

**JUNIA** ISA

ISA Lille  
48 boulevard Vauban  
59046 Lille cedex



Chambre régionale d'agriculture Grand Est  
Complexe agricole du Mont Bernard  
Route de Suippes  
51000 Châlons-en-Champagne

## Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur diplômé de l'institut  
supérieur d'agriculture – JUNIA

**Evaluation des performances azotées de systèmes de  
culture du Grand Est avec le logiciel de simulation Syst'N®**

Par

Honorine GABRIEL

Promotion ISA 54

4 septembre 2021

Année académique 2020-2021

Maître de stage : Maëva GUILLIER

Enseignant référent : Sitraka ANDRIANARISOA



## Résumé – Abstract

L'agriculture est responsable de la majorité des pertes d'azote par lixiviation des nitrates, et par volatilisation de l'ammoniac. C'est dans ce contexte que la CRAGE (Chambre régionale d'agriculture Grand Est) s'intéresse, dans le cadre du projet PARTAGE, à la réduction des pertes d'azote à l'échelle des SdC (Systèmes de Culture) du Grand Est. Les déterminants de ces pertes sont déjà connus ; l'enjeu est d'identifier, spécifiquement pour chaque SdC, les moments-clés (dits hotspots) de la rotation où elles interviennent afin de modifier les pratiques et combinaisons de pratiques les provoquant.

Pour ce faire, le logiciel de simulation Syst'N<sup>®</sup> est utilisé afin de favoriser la conception de SdC plus autonomes en azote en limitant les pertes. Les flux d'azote de deux SdC sont ici modélisés avec l'outil. La dynamique des pertes par lixiviation du SdC « champenois » montre que ses hotspots interviennent en début de rotation, avec la succession d'un colza associé à une légumineuse, d'un blé, d'un pois d'hiver et d'un blé. Chacune de ces cultures induit un fort REH (Reliquat Entrée Hiver) non capté par la culture suivante. La dynamique des pertes par lixiviation du SdC « lorrain » (conduit en AB (Agriculture Biologique)) montre que ses hotspots se produisent tout au long de la rotation du fait du sol laissé nu en interculture. La dynamique des pertes par volatilisation de ce même SdC montre la potentialité de l'AB pour la réduction de ces pertes, du fait de l'arrêt de l'usage des engrais minéraux.

De plus, à partir des flux d'azote quantifiés, des indicateurs auxquels les agriculteurs sont sensibles (pertes économiques, autonomie azotée) sont également construits afin d'appuyer un peu plus la volonté de reconception des SdC.

**Mots-clés :** Syst'N<sup>®</sup>, Pertes d'azote, Système de culture, Modélisation, Conception

Agriculture is responsible for the majority of nitrogen losses from nitrate leaching, and from ammonia volatilization. It is in this context that the Grand Est regional farming body, « la Chambre régionale d'agriculture Grand Est » is interested in reducing nitrogen losses on a cropping system scale in the Grand Est region, as part of the PARTAGE project. The drivers of these losses are already well identified; the challenge is to identify, for each cropping system specifically, the key moments (hotspots) of the crop rotation where these losses occur, in order to engage in practices and combinations of practices that limit them.

In this way, the Syst'N<sup>®</sup> simulation software is used to encourage the design of cropping systems which reduce nitrogen losses. Nitrogen flows of two cropping systems are modelled here with Syst'N<sup>®</sup>. The losses dynamic by leaching of the « champenois » cropping system, shows that the hotspots occur at the beginning of the crop sequence, with the succession of rapeseed-legume association – wheat – winter pea – wheat. Each of those crop releases an important quantity of nitrogen into the soil which is not absorbed by the following crop. The losses dynamic by leaching of the « lorrain » cropping system (organic farming) shows that the hotspots occur throughout the crop sequence due to the bare ground between two crop cycles. The losses dynamic by volatilization of this same cropping system shows the potentiality of organic farming to lower them, due to the non-use of synthetic fertilizers.

Moreover, from the nitrogen flows quantified, indicators to which farmers are sensitive (economic losses, nitrogen autonomy) are also constructed, in order to back up the willingness of redesigning cropping systems.

**Keywords :** Syst'N<sup>®</sup>, Nitrogen losses, Cropping system, Modelling, Designing

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma maîtresse de stage, Maëva GUILLIER – Chargée de missions « Autonomie azotée et protéique des systèmes et des territoires » –, pour m'avoir accueillie dans l'équipe Innovation-Recherche & Développement – au sein de la Chambre régionale d'agriculture Grand Est, et pour m'avoir accompagnée, aiguillée et aidée tout au long de mon stage.

Je tiens également à remercier Anne SCHAUB – Chargée de projets sur la multiperformance des systèmes –, et membre de l'équipe, pour avoir également suivi de près les travaux menés dans le cadre de mon stage et m'avoir apportée son aide lorsque j'en avais besoin.

Je remercie également l'ensemble des conseiller(ère)s des chambres d'agriculture départementales et coopératives agricoles impliqués dans le PEI PARTAGE, qui par leur collaboration, m'ont permis de mener à bien ma mission.

Ensuite, je remercie Aurore BECHTEL – Chargée de communication au sein de l'équipe –, pour la mise en forme des livrables créés à l'issue de mon stage.

Merci à Thiébaud SIMON, Marie DELAUNE, Sophie MAILLANT, Joëlle SAUTER, Sophie POUZENC – Chargés de mission et d'études au sein de l'équipe –, pour avoir répondu à mes différentes sollicitations et questions sur les thématiques du pilotage de la fertilisation azotée et du sol.

Merci également à Virginie PARNAUDEAU, Raymond REAU – Ingénieurs de recherche à l'INRAE et chefs de projet pour la conception de l'outil Syst'N® –, et Sylvain Duthoit – Conseiller en agronomie à la Chambre d'agriculture de la Marne – pour avoir répondu à mes questions concernant le fonctionnement de l'outil.

Je remercie aussi Sitraka ANDRIANARISOA pour son accompagnement tout au long de mon stage.

Enfin, je remercie Yann DACQUAY – Directeur général de la Chambre régionale d'agriculture Grand Est –, et François-Xavier SCHOTT – Chef d'équipe du service IRD –, de me donner l'opportunité de poursuivre mes missions en CDD en tant que chargée d'études sur l'autonomie azotée et protéique.

