



HAL
open science

Bilan azoté de chaque effluent et son mode de gestion associé (projet MétaMétha)

Antoine Savoie, Catherine Pasquier, Victor Moinard, Sabine Houot

► To cite this version:

Antoine Savoie, Catherine Pasquier, Victor Moinard, Sabine Houot. Bilan azoté de chaque effluent et son mode de gestion associé (projet MétaMétha). [Contrat] INRAE. 2020, 14p. hal-03222155

HAL Id: hal-03222155

<https://hal.inrae.fr/hal-03222155v1>

Submitted on 10 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

MétaMétha

L4.1 Bilan azoté de chaque effluent et son mode de gestion associé

| | |
|----------------------------|---|
| Projet | MétaMétha |
| Lot | D |
| Tâche ou sous-tâche | D1 Dresser un bilan azoté des différents modes de gestion et des effluents à partir de l'ensemble des données obtenues lors du suivi des émissions au champ |
| Livrable | L4.1 : Bilan azoté de chaque effluent et son mode de gestion associé |
| Date de remise | 02/06/2020 |
| Confidentiel | oui / non |

Etude réalisée par : INRA Centre Val de Loire, UE PAO

Partenaire responsable : INRA UR SOLS

Partenaire(s) impliqué(s) dans la rédaction du livrable : UR SOLS, UMR ECOSYS, UE PAO

Auteurs : Catherine Pasquier, UR SOLS, Antoine Savoie, UE PAO, Victor Moinard, ECOSYS

Financée par : *la région Centre Val de Loire*

Dans le cadre des appels à projets *d'intérêt régional*

Version 2 – avril 2020

Action D1 : Dresser un bilan azoté des différents modes de gestion et des effluents à partir de l'ensemble des données obtenues lors du suivi des émissions au champ

L'azote est présent dans la nature sous deux états :

- à l'état libre, sous forme de N_2 , où il constitue 78 % de l'air que nous respirons,
- à l'état combiné, sous forme minérale – ammoniacale, nitrite, nitrate – ou sous forme organique.

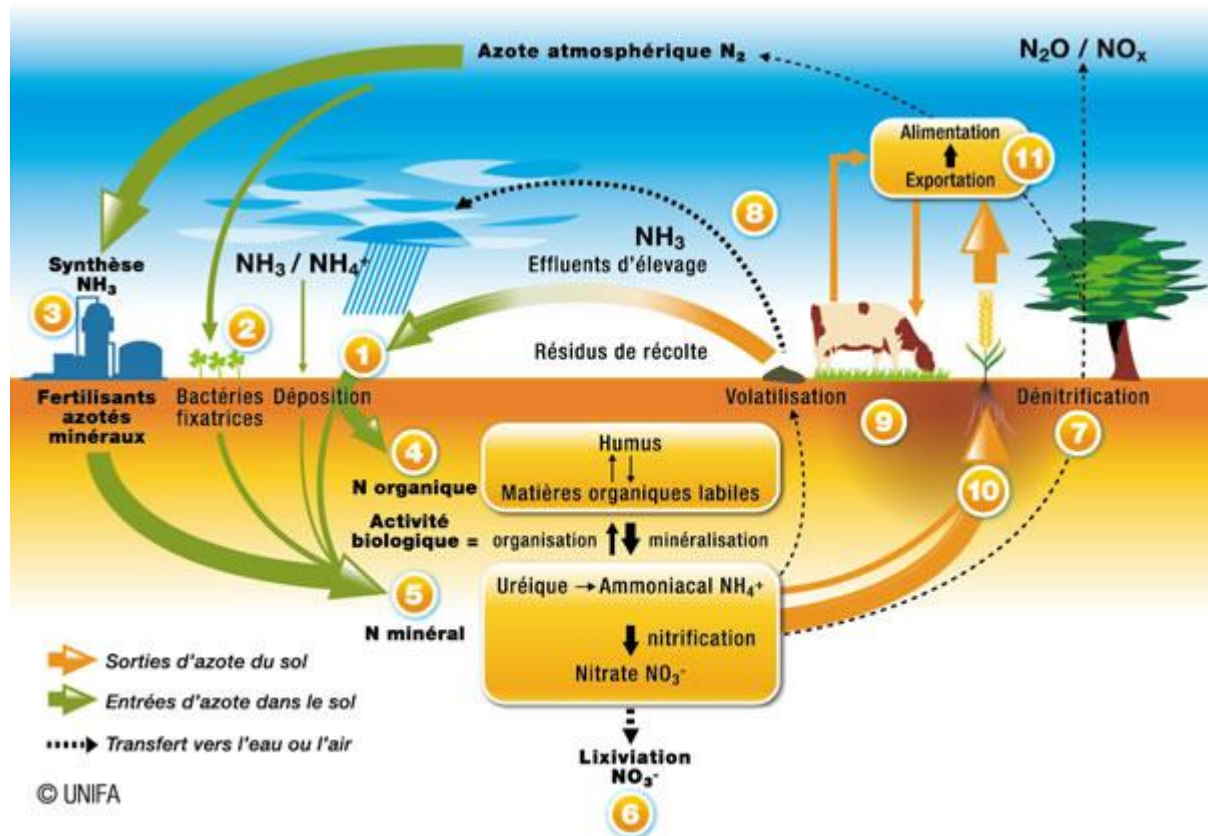


Figure 1 - Cycle de l'azote

- (1) Le recyclage d'éléments nutritifs contenus dans les matières organiques de toute nature : effluents d'élevage (lisier ou fumier), digestats de méthaniseurs, et résidus de culture constitue une ressource importante pour la fertilisation. L'azote est présent dans les effluents principalement sous la forme organique (Norg).
- (3) La synthèse de l'ammoniac utilise le gaz naturel et l'eau pour produire du dihydrogène (H_2) et le combiner au diazote (N_2) présent dans l'atmosphère pour former l'ammoniac (NH_3), matière première des grands engrais azotés. L'engrais azoté peut contenir de l'azote sous forme uréique, ammoniacale, nitrique ou un mélange de ces formes. Il est proposé sous forme liquide (solution azotée) ou solide en granulés (ammonitrate).
- (4) L'organisation microbienne transforme l'azote minéral en matière organique. L'activité des bactéries du sol est principalement stimulée par l'ammonium. L'azote organique n'est pas directement assimilable par les plantes ; il doit d'abord être minéralisé. La

minéralisation de la matière organique du sol (et des effluents) produit de l'ammonium (NH_4^+).

- (5) La nitrification par les bactéries du sol transforme l'ammonium (NH_4^+) en nitrate (NO_3^-) dans un délai pouvant aller de quelques jours à quelques semaines. Des pertes sous formes de protoxyde d'azote (N_2O) ou d'oxyde d'azote peuvent survenir durant ce processus.
- (6) La lixiviation du nitrate est un entraînement des ions (NO_3^-) en profondeur par l'eau du sol. Cela se produit principalement en hiver lorsque l'excès d'eau fait migrer le nitrate hors de portée des racines. Une fertilisation ajustée contribue à prévenir le risque de lixiviation pendant la période d'interculture et pendant les pluies hivernales.
- (7) La dénitrification a lieu lorsque les micro-organismes se trouvent en situation d'anoxie (stagnation de l'eau et compactage du sol). Lors de ce processus, les bactéries du sol transforment le nitrate (et les nitrites) en diazote gazeux (N_2) et plus marginalement en protoxyde d'azote (N_2O) et oxydes d'azote (NO_x) qui rejoignent l'atmosphère.
- (8) L'hydrolyse de l'urée par les enzymes du sol convertit l'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) en ammonium et en CO_2 . En fonction de la température, l'hydrolyse est plus ou moins rapide (d'une journée à une semaine). Le pH du sol autour des granulés d'urée augmente de manière significative durant le processus, favorisant ainsi la volatilisation de l'ammoniac NH_3 produit au cours de la réaction. Si cela se produit à la surface du sol et que les apports ne sont pas enfouis, les pertes sont plus importantes.
- (9) L'assimilation de l'ammonium par les racines est plus lente que celle du nitrate. L'ammonium de charge positive (NH_4^+) est adsorbé sur la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, et les racines doivent l'atteindre. La majeure partie de l'ammonium est transformée en nitrate avant absorption par les plantes.
- (10) L'assimilation du nitrate est rapide en raison de sa forte mobilité en solution dans l'eau du sol. La majorité des cultures annuelles utilisent préférentiellement le nitrate à l'ammonium.
- (11) De l'azote organique est exportée dans la culture à la récolte et est transformée en nourriture (humaine ou animale).

Les intrants d'azote sont donc répartis sous différentes formes de composés organiques vers différents compartiments : l'air, l'eau, le sol et la plante.

D1.1 Entrées d'azote

Notre site d'étude se trouve en zone vulnérable, les apports d'engrais organiques et minéraux sont donc soumis à la réglementation de la directive nitrates en Indre-et-Loire.

