïs qui sont d'environ 60 kgN/ha. Les conditions de cet automne ont été peu favorables au développement du couvert d'interculture qui n'a donc pas immobilisé l'azote minéral du sol ni réduit la lame d'eau drainante entraînant ainsi ces pertes.
- La seconde période identifiée est à l'automne-hiver 2015-2016 (de novembre 2015 à avril 2016) sous blé tendre d'hiver. Ces pertes s'élèvent à 13 kgN/100 mm d'eau drainée. Elles sont dues à une accumulation importante d'azote minéral dans le sol (> 60 kg/ha en octobre). Cet azote est issu de la minéralisation basale de l'azote organique du sol et de la minéralisation des résidus de culture du soja précédant le blé. Les faibles besoins en azote blé lors de la période automnale et hivernale et ses faibles prélèvements d'eau expliquent alors les pertes simulées dans cette situation.
- La troisième période identifiée est au printemps 2018 (de février à mars) sous le couvert d'interculture de trèfle implanté entre l'orge et le maïs. Ces pertes s'élèvent à 17 kgN/100 mm d'eau drainée. Le développement du couvert végétal a permis pendant la période hivernale de maintenir la quantité d'azote minéral du sol aux alentours de 40 kgN/ha et de limiter la lame d'eau drainante. Les pertes sont faibles pendant cette phase du couvert d'interculture. Elles surviennent entre mars et avril après la destruction et l'enfouissement de la biomasse du couvert par labour. La minéralisation basale de l'azote organique du sol entraîne une accumulation d'azote minéral dans le sol qui n'est plus immobilisé par le couvert d'interculture, générant ainsi des pertes par lixiviation lors des pluies printanières entre la destruction du couvert et les premiers stades de développement du maïs.

Les autres phases de cette période 2014-2019 les pertes d'azote par lixiviation sont faibles (< 5 kgN/100 mm d'eau drainée). L'azote issu de la minéralisation de la biomasse du couvert de trèfle et l'engrais organique apporté à l'implantation du maïs est très bien valorisé par le maïs. Le couvert d'interculture implanté entre le maïs et soja ou le pois chiche semble efficace pour immobiliser les reliquats azotés à l'automne (> 40 kgN/ha). Les pertes d'azote par lixiviation sous le soja, le pois chiche et l'orge d'hiver sont, elles-aussi, faibles (< 5 kgN/100 mm d'eau drainée).

## **VI. Diagnostic des performances azotées et discussion des résultats**

Les pertes totales d'azote par lixiviation sont en moyenne de 23 kgN/ha/an tandis que les pertes annuelles d'azote par volatilisation (NH<sub>3</sub>) sont négligeables. La très faible proportion d'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 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 ces faibles 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

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			<b>12 kgN lixivié / 100 mm de lame drainante et 0.02% de l'azote total apporté volatilisé</b>

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. L'effet précédent du soja génère un risque de lixiviation sous le blé sur la période simulée en 2011-2012 et 2015-2016. Seule la période 2007-2008 génère de faibles pertes d'azote par lixiviation en raison d'un automne-hiver plus sec (limitant la lame d'eau drainante) et de conditions climatiques automnales qui ont limité la minéralisation de l'azote organique du sol et son accumulation précoce dans le profil de sol (Figure 4). L'effet précédent du couvert d'interculture de féverole génère un risque de lixiviation sous l'orge sur la période simulée en 2008-2009 mais pas en 2016-2017. La fin d'été et l'automne très pluvieux en 2008 a généré une forte lame d'eau drainante au contraire de l'automne 2016.

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<sup>ème</sup> 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 ou entre le colza et maïs grain. Ces pertes d'azote par lixiviation ont été simulées surtout sur la période de février à mars et parfois lors

des premiers stades de développement du maïs grain. Ces pertes sont accentuées lors d'automne-hiver pluvieux. Après la destruction de ce couvert de légumineuse il peut y avoir des pertes d'azote par lixiviation notamment lors de printemps pluvieux.

Cependant, après cette phase d'interculture de légumineuse, 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 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 mais pas suffisante en cas de printemps pluvieux, situation fréquente dans cette zone. 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 être accentuées.

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 (Figures 4, 5 et 6). Ces espèces ont des capacités d'absorption précoce en azote ce qui réduit les risques de lixiviation de l'azote minéral du sol. Enfin, toutes les autres périodes de la succession culturale présentent elles aussi de faibles pertes d'azote par lixiviation (< 5 kgN/100 mm d'eau drainée). Ainsi les phases de culture de légumineuses à graines (soja, pois chiche) et de colza associé à une stratégie de couverture du sol maximale en période d'interculture limite ces pertes d'azote par lixiviation.

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. Des pertes peuvent également survenir entre la destruction des couverts d'interculture de légumineuses et la phase de croissance du maïs grain implanté 15-20 jours après l'enfouissement de ces couverts. Ceci est particulièrement vrai lors de printemps pluvieux.

Les autres phases de succession culturales de ce système sont quant à elles plutôt vertueuses 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 ou entre le maïs et le pois chiche. Les pertes sont également très faibles sous le colza associé. La diversité des cultures et la maximisation de la couverture végétale du sol en période d'interculture assurent de faibles pertes en dehors des périodes à risque identifiées.

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 faibles (23 kgN/ha/an). Il est également important de préciser que ce système de culture céréalier spécialisé est un prototype testé chez un agriculteur AB. Il n'est donc pas fréquemment rencontré à notre connaissance en Rhône-Alpes et plus largement en France.