# Sommaire

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>Cadre de l'étude.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Structure d'accueil .....</b>	<b>3</b>
1.1. Le réseau Chambres d'agriculture.....	3
1.2. Le service IRD au sein de la CRAGE .....	3
<b>2. Stratégie du service IRD.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Le PEI PARTAGE.....</b>	<b>5</b>
<b>Contexte, problématique et état de l'art .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Le contexte agricole en Grand Est .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Le cycle de l'azote .....</b>	<b>7</b>
<b>3. La fertilisation azotée en grandes cultures .....</b>	<b>8</b>
3.1. Les engrais azotés.....	8
3.2. Ses conséquences environnementales .....	9
<b>3. Cadre réglementaire.....</b>	<b>10</b>
3.1. Qualité de l'air .....	10
3.2. Qualité de l'eau .....	10
3.3. Green Deal et cibles quantitatives à l'horizon 2030.....	11
<b>4. Maîtriser les pertes d'azote à l'échelle du SdC.....</b>	<b>11</b>
4.1. Lixiviation du $\text{NO}_3^-$ .....	11
4.1.1. Description .....	11
4.1.2. Les déterminants de la lixiviation .....	11
4.1.2.1. Actions du sol et du climat .....	11
4.1.2.2. Actions des pratiques culturales .....	11
4.1.3. Leviers pour diminuer les pertes par lixiviation .....	12
4.2. Volatilisation de l' $\text{NH}_3$ .....	13
4.2.1. Description .....	13
4.2.2. Les déterminants de la volatilisation .....	14
4.2.2.1. Actions du sol et du climat .....	14
4.2.2.2. Actions des pratiques culturales .....	14
4.2.3. Leviers pour diminuer les pertes par volatilisation .....	15
4.3. Dénitrification du $\text{N}_2\text{O}$ .....	16
<b>5. Enjeu de la réduction des pertes en termes d'autonomie azotée .....</b>	<b>16</b>
<b>6. Nécessité de développer l'outil Syst'N® .....</b>	<b>17</b>
<b>7. Objectifs de la mission et problématique .....</b>	<b>17</b>
<b>Matériel et méthodes .....</b>	<b>19</b>
<b>1. Présentation des SdC étudiés.....</b>	<b>19</b>
1.1. D'un système lorrain conventionnel à un système biologique avec méthanisation .....	19

1.1.1.	Contexte pédoclimatique.....	19
1.1.2.	Présentation du SdC.....	20
2.1.	Système diversifié avec associations culturales en Champagne.....	21
2.1.1.	Contexte pédoclimatique.....	21
2.1.2.	Présentation du SdC.....	22
<b>2.</b>	<b>Evaluation des pertes d'azote avec Syst'N®.....</b>	<b>23</b>
2.1.	Description du logiciel.....	23
2.1.1.	Fonctionnement global.....	23
2.1.2.	Les données d'entrée.....	23
2.1.3.	Les sorties.....	25
2.1.4.	Raisons du choix de l'outil.....	25
2.2.	Démarche d'évaluation.....	25
2.2.1.	Démarche globale.....	26
2.2.2.	Récolte des données.....	27
2.2.3.	Définition des seuils de pertes.....	27
2.2.3.1.	Pour l'évaluation de la performance environnementale.....	27
2.2.3.2.	Pour l'évaluation de la performance économique.....	29
2.2.4.	Evaluation et interprétation des résultats.....	29
	<b>Présentation et analyse des résultats.....</b>	<b>31</b>
<b>1.</b>	<b>SdC lorrain.....</b>	<b>31</b>
1.1.	Quantification des flux d'azote : comparaison avant-après reconception.....	31
1.2.	Identification des « hotspots » d'émission de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> après reconception.....	33
1.3.	Synthèse pluriannuelle à l'échelle de la rotation après reconception.....	35
1.4.	Identification des pistes pour réussir à avoir de faibles pertes.....	36
<b>2.</b>	<b>Le SdC champenois.....</b>	<b>36</b>
2.1.	Quantification des flux d'azote : comparaison avant-après reconception.....	36
2.2.	Identification des « hotspots » d'émission après reconception.....	39
2.2.1.	Emissions de NH <sub>3</sub> .....	39
2.2.2.	Emissions de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	39
2.3.	Synthèse pluriannuelle à l'échelle de la rotation après reconception.....	41
2.4.	Identification des pistes pour réussir à avoir de faibles pertes.....	42
<b>3.</b>	<b>Communication des résultats.....</b>	<b>42</b>
	<b>Discussion et perspectives.....</b>	<b>44</b>
<b>1.</b>	<b>Points forts des résultats.....</b>	<b>44</b>
<b>2.</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>45</b>
2.1.	Limites du logiciel Syst'N®.....	45
2.2.	Limites de la méthode d'évaluation des pertes.....	45
2.2.1.	Utilisation d'une méthode d'évaluation existante.....	45
2.2.2.	Données d'entrée pédoclimatiques utilisées.....	46
2.2.3.	Evaluation de la performance environnementale.....	47
2.2.4.	Prédiction du modèle.....	47
<b>3.</b>	<b>Eléments de réflexion.....</b>	<b>47</b>
3.1.	Optimisation de la fertilisation azotée à l'échelle de la culture.....	47

3.2.	Optimisation de la fertilisation azotée à l'échelle du territoire et couplage polyculture-élevage..	48
<b>4.</b>	<b>Perspectives</b> .....	<b>48</b>
4.1.	Suite de l'étude .....	48
4.2.	Pertes d'azote et bilan carbone .....	49
<b>5.</b>	<b>De la simulation à l'évaluation au champ des performances azotées</b> .....	<b>49</b>
	<b>Conclusion</b> .....	<b>50</b>
	<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>51</b>
	<b>Liste des annexes</b> .....	<b>53</b>
	<b>Annexes</b> .....	<b>54</b>
	<b>Table des figures</b> .....	<b>63</b>
	<b>Table des tableaux</b> .....	<b>64</b>
	<b>Liste des sigles et abréviations</b> .....	<b>65</b>

## Introduction

L'augmentation de la population mondiale, la montée en puissance des préoccupations environnementales et la raréfaction des ressources naturelles placent l'agriculture face à un double défi : maintenir voire accroître la productivité afin de satisfaire la demande croissante en alimentation, tout en limitant les impacts sur l'environnement et en gérant durablement les ressources indispensables à la production agricole (Pellerin et al., 2014).