Les produits organiques résiduels (PRO) épandus sont selon la réglementation des :

- Fertilisants de type 1 : fumier de bovins et ovins. On assimile le digestat solide à un fumier.
- Fertilisants de type 2 : lisiers de bovins, digestats de méthanisation (liquide ou brut).

| Parcelle | PRO épandu | Culture | Période | Conditions pour épandre |
|-------------|---|--|-----------------------|---|
| A C | Fumier bovin Digestat solide | Blé « cultures implantées à l'automne ou en fin d'été (autres que colza) » | Juillet à mi-novembre | Autorisé |
| A C | Fumier bovin Digestat solide | Colza | Juillet à mi-novembre | Autorisé |
| E | Digestat brut | Blé | Août - septembre | Autorisé sous conditions ¹ ; Limité à 60kg d'N ammoniacal /ha |
| E | Digestat brut | Colza | Août - septembre | Limité à 70kg d'N ammoniacal /ha |
| A C E | Lisier bovin Digestat liquide Digestat brut | Blé | Dès février | Autorisé |
| A C E | Lisier bovin Digestat liquide Digestat brut | Colza | Dès février | Autorisé |

Tableau 1 – Synthèse des contraintes réglementaires s'imposant à l'essai²

D1.1.1 Résultats

Pendant les 3 années d'expérimentation au champ, différentes quantités de PRO et d'engrais ont été épandues. On distingue, d'un point de vue agricole, les amendements (ici fumier bovin, digestat solide) qui n'ont pas pour but premier d'apporter de l'azote à court terme. Leur fonction est d'améliorer le sol par l'apport de matière organique de d'éléments tels que le phosphore. Les fertilisants, souvent riches en azote, éventuellement aussi composés de phosphore et de potassium, servent à répondre aux besoins immédiats des plantes cultivées. Dans le projet, les fertilisants sont le lisier bovin, le digestat liquide, le digestat brut et l'azote minéral « chimique » en solution dite « 390 ». Le digestat brut a une position intermédiaire puisqu'il est utilisé en même que les PRO solides comme amendement mais aussi comme fertilisant au même moment que les autres PRO liquides et les engrais minéraux.

¹ L'épandage sur céréales n'est possible que si les surfaces en colza, prairie, cultures dérobées et CIPAN sont insuffisantes. On suppose pour les besoins de l'expérimentation être dans ce cas pour les semis de blé à l'automne 2018.

² Directive Nitrates : l'essentiel de la réglementation en Indre-et-Loire, février 2018, Chambre d'agriculture 37

Les amendements sont faits en août 2017 avant le semis de colza et en septembre 2018 avant le semis de blé, soit 2 ans sur 3. Les fertilisants sont apportés tous les ans au printemps en 1 ou 2 apports.

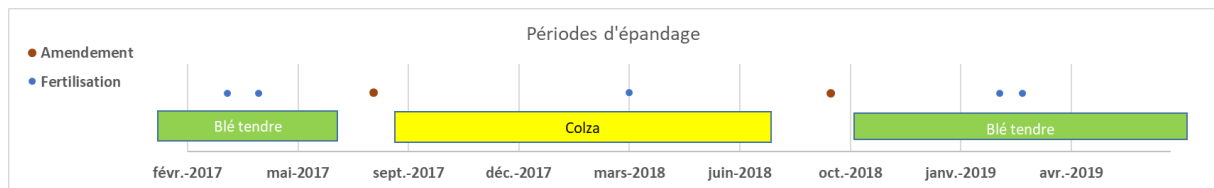


Figure 2 - Périodes d'épandage en culture et en interculture

Pour les bilans azotés, on rattache les amendements à la culture suivante qui va bénéficier d'une partie de l'azote apporté (minéralisation de l'azote organique). Ci-dessous sont présentées les doses des différentes formes d'azote épandues pour chaque période (2017, 2018, 2019) et chaque modalité.

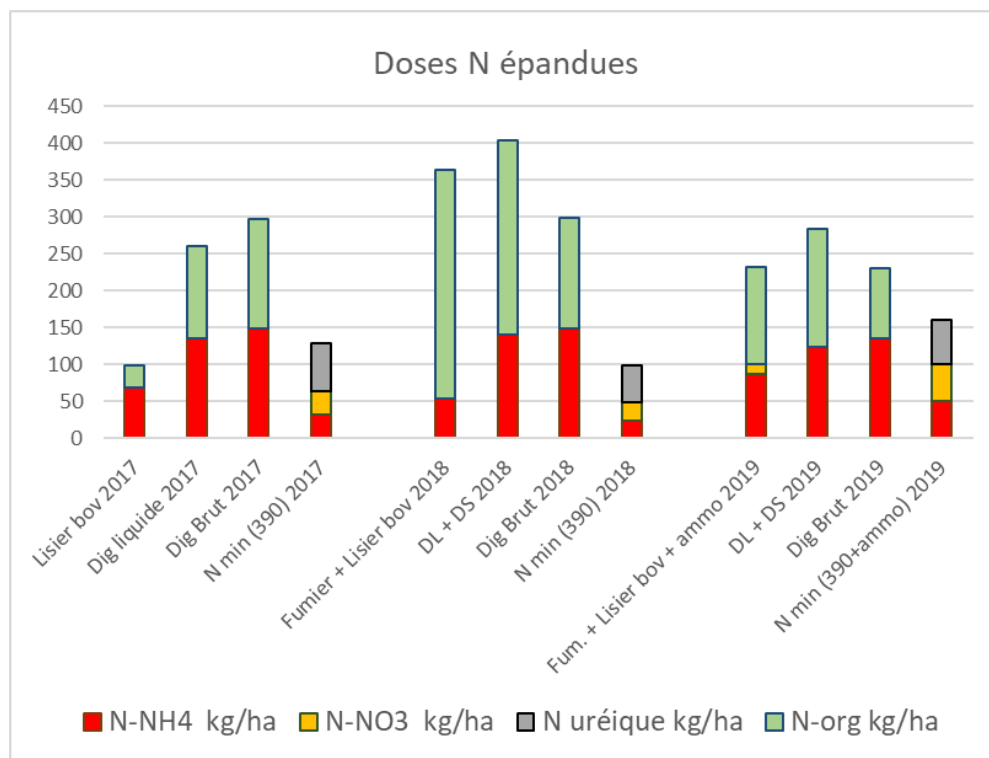


Figure 3 - Doses ($kg \cdot ha^{-1}$) des différentes formes d'azote apportées sur les parcelles A, B, C, E en 3 ans

Le tableau ci-dessous présente un récapitulatif des apports azotés.

| Parcelle | PRO épandu t de MB/ha | N total kg/ha | N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ , N-uréique kg/ha |
|------------------------------|--------------------------|------------------|--|
| A) lisier / fumier | 166 / 47 | 697 | 223 |
| B) N minéral | - | 389 | 389 |
| C) digestat Liquide / Solide | 145 / 49 | 948 | 401 |
| E) digestat brut | 181 | 828 | 434 |

Tableau 2 - Doses apportées en 3 ans

D1.1.2 Analyse

On constate que sur 3 ans les quantités d'azote total sont assez différentes selon les modalités, pour différentes raisons :

- Avant épandage, les PRO sont analysés pour calculer la dose à épandre. Mais le lisier épandu en 2017 était différent du lisier analysé avant l'épandage. Le PRO épandu avait été dilué (non souhaité). La dose calculée ne tenait pas compte de cette dilution.
- Il y a eu une différence parfois importante entre la quantité prévue et la quantité réellement épandue à cause du manque de portance du sol et de la taille réduite de la parcelle qui ne permettait pas d'avoir un tracteur avançant à la vitesse souhaitée pour épandre la bonne dose.
- Pour définir les quantités de PRO à épandre, on applique la formule suivante : quantité de PRO x teneur en N total x coefficient équivalent engrais = N efficace. Le coefficient équivalent engrais (keq) varie selon le PRO, la culture réceptrice et la période d'application. Il existe des tableaux du COMIFER³ donnant pour les digestats, des coefficients compris entre 0,30 et 0,90. Cela explique la différence importante entre les quantités d'azote totale apportée sur les modalités digestats (C et E) et la modalité azote minéral (B).

On cherche à avoir la même quantité d'azote efficace sur chaque modalité. A priori, la quantité d'azote minérale est une approximation de l'azote efficace avant expérimentation. Les quantités d'azote minéral épandues sont proches sur les parcelles B, C, E. En revanche, l'objectif n'a pas été atteint pour le lisier pour les raisons susmentionnées et la teneur de toute façon inférieure en azote du lisier (raison systémique).

³ Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

D1.2 Exportations par la plante

D1.2.1 Résultats

Les plantes pendant leur croissance mobilisent de l'azote minéral, qui à la récolte est exportée sous forme organique. Dans le cas du blé, le grain et la paille sont exportés. Seuls les grains de colza sont récoltés, les tiges et enveloppes sont restituées. Pendant l'essai, on a mesuré la production de chaque parcelle (rendement par ha en grains et en paille).

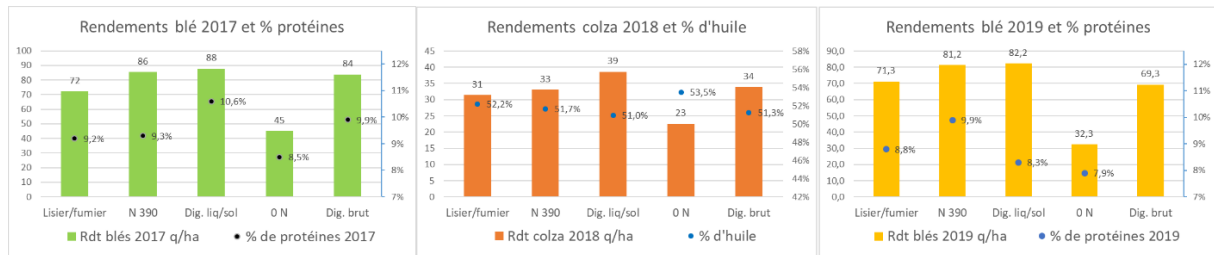


Figure 4 - Rendements en grain du blé et du colza (q/ha), taux de protéines et d'huile (%)

Des analyses de la teneur en azote ont été réalisées afin de déterminer la quantité d'azote exportée dans chaque modalité. Le graphique ci-dessous montre ce que la partie aérienne de la plante a exporté. En 2017 et 2019, pour le blé, il s'agit de l'azote exporté par la paille et le grain récoltés. Pour 2018, on n'exporte que le grain du colza (en gras).

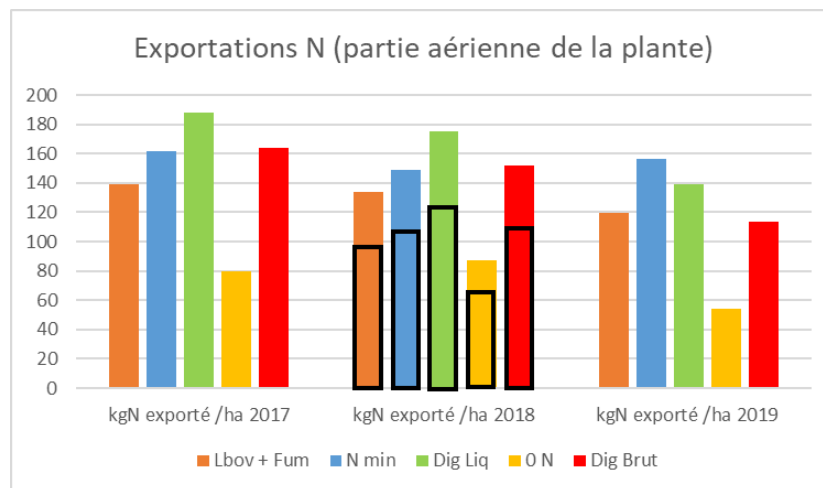


Figure 5 - Quantité d'azote dans la plante à la récolte, par modalité et par an

D1.2.2 Analyse

Les objectifs de rendements en blé (80 q) sont atteints en 2017 pour les parcelles B, C et E et en 2019 pour les parcelles B et C. Les objectifs de rendements en colza (35 q) sont presque atteints ou dépassés dans les différentes parcelles. La parcelle A est en retrait avec 31 q.

Pour la qualité de la récolte, dans tous les cas, les teneurs en protéines du blé sont inférieures à l'exigence de la filière (11,5%). Cela s'explique notamment par l'absence de « 3^e apport » d'azote que l'on positionne fin montaison à floraison du blé et qui permet d'augmenter la teneur en protéines du grain. Comme il n'est pas possible d'apporter des PRO à ce stade sur le blé, le recours à l'azote minéral permet en général d'obtenir un taux de protéines satisfaisant. Une fertilisation mixte PRO + azote minéral est donc conseillée et est déjà majoritairement pratiquée par les agriculteurs (cf. L1.1). La qualité du colza sur le critère de la teneur en huile ne fait quant à elle pas apparaître de fortes différences entre les systèmes étudiés.

Afin d'apprécier l'utilisation des PRO comme fertilisant, on utilise les indicateurs suivants qui donnent une idée de :

- l'efficacité de l'utilisation de l'azote : coefficient apparent d'utilisation (CAU)

$$\text{CAU} = (\text{N exporté} - \text{N exporté sur le témoin 0}) / \text{N apporté}$$

- l'efficacité par rapport à l'azote minéral : coefficient équivalent engrais (keq)

$$\text{keq} = \text{CAU du PRO considéré} / \text{CAU N min}$$

| | Apport N total | | | CAU | | | keq | | |
|-------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2017 | 2018 | 2019 | 2017 | 2018 | 2019 | 2017 | 2018 | 2019 |
| A - Lisier/fumier | 100 | 364 | 233 | 60% | 13% | 28% | 94% | 21% | 44% |
| B - N 390 | 129 | 99 | 161 | 64% | 62% | 63% | 100% | 100% | 100% |
| C - Dig. liq/sol | 260 | 404 | 284 | 42% | 22% | 30% | 66% | 35% | 47% |
| E - Dig. brut | 298 | 299 | 231 | 28% | 22% | 26% | 45% | 35% | 41% |

Tableau 3 - Apports azotés (kg N), CAU et keq

En 2017, le CAU est faible (28%) sur la parcelle E où l'on a observé une perte importante d'azote par volatilisation. Elle est moitié moindre pour le digestat liquide. Pour le lisier et l'N minéral, la volatilisation est encore plus faible (cf. ci-après).

Les CAU des systèmes ayant des amendements en été (A, C, E) en 2018 et 2019 sont assez faibles (13 à 30%) :

- Pour les PRO solides (A, C), une partie limitée de l'azote organique est minéralisée l'année N. Une partie seulement de l'azote total bénéficie à la plante.
- L'hypothèse pour expliquer des CAU et keq inférieurs en 2019 pour E (digestat brut) par rapport à C (digestats séparés) est que des pertes d'azote ont eu lieu après l'amendement (été 2018) par lixiviation. Les pertes par lixiviation ont donc pu limiter l'efficacité de ce PRO liquide (cf. ci-après).

D1.3 Suivi de la dynamique de l'azote dans le sol

D1.3.1 Résultats

Des reliquats azotés sur les premiers 100cm de sols ont été réalisés aux moment clés du cycle cultural :

- S1 : entrée d'hiver (minéralisation)
- S2 : sortie d'hiver (estimation de la lixiviation, S2-S1)
- S3 : récolte (surplus)

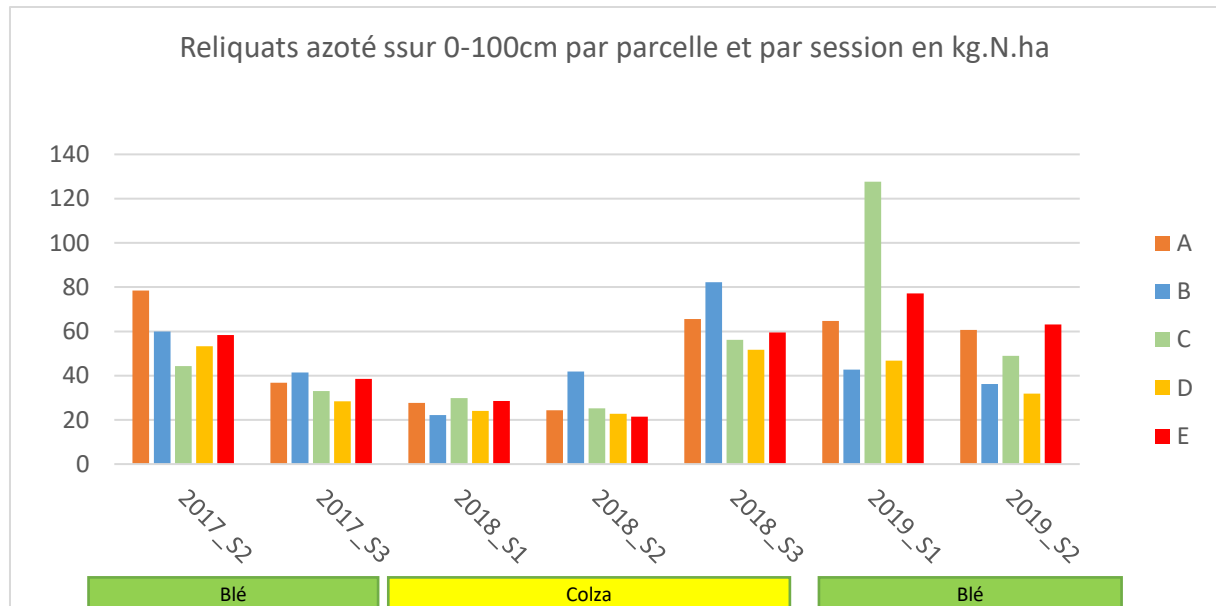


Figure 6 - Reliquats azotés

D1.3.2 Analyse

Le surplus après la culture de colza est assez élevé, jusqu'à 82kgN/ha sur la parcelle B, ce qui a engendré des reliquats azotés importants en début d'hiver 2019 sur la culture de blé et donc des pertes en nitrate durant les pluies hivernales (de 2019_S1 à 2019_S2).