L'azote est un nutriment essentiel à la croissance des végétaux et les engrais azotés sont donc un levier puissant de contrôle des niveaux de production et de qualité (Pellerin et al., 2014). Cependant, la fabrication et l'utilisation de ces engrais engendrent la pollution de l'air et des eaux et contribuent au changement climatique. En effet, l'agriculture est responsable, en France, de 94% des émissions d' $\text{NH}_3$  (ammoniac) dans l'air. Celles-ci contribuent à la formation de particules fines en réagissant avec des composés acides tels que les oxydes d'azote (polluants de l'air émis par d'autres sources d'activité), et à l'acidification et l'eutrophisation des milieux (Ademe, 2018). L'agriculture est aussi le secteur responsable de plus de trois quarts des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  (protoxyde d'azote), principal GES (gaz à effet de serre) de la production agricole, qui a un pouvoir de réchauffement global sur 100 ans environ 300 fois supérieur à celui du  $\text{CO}_2$  (dioxyde de carbone). Il participe donc grandement au réchauffement climatique de la planète (Viard et al., 2013). De plus, les émissions d'azote vers les eaux sous forme de  $\text{NO}_3^-$  (nitrates) proviennent essentiellement de l'agriculture. A concentrations excessives, les  $\text{NO}_3^-$  rendent l'eau impropre à la consommation et induisent des problèmes d'eutrophisation (Ministère de l'agriculture, 2014). Enfin, du fait de ces émissions, l'utilisation déraisonnée des engrais azotés induit des pertes économiques sur les exploitations agricoles (Guillier et al., 2020).

Selon les chiffres du CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique) en 2015, le bilan azoté est excédentaire sur la région Grand Est de 40 à 178 kg/ha selon les territoires. C'est autant d'azote que l'on peut espérer gagner par une meilleure optimisation. Il existe ainsi un réel levier pour réduire les émissions vers l'environnement.

De plus, cette problématique et les enjeux associés ne sont pas bien identifiés par les agriculteurs. Par exemple, l'enquête menée dans le cadre du projet PROSP'AIR en 2017, souligne que les agriculteurs se sentent mal informés sur le volet « impact des pratiques sur la qualité de l'air ».

C'est dans ce contexte de manque de connaissances que le projet PARTAGE (Programme Agronomique Régional pour la Transition Agroécologique en Grand-Est) a vu le jour en 2019. Ce projet est porté par 18 partenaires et s'inscrit dans le cadre d'un PEI (Partenariat Européen pour l'Innovation). Un des 3 axes de travail est piloté par la CRAGE et porte sur la réduction des pertes d'azote sur les exploitations. Plus précisément, les objectifs sont d'identifier les facteurs de risque selon les SdC et les pratiques associées et de tester et évaluer des solutions innovantes permettant de maîtriser les pertes et apporter l'azote au bon moment pour la plante. Cela a pour finalité le partage de connaissances sur les combinaisons de pratiques culturales et leviers innovants efficaces et mobilisables pour permettre de réduire les pertes d'azote au champ tout en améliorant l'autonomie azotée.



Afin d'atteindre ces objectifs, il est nécessaire d'effectuer des diagnostics à l'échelle du SdC. En effet, la dynamique de l'azote est très dépendante des interactions entre les cultures successives (effet précédent et effet suivant) (Parnaudeau et al., 2012), et aussi des techniques de travail du sol et fertilisation.

Ainsi, au cours du travail présenté dans ce rapport, il s'agit d'étudier en quoi la modélisation des flux d'azote dans le système sol-plante-eau-atmosphère avec Syst'N® favorise la conception de SdC plus autonomes en azote en limitant les pertes.

Dans un premier temps, la structure d'accueil (la CRAGE), la stratégie du service IRD (Innovation, Recherche, Développement), et le PEI PARTAGE sont présentés. Ensuite, le contexte agricole du Grand Est est exposé, puis l'état des connaissances sur la maîtrise des pertes d'azote à l'échelle des systèmes de culture est effectué. L'outil utilisé pour cette étude, Syst'N®, est introduit, et les objectifs de la mission et la problématique sont exprimés. Dans un second temps, les deux SdC étudiés dans ce rapport sont présentés et la démarche d'évaluation des pertes avec Syst'N® est expliquée. Les résultats des simulations, avec la quantification des flux d'azote et représentation dynamique des pertes à l'échelle de la rotation sont ensuite présentés et analysés. Pour finir, ces derniers sont discutés et des éléments de réflexion et perspectives de travail sont proposés.

## Cadre de l'étude

### 1. Structure d'accueil

#### 1.1. Le réseau Chambres d'agriculture

Les CA (Chambres d'Agriculture), créées en 1924, sont des établissements publics qui représentent le monde rural et forestier dans chaque département. Ces organismes de développement agricole sont présidés et administrés par des élus représentant l'activité agricole, qui sont élus au suffrage universel tous les 6 ans. Elles ont une double mission (i) de consultation en étant le porte-parole des intérêts du monde agricole et rural auprès de l'Etat et des collectivités territoriales, et (ii) d'intervention sur différents domaines (Figure 1) auprès des agriculteurs et entreprises agroalimentaires, tout en exerçant des missions d'expertise, de conseil, de formation et de R&D (Recherche et Développement).

#### Les grands domaines d'intervention (en ETP)

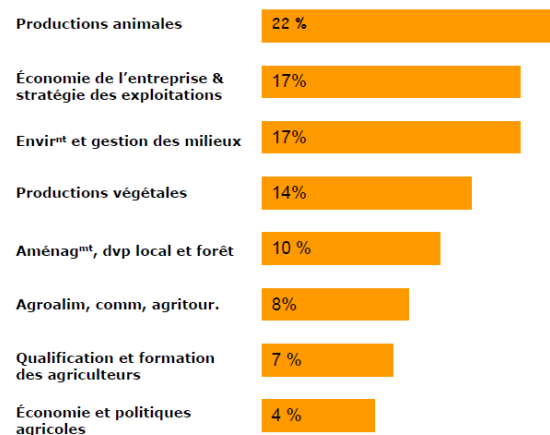


Figure 1 Domaines d'intervention des CA, source Resolia Chambres d'agriculture

L'APCA (Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture) est à la tête du réseau et assure la représentation nationale des CA. Elle a aussi pour missions (i) de contribuer à la définition des orientations et des conditions de mise en œuvre des politiques agricoles rurales et environnementales et (ii) de coordonner la recherche et l'expérimentation dans le réseau.