On note des pertes en azote moins importante sur la culture du colza, malgré les apports d'été, en effet la culture de colza joue le rôle de CIPAN⁴ et profite de l'apport d'azote durant sa croissance avant l'hiver.

D1.4 Lixiviation des nitrates

Le dispositif de mesure dans les eaux des drains (débitmètres et préleveurs d'eaux) a subi plusieurs avaries pendant le projet. L'année 2017 a été particulièrement sèche pendant l'hiver et les regards qui accueillent les débitmètres ont été inondés pendant l'hiver 2018.

⁴ CIPAN : Culture Intermédiaire Piège à Nitrates

D1.4.1 Résultats

Les mesures obtenues en 2018 sur les débitmètres ne sont pas synchronisées avec les prélèvements d'eau (figure 7). On ne peut donc pas estimer la perte en azote dans les eaux de drainage.

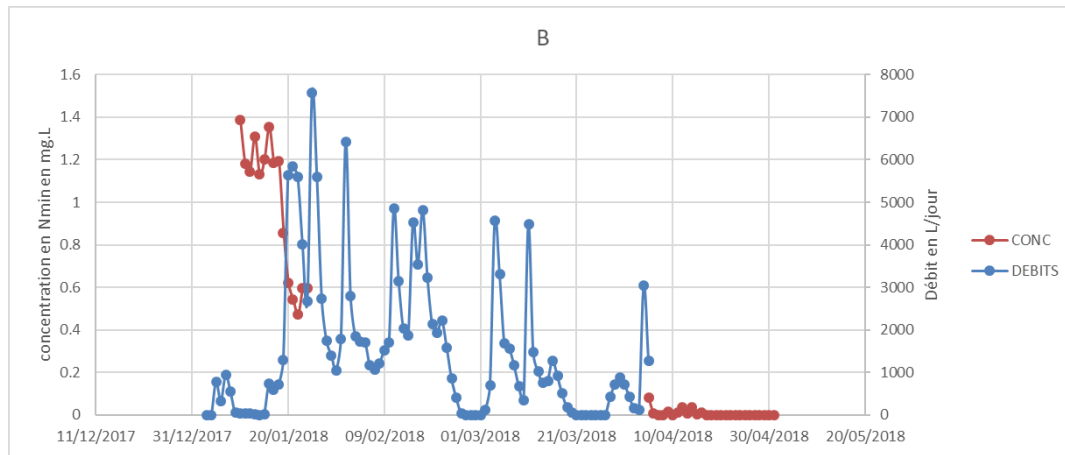
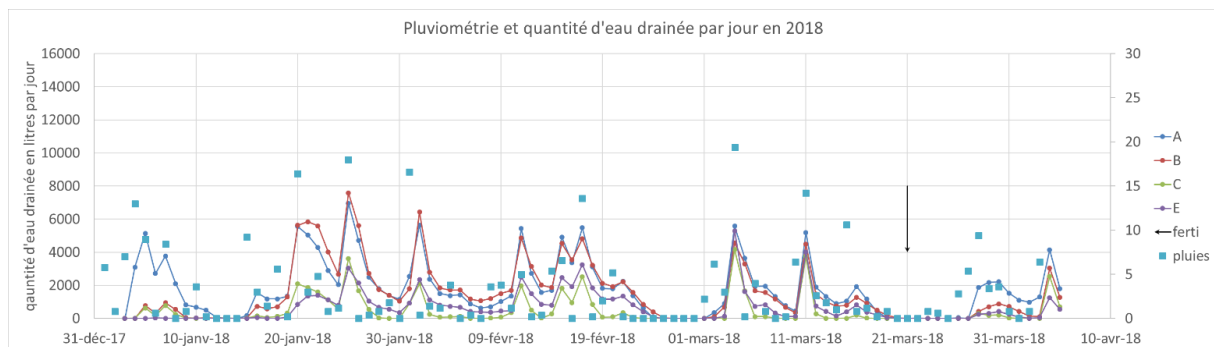


Figure 7 : parcelle B 2018, débit mesuré en sortie de drain et concentration en azote en mg.L^{-1}



L'analyse des mesures des débitmètres de chaque parcelle montrent que le débit augmente rapidement après une pluie importante lorsque le sol est à saturation. Il semble que les parcelles A et B réagissent plus vite elles présentent peut-être une plus faible capacité de rétention en eau.

Si on compare les débits mesurés sur la parcelle B entre 2018 et 2019 (figure 8), on observe que l'hiver 2018 a été plus humide et aurait donc pu favoriser la lixiviation de l'azote. Cependant la parcelle était en Colza et cette culture limite la lixiviation en période hivernale (cf. figure 6).

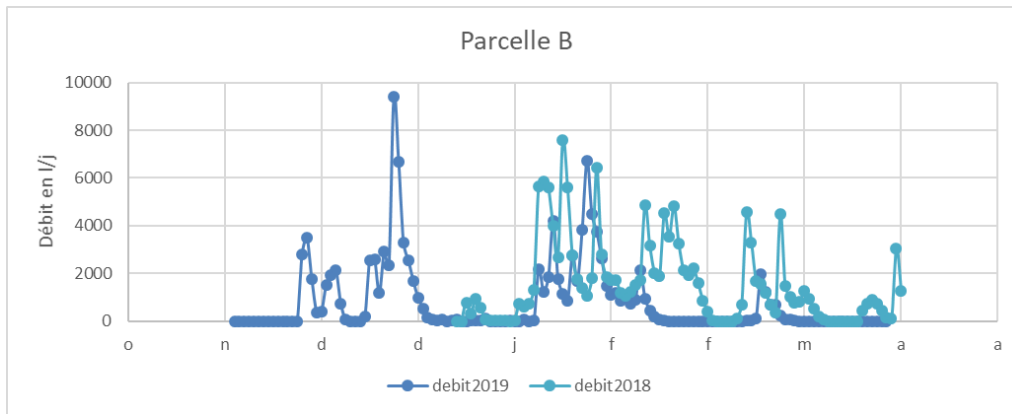


Figure 8 : comparaison des débits mesurés sur la parcelle B entre 2018 et 2019

La seule série de mesures exploitables pour calculer la lixiviation de l'azote est celle de l'hiver 2019.

Les mesures d'azote dans les prélèvements d'eau à la sortie des drains de l'année 2019 ont été analysés par le laboratoire d'ECOSYS.

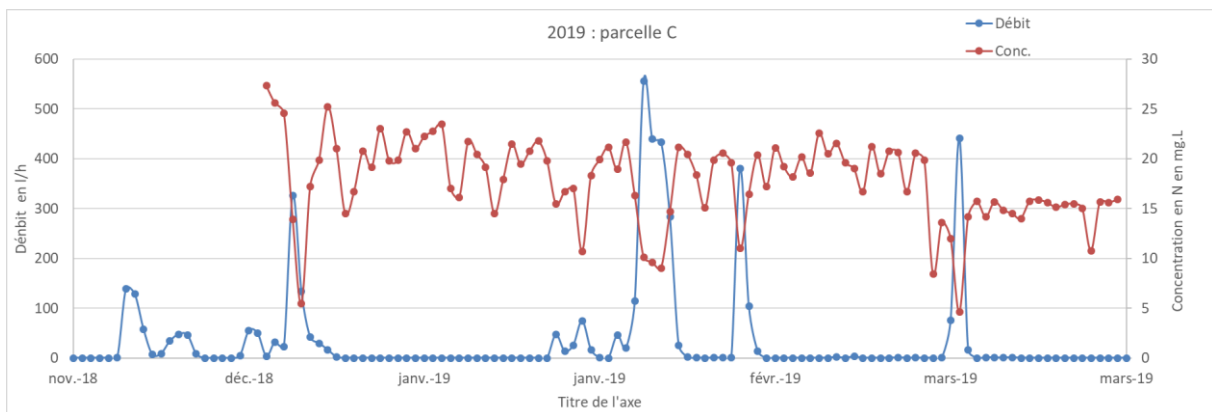


Figure 9 : exemple de la parcelle C, débit et concentration en azote des eaux

On observe une baisse de concentration en azote dans les prélèvements d'eau à chaque pic de débit d'eau mesuré à la sortie du drain. La concentration en azote pendant la phase hivernale est relativement élevée environ 20mg par litre. En reliant les concentrations moyennes en azote par jour et les débits moyens par jour on peut estimer la perte en azote par lixiviation sur chacune des parcelles :

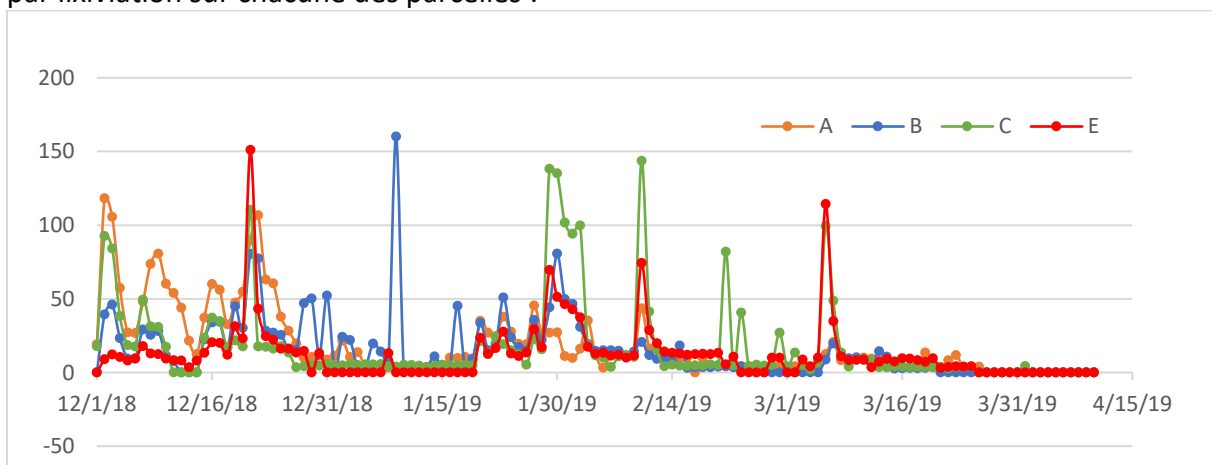


Figure 10 - Pertes en azote minéral par lixiviation en g/jour-1

| Bloc_Id | Qeau_min | Qeau_max | QN min_mes | QN max_mes |
|---------|----------|----------|------------|-------------|
| A | 114381 | 148998 | 10.2 | 13.4 |
| B | 107655 | 162017 | 7.2 | 11.1 |
| C | 103909 | 156307 | 7.8 | 13.0 |
| E | 60467 | 94021 | 10.1 | 15.4 |

Qeau_min : quantité d'eau drainée au minium en litres

Qeau_max : quantité d'eau drainée au maximum en litres

QN_min_mes : Quantité minimale d'azote minéral perdu par lixiviation en kg.ha⁻¹

QN_max_mes : Quantité minimale d'azote minéral perdu par lixiviation en kg.ha⁻¹

Les pertes en azote sont reliées directement à la quantité d'eau qui a été drainée sur chacune des parcelles.

En prévision des problèmes d'avaries sur les préleveurs d'eau, 4 bougies poreuses ont été installées sur chaque parcelle du site pendant l'hiver 2019. Elles permettent de connaître la concentration en NO₃⁻ de la solution du sol.

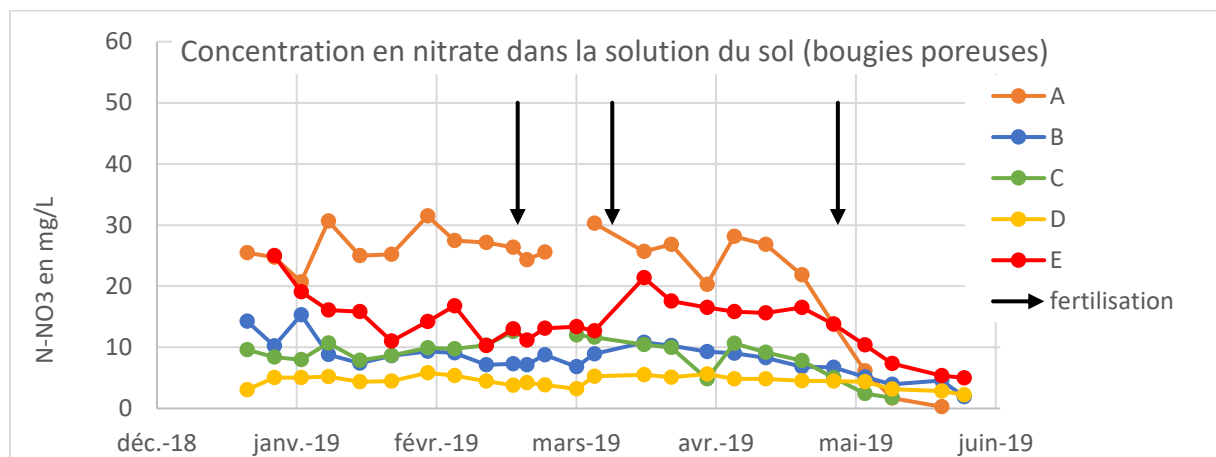


Figure 11 - Concentration en nitrate de la solution du sol

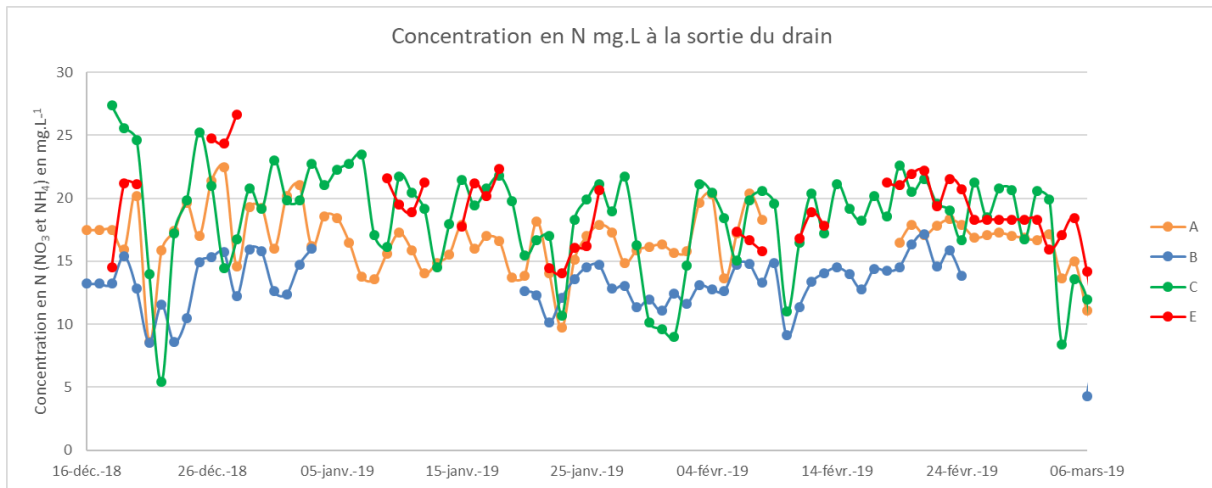


Figure 12 : concentration en N mg.L⁻¹ à la sortie du drain

D1.4.2 Analyse

L'analyse des données des bougies poreuses montre que la concentration en nitrate de la solution du sol ne semble pas réagir aux apports d'engrais sur les parcelles. Les valeurs sont assez stables de janvier à mai. La concentration est plus élevée sur la parcelle fertilisée avec le lisier (A).

Ces mesures directes de pertes en azote à la sortie des drains permettent de caler des modèles de flux d'azote comme STICS ou SystN (partie D.1.6). Le dispositif installé sur les parcelles (débitmètres couplés aux préleveurs d'eau) permet de suivre en continu les flux d'azote sortant par lixiviation. Les résultats sont relativement homogènes entre les différentes modalités pour l'année 2019, les valeurs vont d'environ 11 unités d'azote sur la parcelle B et 15 unités sur la parcelle E.

Les dynamiques des flux d'azote lixivié sont différentes entre les parcelles, ils sont probablement conditionnés par les types de sol et leur capacité de rétention en eau.

D1.5 Pertes gazeuses

D1.5.1 Résultats

Emissions de N.NH₃:

Emission de NH₃, en % de **N minéral** épandu en sortie d'hiver. Les barre d'erreurs représentent une erreur standard.

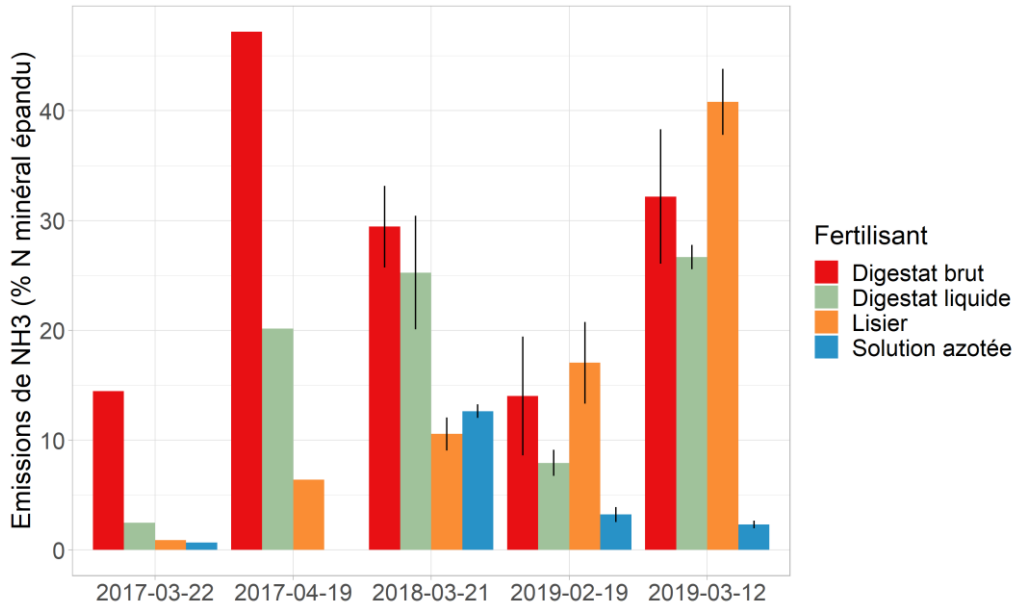


Figure 13 - Emissions d'ammoniac en sortie d'hiver

Emission de NH₃, en % de **N minéral** épandu en été. Les barre d'erreurs représentent une erreur standard.