Les 89 CDA (Chambres Départementales ou interdépartementales d'Agriculture) constituent l'échelon de proximité et proposent une offre de services formalisée auprès des clients des CA. Elles jouent un rôle essentiel d'information et d'accompagnement des agriculteurs.

Les 13 CRA (Chambres Régionales d'Agriculture) assurent quant à elles un ensemble de fonctions support et constituent un centre de ressources et de stratégie dans les domaines techniques, innovation R&D et de politiques publiques. Elles coordonnent les actions communes menées par les CDA, notamment dans le cadre des PRDAR (Programme Régional de Développement Agricole et Rural).

#### 1.2. Le service IRD au sein de la CRAGE

Placé sous la direction générale de la CRAGE, le service IRD, en lien avec le service AEPV (Agronomie, Environnement, Productions Végétales) et l'équipe communication, a pour missions (i) de produire des références opérationnelles en partenariat avec les organismes régionaux de R&D et (ii) de les diffuser aux conseillers des CDA et aux agriculteurs tout en les impliquant dans la réalisation. Cela passe par la coordination, l'animation et la valorisation des programmes de développement, de recherche et d'innovation sur les thématiques « sol et fertilité », « énergie et qualité de l'air », « numérique »,

« qualité de l'eau, lutte contre l'érosion », « adaptation au changement climatique », « systèmes et approche globale » (Figure 2).

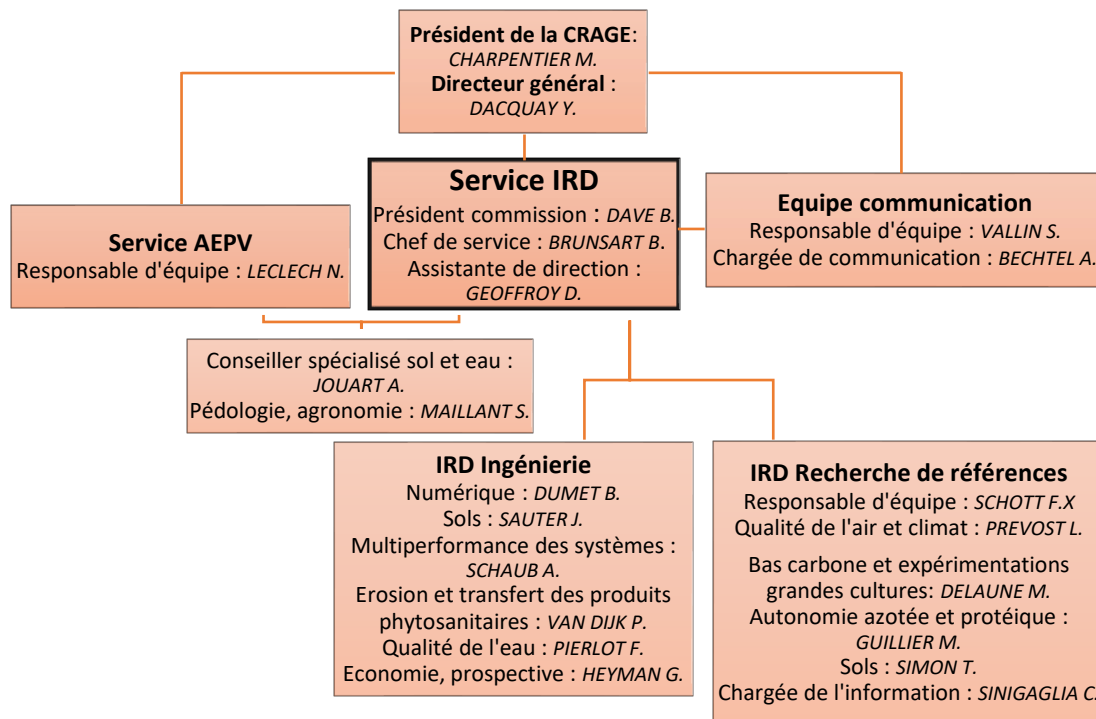


Figure 2 Organigramme du service IRD

## 2. Stratégie du service IRD

Conformément au décret du 13 mai 2016 relatif à l'organisation et aux missions du réseau des CA, la CRAGE s'est engagée dans la construction et la mise en œuvre d'une feuille de route de l'IRD en Grand Est avec l'ensemble des acteurs de la recherche, du développement et de l'innovation.

Dans ce contexte, la première édition des Assises de la RDI (Recherche, Développement, Innovation) du Grand Est s'est déroulée le 22 mars 2018. Elles ont réuni l'ensemble des acteurs impliqués dans la R&D agricole, afin d'établir une feuille de route des thématiques prioritaires de la RDI agricole régionale pour les années à venir, et de cartographier l'ensemble des acteurs et des compétences mobilisables en Grand Est.

Cela a donné lieu à la structuration de cinq axes stratégiques prioritaires de l'agriculture en Grand Est. Parmi ces cinq axes, l'axe : « Autonomie azotée et protéique des exploitations et des territoires » est ressorti, traduisant l'importance et la nécessité de priorité d'actions sur cette thématique pour l'ensemble des acteurs agricoles de la région. L'ensemble des participants a pu prioriser les objectifs opérationnels au sein de cet axe et ainsi participer à l'élaboration de la stratégie à déployer pour la RDI agricole dans les années à venir.

C'est ainsi que le service IRD s'est engagé dans le montage du PEI PARTAGE, qui regroupe l'ensemble des CDA du Grand Est, trois coopératives agricoles (Cérèsia, Vivescia et EMC2), l'INRAE, Terres Inovia, l'ALPA (Association Lorraine pour la Promotion en Agriculture), Coop de France Grand Est et Terrasolis.

### 3. Le PEI PARTAGE

Le PEI PARTAGE (2019-2022) ambitionne de développer et transférer des innovations techniques (connaissances, outils stratégiques) apportant des solutions aux agriculteurs, ainsi que des innovations organisationnelles. La Figure 3 Présente schématiquement l'articulation du projet.