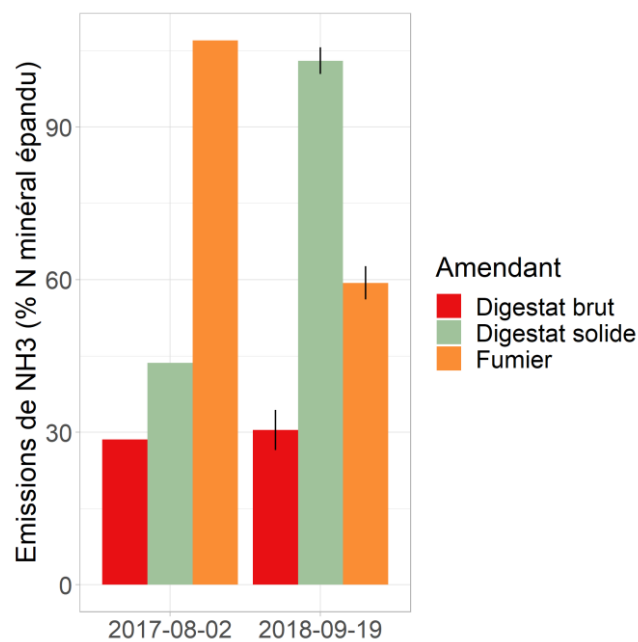


Figure 14 - Emissions d'ammoniac en été

Perte par volatilisation (3 ans, 7 épandages) en kgN/ha. Les barre d'erreurs représentent une erreur standard.

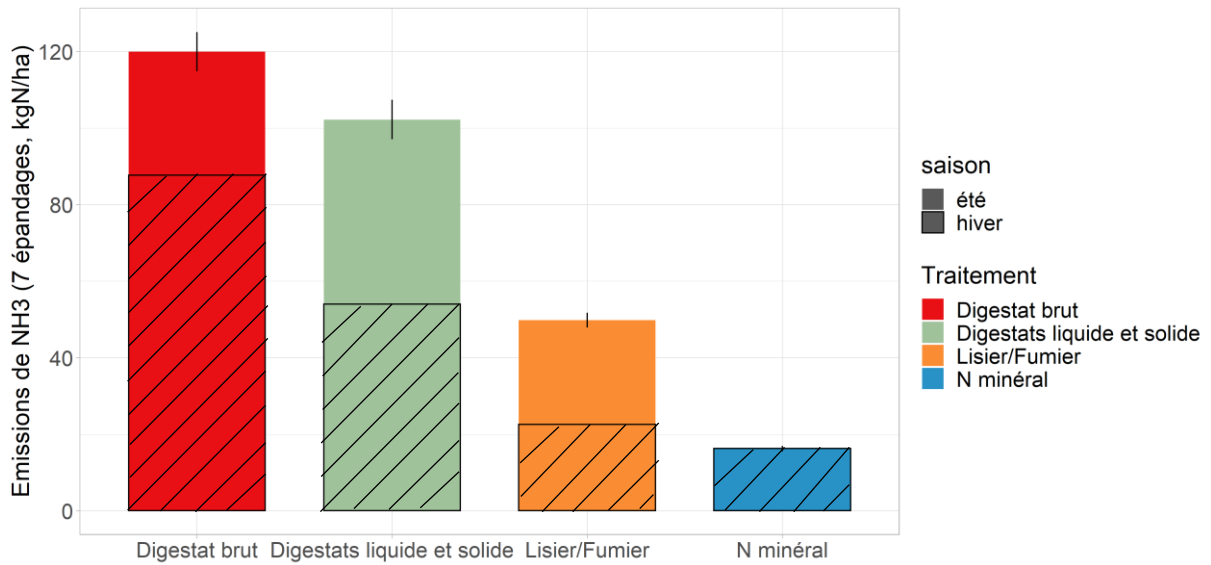


Figure 15 - Emissions d'ammoniac selon les périodes

Emissions de N.N₂O :

Flux de N₂O cumulés suite aux épandages d'hiver

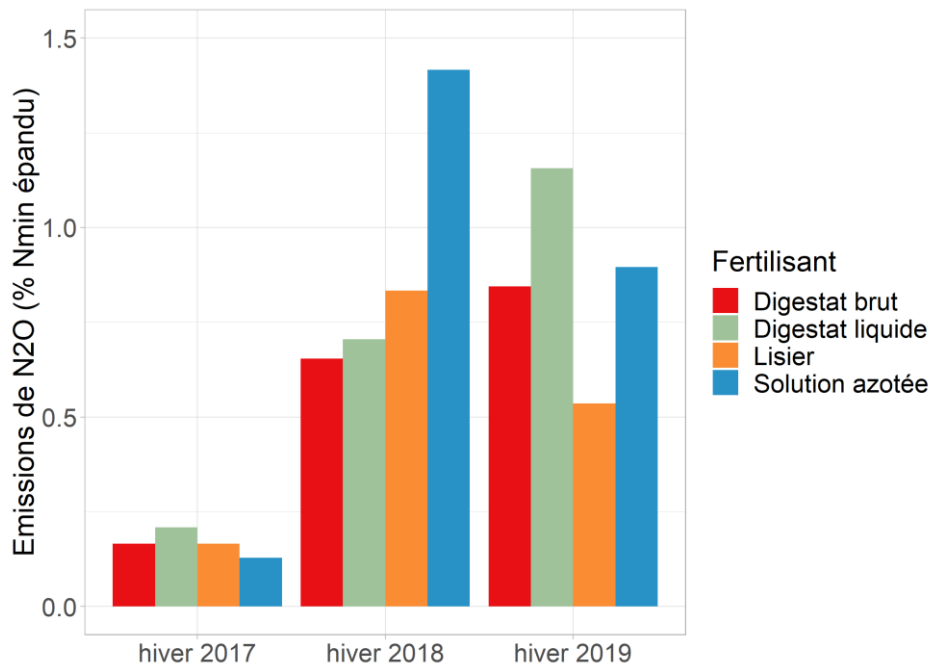


Figure 16 - Emissions cumulées de protoxyde d'azote en sortie d'hiver

Flux de N₂O cumulés suite aux épandages d'été :

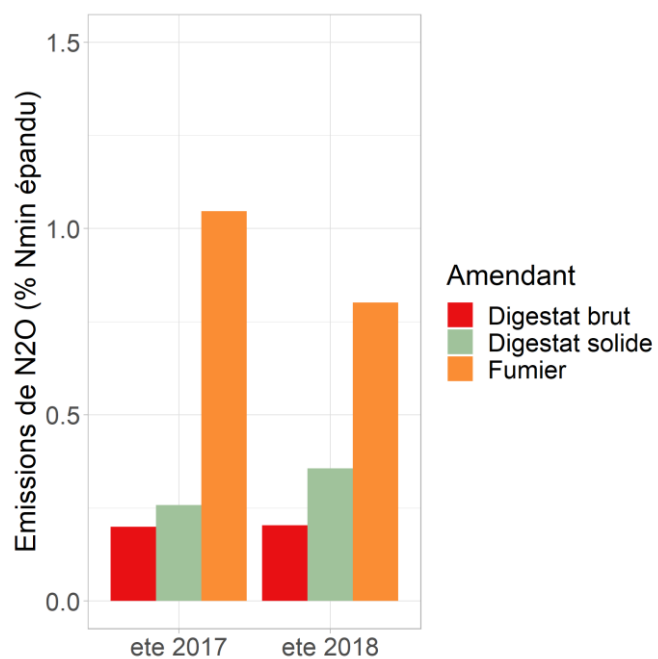
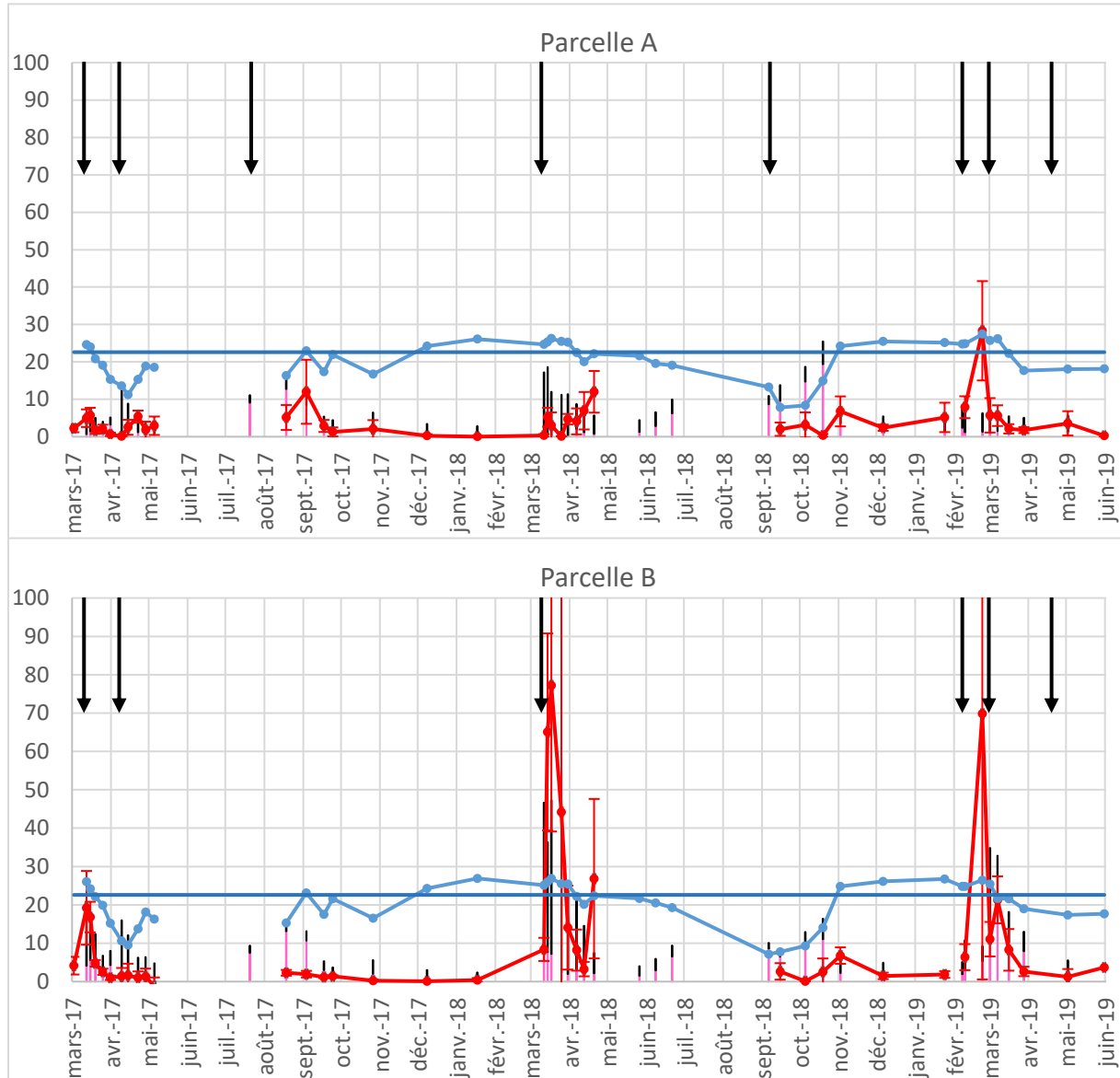


Figure 17 - - Emissions cumulées de protoxyde d'azote en été

Dynamique des flux de protoxyde d'azote par parcelle sur les 3 années. Les flèches représentent les épandages :

- teneur en ammonium en g/kg
- teneur en nitrate en g/kg
- Flux de N₂O gN/ha/j
- humidité massique de l'horizon de surface en %
- teneur en eau à capacité au champ en %



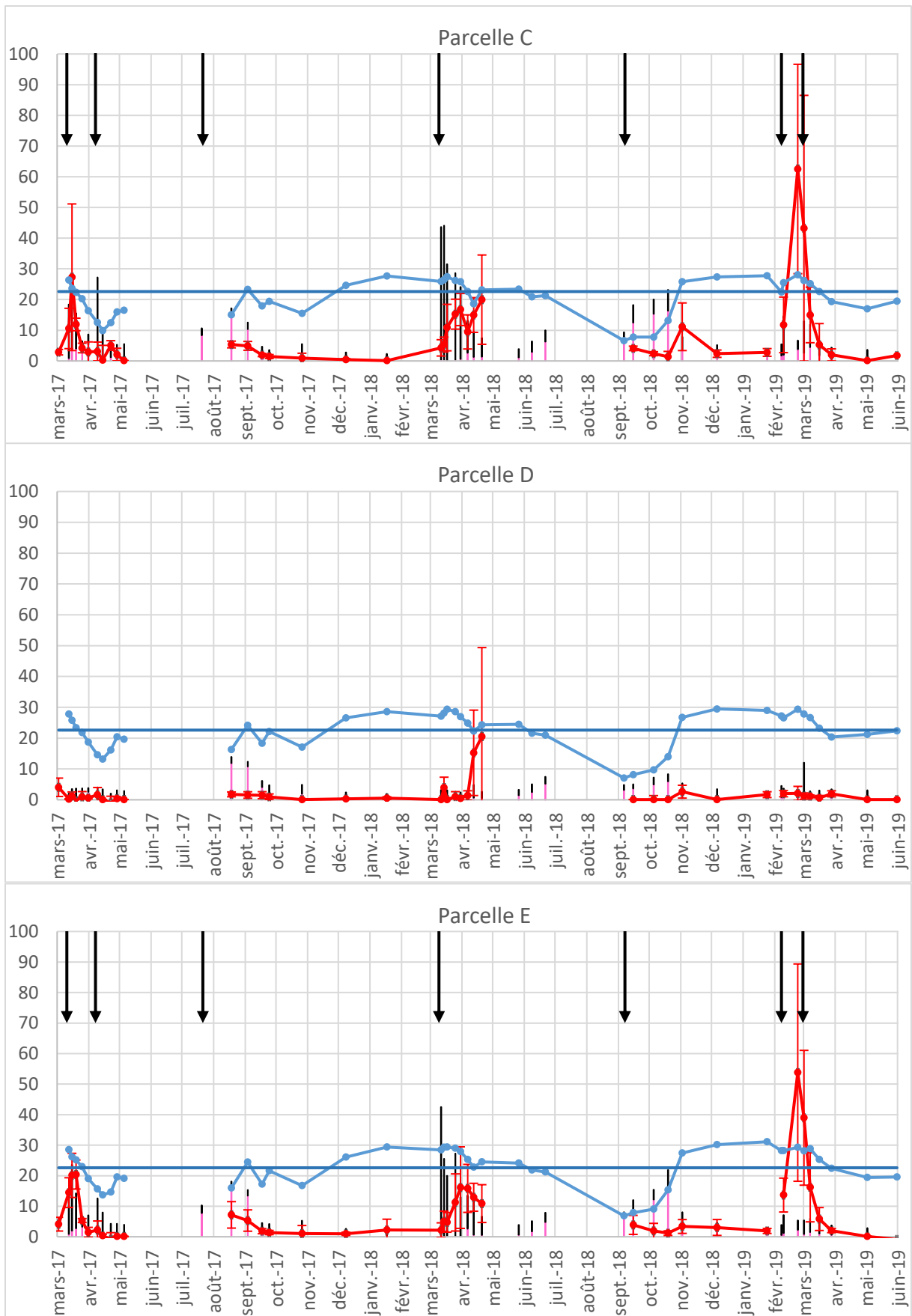


Figure 18 - flux mesurés de protoxyde d'azote dans chaque parcelle

D1.5.2 Analyse

La volatilisation d'ammoniac s'est montrée très variable selon les années et les conditions d'application. La volatilisation est fortement favorisée par des conditions venteuses, chaudes, et sèches. En hiver, il n'y a pas d'enfouissement. Les PRO sont plus sensibles aux émissions que les engrais minéraux (forme de l'azote). Les digestats sont plus sujets à la volatilisation que les lisiers, à cause de leur plus forte concentration en azote ammoniacale et leur pH plus élevé. La différence entre les digestats liquide et brut s'explique par une infiltration plus efficace du digestat liquide dans le sol.

En été, malgré un enfouissement en 24h et une faible teneur en azote minéral, les émissions restent élevées. Cela est principalement dû aux températures élevées. La séparation de phase permet de réduire légèrement les émissions d'ammoniac, par une meilleure utilisation des produits (épandage des fertilisants en hiver et des amendements en été). Le digestat s'infiltré mieux dans les sols et a donc un facteur d'émission plus faible que le digestat solide et le fumier. Ces derniers ont des facteurs d'émissions comparables.

L'utilisation des digestats doit donc faire l'objet de précautions sur la période et le matériel d'épandage pour ne pas être sujets à trop de volatilisation.

Les pertes en N_2O sur les 3 années sont variables entre les parcelles mais aussi entre les années, elles sont en moyenne inférieures à 1% des apports d'azote. Les pertes en $N.N_2O$ de la modalité « digestat solide ou liquide » sont toujours plus importantes que les pertes de la modalité « digestat brut ». La modalité qui présente la plus forte perte en azote (N_2O) est celle avec apport en azote minéral près de 1.5 % sur le colza lors des fertilisations hivernales de 2018.

Les pertes en azote suite à l'épandage du fumier l'été sont plus importantes que les pertes lors de l'épandage du lisier. En cumulant les 2 apports été et hiver la modalité A (fumier, lisier) présente les plus grosses pertes en azote sous forme de N_2O en proportion de l'azote apporté.