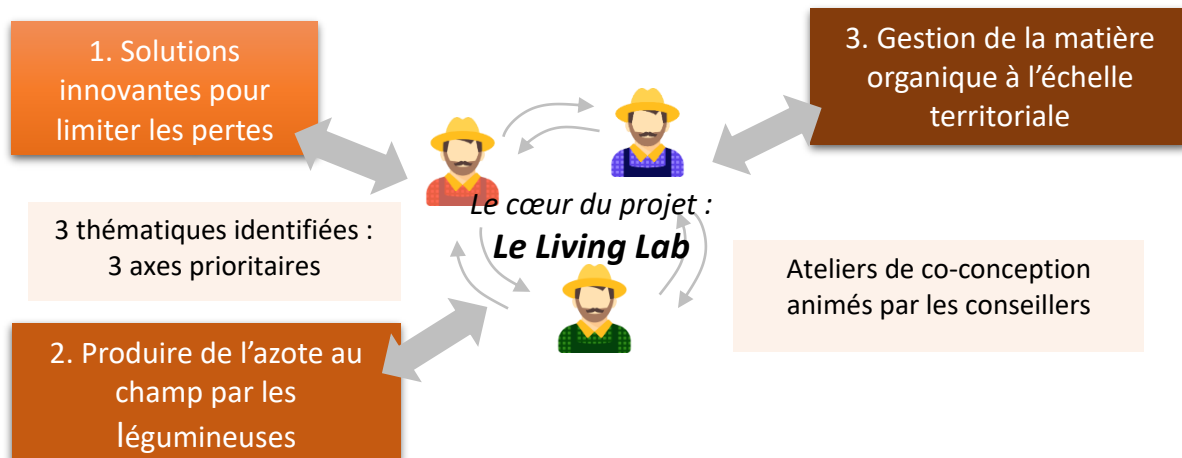


Figure 3 Articulation du PEI PARTAGE, source CRAGE

Les partenaires du projet ont défini trois axes de travail prioritaires :

- réduire les pertes d'azote sur les exploitations grâce à une réflexion à l'échelle du SdC : enchaînement cultural, nouveaux matériels d'épandage, formes d'azote moins volatiles etc. ;
- produire de l'azote au champ grâce à la fixation symbiotique (légumineuses en cultures dédiées ou associées, couverts d'interculture, etc.) ;
- valoriser les différentes sources d'azote organique utilisables sur le territoire : digestats de méthanisation, effluents d'élevage, etc.

Pour ce faire, le PEI s'appuie sur un « Living Lab » constitué de 49 exploitations agricoles qui testent en conditions réelles des solutions innovantes et des SdC plus autonomes et à faibles pertes d'azote. Elles sont réparties essentiellement sur la Lorraine et la Champagne-Ardenne (Figure 4), en neuf groupes qui sont animés par les coopératives agricoles et CDA.

Dans un premier temps, des diagnostics individuels d'exploitation ont été établis par les conseillers afin de connaître les objectifs et priorités de chaque exploitant. Ceci a servi de base, pour certains des conseillers, à l'animation au sein de leur groupe d'agriculteurs, d'ateliers de co-conception de SdC alternatifs plus autonomes, selon la méthode développée par Reau et al., (2012). Nous entrons maintenant dans la phase de test des SdC reconçus.

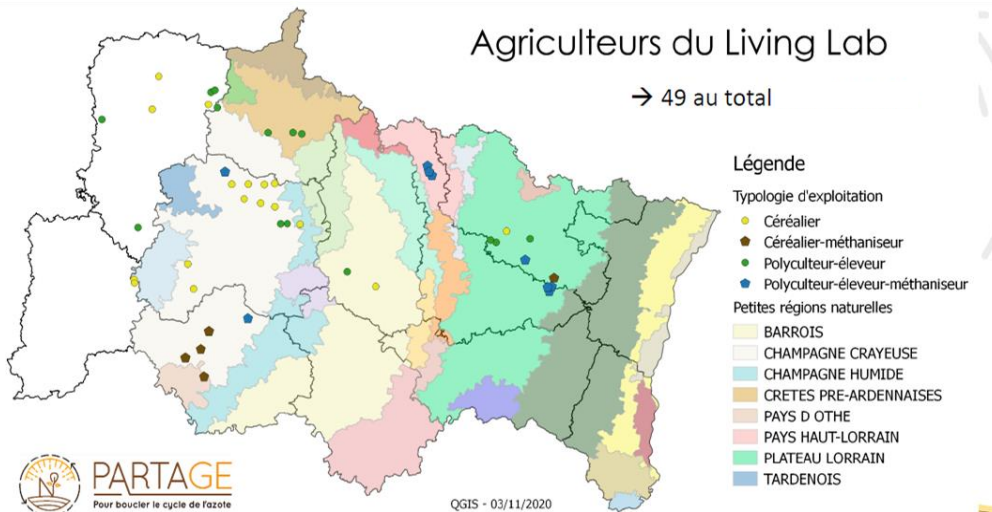
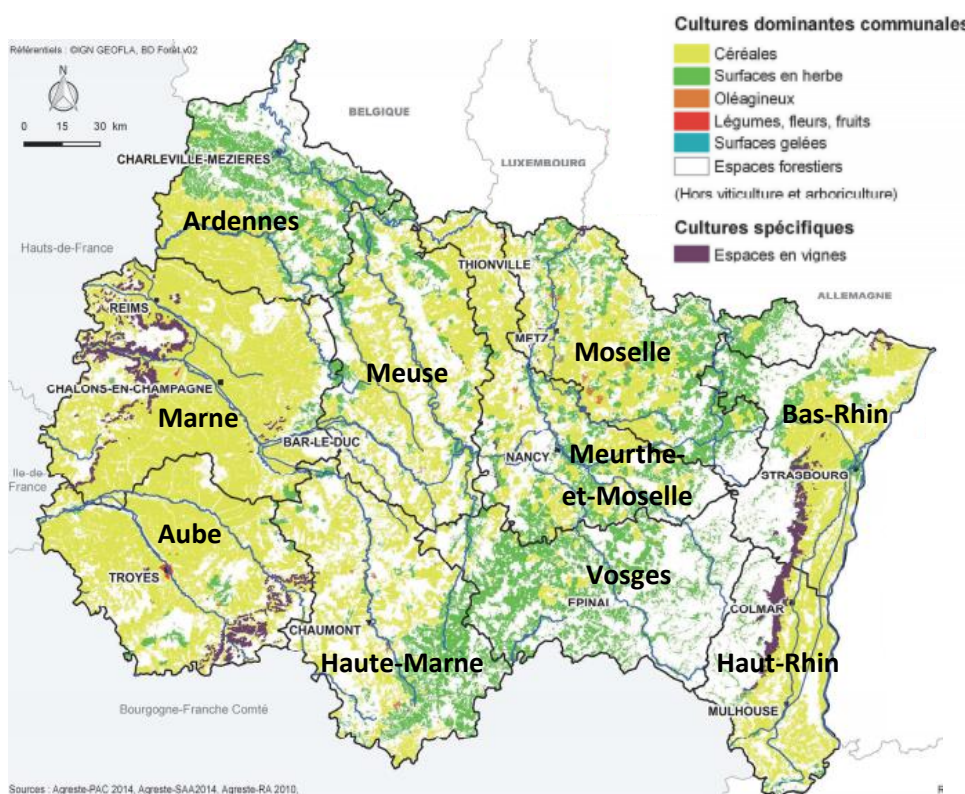


Figure 4 Répartition des exploitations agricoles du Living Lab PARTAGE, source CRAGE

## Contexte, problématique et état de l'art

### 1. Le contexte agricole en Grand Est

La SAU (Surface Agricole Utile) du Grand Est représente 53% du territoire et 10,7% de la SAU de la France entière (DRAAF Grand Est, 2020). Elle est la première région française pour la production de COP (Céréales et Oléo-Protéagineux), qui occupent un peu plus de la moitié sa superficie (58%) avec une présence très marquée sur les départements de la Marne, l'Aube, du Haut-Rhin et du Bas-Rhin. En effet, ils occupent 61% de la SAU de la Champagne-Ardenne et 55% de la SAU de l'Alsace. Les autres départements étant de typologie polyculture-élevage, leur surface est partagée entre céréales et prairies permanentes, et ces dernières occupent 25% de la surface de la région (Figure 5).



**Alsace** : Bas-Rhin, Haut-Rhin

**Champagne-Ardenne** : Ardennes, Aube, Haute-Marne, Marne

**Lorraine** : Meuse, Meurthe-et-Moselle, Moselle, Vosges

Figure 5 Répartition des cultures dominantes en Grand Est, source recensement Agreste PAC 2014

L'étude des pertes d'azote concerne d'autant plus les régions agricoles pour lesquelles les terres agricoles représentent plus de 50% de la surface, les enjeux y étant importants du fait des flux de nutriments élevés (Strayer et al., 2003).

### 2. Le cycle de l'azote

La Figure 6 schématise le cycle de l'azote. Les flèches vertes représentent les entrées d'azote. D'une part, l'azote atmosphérique  $N_2$  est (i) utilisé pour la fabrication des fertilisants minéraux et (ii) fixé par



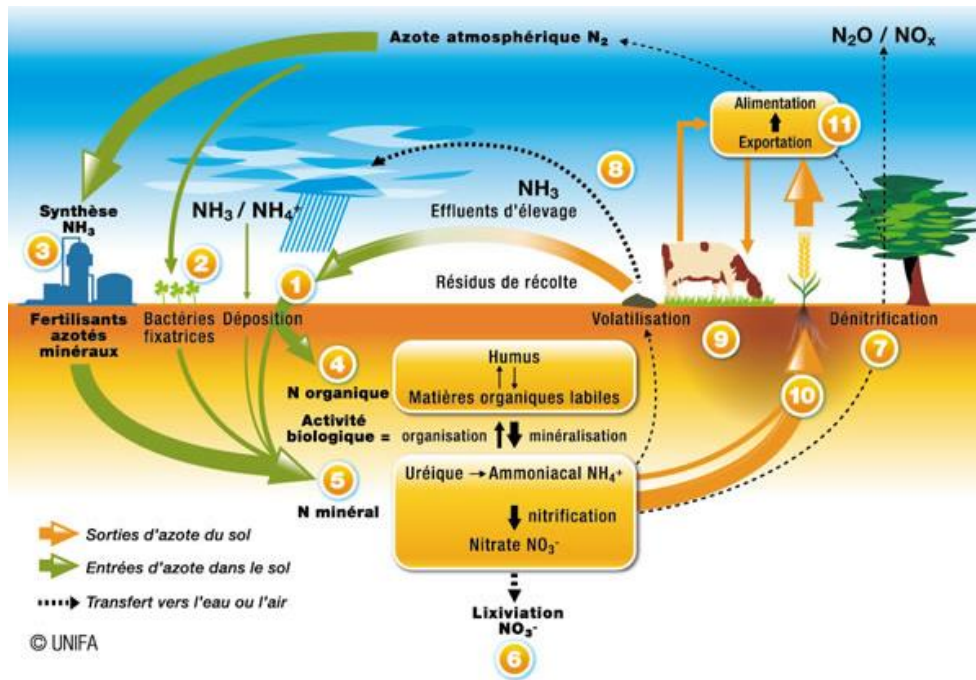


Figure 6 Cycle de l'azote, source UNIFA

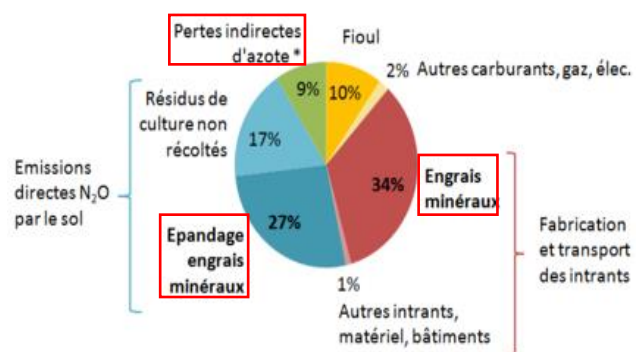
les légumineuses grâce aux bactéries fixatrices d'azote (*Rhizobium*) qui s'associent avec leurs racines et qui le transforment en  $NH_4^+$  (ammonium). D'autre part, les MO (Matière Organique) – PRO (Produits Résiduaire Organiques) agricoles et non-agricoles – sont minéralisées en  $NH_4^+$ . Cet élément est ensuite transformé par les bactéries nitrifiantes en  $NO_3^-$  et assimilé par les plantes, qui absorbent aussi en plus petite quantité de l' $NH_4^+$ , et des protéines et acides aminés. Les flèches orange représentent les sorties d'azote. L'azote est exporté par les récoltes et résidus de récolte. Les résidus non exportés sont restitués au sol et minéralisés. Les flèches pointillées noires représentent les transferts vers l'eau et l'air, qui constituent pour la plupart des pertes dans le milieu. D'une part, une partie de l' $NH_4^+$  se volatilise sous forme d' $NH_3$  au moment de l'épandage des engrais organiques et minéraux. D'autre part, une partie du  $NO_3^-$  est lixiviée en profondeur par l'eau du sol. Cela se produit principalement lors des périodes hivernales lorsque l'excès d'eau fait migrer le  $NO_3^-$  hors de portée des racines. Enfin, lorsque les micro-organismes manquent d'oxygène (stagnation de l'eau et compactage du sol), les bactéries du sol transforment le  $NO_3^-$  en  $N_2O$  et oxydes d'azote qui rejoignent l'atmosphère : c'est le processus de dénitrification.