Les pics d'émission de N_2O les plus élevés sont observés sur la parcelle B (azote minéral), jusqu'à 80 g.N/ha/j en moyenne le 29 mars 2018. On observe également une plus grande variabilité des flux sur la parcelle B avec la présence de *hotspots* allant jusqu'à 106 g.N/ha/j.

Tous les pics quelle que soit la parcelle sont observés lorsque la teneur en eau de l'horizon de surface est supérieure ou égale à la teneur en eau à capacité au champ.

La part d'ammonium dans l'horizon de surface est plus importante que la part en nitrate à la suite des apports, par contre en été et à l'automne la tendance s'inverse et la part en nitrate est la plus importante (minéralisation).

Pour les parcelles A, C et E les émissions ont été plus importantes la dernière année, cultivée en blé d'hiver que les deux premières années.

D1.6 Bilan Azote à l'échelle de la rotation

Un bilan des flux d'azote minéral entrants et sortants à l'échelle d'une rotation de type Colza-Blé-Blé peut être approché par des techniques de modélisation. Le jeu de données acquis pendant les trois années du projet a servi à paramétrer et à calibrer le modèle de culture STICS, dans le cadre de la thèse de Victor Moinard, 2019-2021.

La modélisation permet ici d'estimer des flux d'azote difficile à mesurer :

- La minéralisation d'azote issu de la matière organique du sol
- La minéralisation ou l'immobilisation d'azote lors de la dégradation des PRO et des résidus de culture
- Une autre estimation de la lixiviation de nitrate
- La déposition d'azote atmosphérique
- La perte d'azote par dénitrification

Le bilan d'azote de la figure suivante montre le bilan d'azote minéral issu des données mesurées, auquel ont été ajouté les flux manquants modélisés.

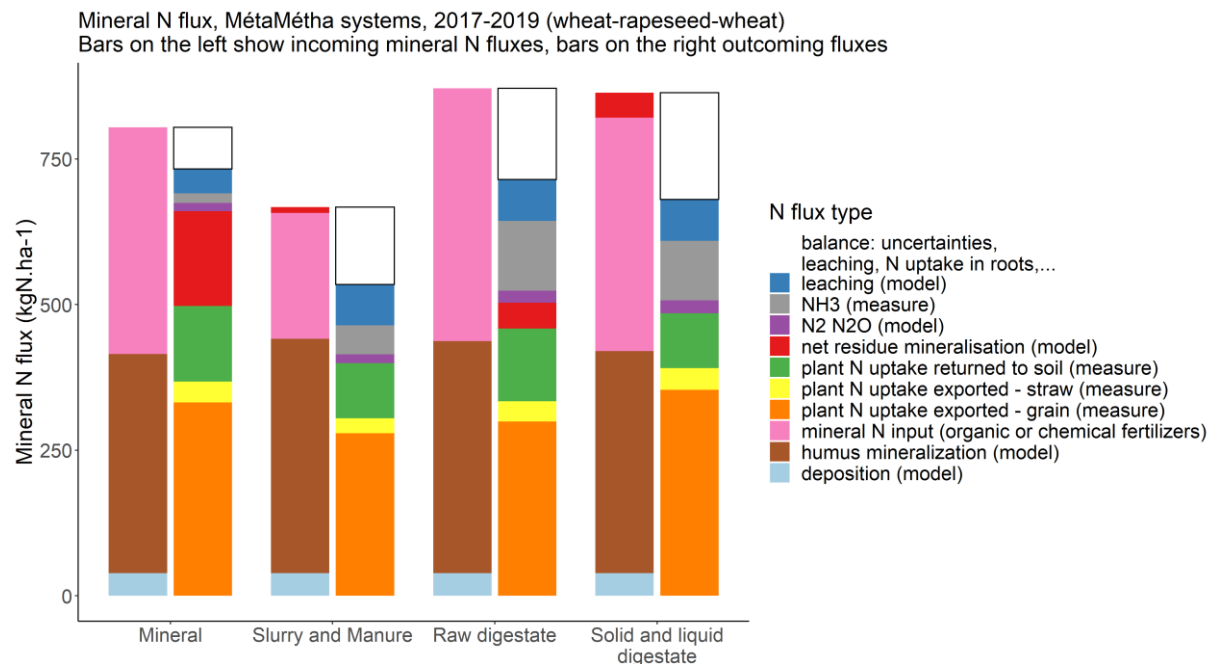


Figure 19 : bilan azoté sur 3 ans en N minéral

De manière générale, les principales sources d'azote minéral sont la minéralisation de la matière organique du sol, ainsi que les apports de fertilisants. Le principal efflux d'azote minéral est la consommation des cultures, mais le lessivage, la lixiviation, et l'immobilisation d'azote lors la dégradation des résidus de cultures (efflux en rouge sur la figure) ne sont pas non plus négligeables. On remarque que le bilan n'est pas bouclé à la fin de la rotation : on modélise plus d'influx que d'efflux. Cela est dû à des incertitudes des différents flux : présence d'un stockage d'azote minéral momentanée, surestimation de la minéralisation de la matière organique du sol, sous-estimation de la lixiviation, ou de la consommation d'azote par les plantes, sous-estimation de l'immobilisation par lors de la dégradation des résidus de cultures. Ces écarts ne sont pas anormaux, compte-tenu que les flux d'azote minéral sont difficiles à mesurer et modéliser.

Le système Lisier-Fumier a reçu moins d'azote minéral que le système de référence. Cela s'explique par la pauvreté relative du lisier en ammonium, en particulier lors des épandages de 2017. En raison de ces plus faibles apports d'azote, les rendements sont moins bons, et il y a moins de consommation d'azote par la plante.

Les systèmes avec digestats sont assez semblables entre eux. Ils sont caractérisés par des forts apports d'azote minéral, dû à la forte concentration en ammonium du digestat liquide et brut. Dans un système avec digestats, il est plus facile d'apporter de fortes doses d'azote ammoniacal qu'avec du lisier, ce qui peut permettre d'égaliser les rendements du système de référence sans avoir recours aux engrais chimiques. Les digestats sont bien des fertilisants avec un fort potentiel. Cela a aussi pour conséquence d'augmenter les risques de volatilisation et autres efflux d'azote.

L'apport d'azote organique dans le système qui va se minéraliser petit à petit se retrouve en regardant la minéralisation nette (en rouge sur la figure). Sur le système de référence, on voit un grand efflux d'azote minéral : c'est l'immobilisation de l'azote minéral du sol, qui est organisée lors de la dégradation des pailles. Sur les systèmes organiques, la dégradation des PRO tend à produire de l'azote plutôt que de l'immobiliser. Il y a donc moins de pertes par minéralisation au total, et on peut même avoir un apport net d'azote sur les systèmes Lisier-Fumier et Digestat avec séparation de phase. Ces conclusions restent spécifiques aux produits MétaMétha, différents digestats pouvant avoir des caractéristiques de minéralisation différentes. Néanmoins, cet apport d'azote organique, qui se libère doucement au cours du temps, est non négligeable, mais assez compliqué à maîtriser d'un point de vue agronomique.

La séparation de phase permet de mieux répartir les flux d'azote ammoniacal (dans le liquide), et d'azote organique (dans le solide surtout). Cela se traduit à l'échelle du système par des caractéristiques de minéralisation différentes, et une volatilisation plus faible avec une séparation de phase. Plus d'azote peut donc être consommé par la plante.

Cette approche permet d'avoir une vision d'ensemble sur tous les processus pour comparer les systèmes entre eux. L'utilisation du modèle STICS permettra à terme d'évaluer différents systèmes de gestion des digestats, pour évaluer les différentes pratiques utilisées par les agriculteurs méthaniseurs aujourd'hui.

D1.7 Synthèse

Les PRO liquides épandus en été avant céréales à paille sont à déconseiller à cause du risque de lixiviation. Les amendements par les PRO solides semblent peu efficaces pour fertiliser la culture de l'année. Il faut donc raisonner ces amendements à l'échelle de la rotation afin de trouver un compromis entre les besoins des plantes, l'entretien du sol et les besoins logistiques de l'exploitation. Le recours à un modèle de carbone du sol, AMG, permet de vérifier que la teneur en matière organique du sol est au moins maintenue par les apports organiques (cf. livrable L2.2 : Caractérisation des PRO).

Un bilan des flux d'azote entrants et sortants à l'échelle d'une rotation de type Colza-Blé-Blé a été modélisé : le jeu de données acquis pendant les trois années du projet a servi à paramétrer et à calibrer le modèle STICS (thèse de Victor Moinard - 2019 à 2021). La modélisation permettra ainsi de tester différents scénarios d'apports des digestats (dates et quantités) dans l'optique d'optimiser les pratiques et de réduire les pertes d'azote dans l'environnement (volatilisation NH_3 , lixiviation NO_3 et émissions de N_2O).

Une modélisation avec l'outil Syst'N[®] est également prévue pour quantifier les pertes d'azote sous forme nitrate, ammoniac et protoxyde d'azote à l'échelle pluriannuelle. La version 1.5 du logiciel intégrant les digestats issus de méthanisation est disponible depuis mars 2020.