### 3. La fertilisation azotée en grandes cultures

#### 3.1. Les engrais azotés

Les engrais minéraux azotés sont fabriqués à partir de l' $NH_3$ , obtenu par la combinaison de l'azote de l'air (principal constituant de notre atmosphère) et de l'hydrogène provenant du gaz naturel.

#### Postes d'émissions de GES des exploitations de type Céréales et Oléoprotéagineux (COP)



\*  $N_2O$  issu de la déposition du  $NH_3$  et de l'azote ruisselé et lessivé

Figure 7 Postes d'émissions de GES des exploitations de type Céréales et Oléoprotéagineux, source CRAGE

Celui-ci fournit à la fois l'hydrogène et l'énergie nécessaires pour réaliser la synthèse de l' $\text{NH}_3$ . La fabrication et le transport de ces intrants contribuent à 34% des émissions de GES des exploitations de type COP (Figure 7). Les engrais organiques ont, quant à eux, un coût environnemental en amont plus faible que les engrais de synthèse (Pellerin et al., 2014).

Le prix des engrais de synthèse suit en partie les fluctuations de prix du gaz naturel, qui peuvent être brutales et difficiles à prévoir. Pour preuve, la fluctuation observée ces dernières années a eu un impact de 10 à 20€/t sur le coût de production, appuyant la nécessité de limiter le gaspillage de ces intrants. Aussi, les flux d'exportation peuvent très rapidement se réorienter vers les pays les plus demandeurs (e.g. USA) et donc léser l'Europe, marché moins attractif du fait de sa maturité et sa dispersion. De plus, la dépendance vis-à-vis de l'importation de pays tiers peut mettre en danger la sécurité d'approvisionnement (Pellerin et al., 2014). Enfin, 79% des agriculteurs enquêtés par l'UNIFA (Union de Industries et de la Fertilisation) en 2006 déclarent considérer le prix lors du choix d'une forme d'engrais, avec 36% citant ce critère en premier. Généralement, le kilogramme d'azote à l'hectare sous la forme ammonitrate est plus cher de 10 centimes par rapport à l'urée granulée et de 20 centimes par rapport à la solution azotée (Cohan & Le Souder, 2013).

### 3.2. Ses conséquences environnementales

Les apports d'engrais azotés contribuent à la pollution de l'air, des eaux, ainsi qu'au changement climatique.

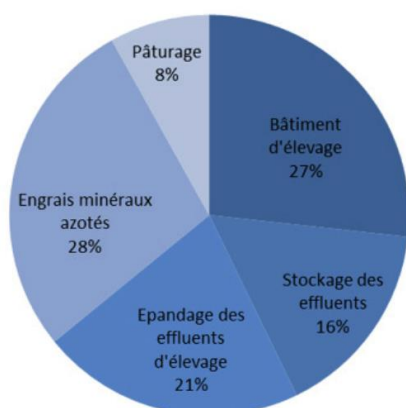


Figure 8 Répartition des émissions d'ammoniac de l'agriculture en France, source ADEME outil ClimAgri®

Celles-ci, en réagissant avec les oxydes d'azote, se transforment en nitrate d'ammonium. En grande quantité, ces particules s'accumulent et provoquent

des pics de pollutions aux particules fines (Figure 9). Ensuite, les activités agricoles génèrent en moyenne 36 kg de surplus<sup>1</sup> d'azote par hectare et par an, ce qui représente le quart de la fertilisation azotée moyenne (Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est, n.d.). Ainsi, cette situation de fort

Tout d'abord, 28% des émissions d' $\text{NH}_3$  en agriculture sont générées par la fertilisation minérale et 21% par l'épandage des effluents d'élevage. Au total, les productions végétales sont donc responsables de 49% de ces émissions (Figure 8).

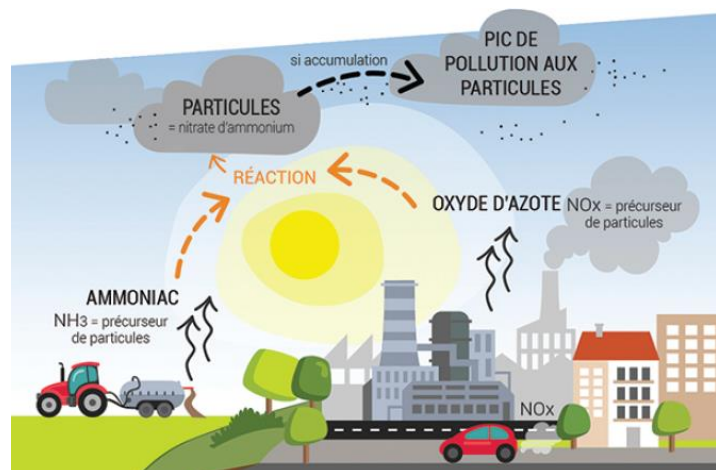


Figure 9 Schéma de la formation des particules fines, source CRAGE

<sup>1</sup> Le surplus correspond à la quantité maximale d'élément excédentaire sur une surface agricole donnée qui risque d'être transférée vers le milieu aquatique.



excédent d'azote minéral induit un risque non négligeable de lixiviation des  $\text{NO}_3^-$  vers les eaux, qui en trop grande quantité, les contaminent.

Enfin, la fertilisation azotée représente la première cause d'émission de GES et de consommation d'énergie au niveau d'un SdC en raison des émissions liées à la fabrication et au transport des engrais, qui nécessitent de l'énergie en plus des émissions directes et indirectes (i.e.  $\text{N}_2\text{O}$  émis par le processus de dénitrification du  $\text{NO}_3^-$ ) liées à leur utilisation. Le poste « engrais » représente ainsi environ 70% des émissions de GES des exploitations de type COP (Figure 7), ce qui souligne l'importance d'une bonne gestion des apports d'engrais azotés pour minimiser les émissions de GES de l'agriculture (Arrouays et al., 2002) et limiter ainsi son impact carbone. De plus, l'étude Clim'Agri réalisée en 2018 et portée par la région Grand Est a permis d'établir un bilan des consommations d'énergie et des émissions de GES pour l'agriculture de la région. Cette étude a montré que la fertilisation azotée est le premier poste de consommation d'énergie avec environ 40% de l'énergie totale consommée contre 30% à l'échelle nationale.

Ainsi, une meilleure gestion des pratiques de fertilisation à l'échelle des SdC, dont la surface occupe une part importante de la région, est donc indispensable.

### 3. Cadre réglementaire

Les enjeux globaux avec lesquels l'usage des fertilisants interfère (préservation de l'environnement et de la santé publique) font l'objet de négociations internationales et donnent lieu à des engagements des Etats (e.g. réduction des émissions de GES). Cela se traduit ensuite par la mise en place de politiques publiques et de cadres réglementaires dont on peut s'attendre à ce qu'ils affectent fortement le domaine de la fertilisation (Pellerin et al., 2014), renforçant la nécessité d'accompagner ce domaine technique en prenant en considération ce nouveau contexte de plus en plus contraignant.

#### 3.1. Qualité de l'air

Au niveau européen, la directive NEC<sup>2</sup> (National Emissions Ceilings) (2016/2284/EU) a été révisée en décembre 2016 par la Commission Européenne, fixant pour la France de nouveaux seuils plus ambitieux de plafonds nationaux d'émissions à ne pas dépasser. Pour l'ammoniac, l'objectif est fixé à -13% de réduction pour 2030 (par rapport à 2005) (Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est et al., 2021).

#### 3.2. Qualité de l'eau

La directive européenne 91/676/CEE du 12/12/1991 dite « Directive Nitrates » a pour objectif de réduire la pollution des eaux par les  $\text{NO}_3^-$  d'origine agricole. En France, elle se traduit par la délimitation de « zones vulnérables », où sont imposés des pratiques agricoles et mesures à mettre en œuvre sous forme de programmes d'action). Par exemple, l'épandage d'azote provenant des effluents d'élevage est limité par la directive à 170 kg/ha/an dans les zones vulnérables aux  $\text{NO}_3^-$  (Chambres d'agriculture, n.d.).

---

<sup>2</sup> Loi européenne sur la qualité de l'air qui a pour ambition de fixer des plafonds d'émissions de polluants de l'air pour chaque Etat membre et par polluant à l'horizon 2025 et 2030.

### 3.3. Green Deal et cibles quantitatives à l'horizon 2030

Le Green Deal européen, ou Pacte vert européen, présenté le 11 décembre 2019 par la Commission Européenne, constitue un ensemble de mesures visant à atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050. Parmi les ambitions clés du pacte figurent notamment :

- la réduction de 35% des GES agricoles hors CO<sub>2</sub> par rapport à 2015 (Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est et al., 2021) ;
- la réduction des pertes d'azote en vue d'une pollution zéro de l'eau, du sol et de l'air : cela passe par une baisse de l'utilisation des engrais d'au moins 20%, et une diminution des fuites de nutriments d'au moins 50% d'ici à 2030 (RMT Bouclage, 2021b).

## 4. Maîtriser les pertes d'azote à l'échelle du SdC

Un SdC se décrit comme un ensemble de modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Il est défini par la nature des cultures et leur ordre de succession et les itinéraires appliqués à ces différentes cultures (Sebillotte, 1990a).

### 4.1. Lixiviation du NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

#### 4.1.1. Description

La lixiviation est le processus au cours duquel l'eau passe au travers des pores du sol en entraînant les éléments très solubles dans l'eau comme le NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, par percolation en profondeur au-delà de la profondeur d'enracinement. Cela démarre lorsque l'eau a saturé la capacité de rétention d'eau par le sol. Sous le climat du Grand Est, cela se produit pendant l'automne et l'hiver en fonction du régime des pluies, définies comme les périodes hivernales de drainage. Le volume d'eau total qui percole au cours d'une campagne au-delà du niveau des racines est appelée « lame d'eau drainante » (RMT Bouclage, 2021a).

#### 4.1.2. Les déterminants de la lixiviation

##### 4.1.2.1. Actions du sol et du climat

En plus du cumul de pluie, la quantité d'eau drainée dépend directement de la texture du sol : elle est maximale dans les sols sableux et pierreux (faible capacité de rétention de l'eau) et minimale dans les sols argileux (forte capacité de rétention de l'eau). La profondeur d'enracinement détermine aussi cette capacité de rétention via sa capacité à absorber le NO<sub>3</sub><sup>-</sup> présent dans le sol. En effet, il devient difficilement absorbable au-delà de cette profondeur (sauf en terres de craie où des remontées capillaires peuvent le remettre à disposition des racines).

Enfin, la combinaison de cette lame d'eau drainante et de la quantité de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> présente dans le sol au moment où le drainage se produit détermine l'intensité de la lixiviation du NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (RMT Bouclage, 2021a).

##### 4.1.2.2. Actions des pratiques culturales

Tout d'abord, le couple précédent-suivant conditionne la base du bilan « offre-demande » d'azote minéral. La culture précédente, par sa nature et la façon dont elle a été cultivée et récoltée (i.e. date de récolte qui influe sur la durée de minéralisation en sol nu, quantité de résidus retournés au sol et

leur teneur en azote), restitue une certaine quantité d'azote disponible en été et en automne. La culture suivante, par sa nature et sa date de levée et de croissance, conditionne le potentiel de piégeage de  $\text{NO}_3^-$  (plus le semis est précoce, plus la croissance est importante sur la phase automnale, et plus la capacité de piégeage de la plante est importante). Ensuite, la fertilisation organique d'été et d'automne depuis la récolte de la culture précédente, agit directement sur l'azote disponible dans sol. En effet, une partie du fertilisant est déjà sous forme minérale et la minéralisation de son azote organique peut être rapide. Enfin, la fertilisation minérale au printemps de la culture précédente agit sur le moyen terme, indirectement via l'effet de la culture précédente. Plus rare, la fertilisation minérale en période d'interculture ou au semis agit directement et à court terme sur l'azote disponible dans le sol à cette période, car tout ou partie du fertilisant est sous forme minérale (Figure 10) (RMT Bouclage, 2021a).

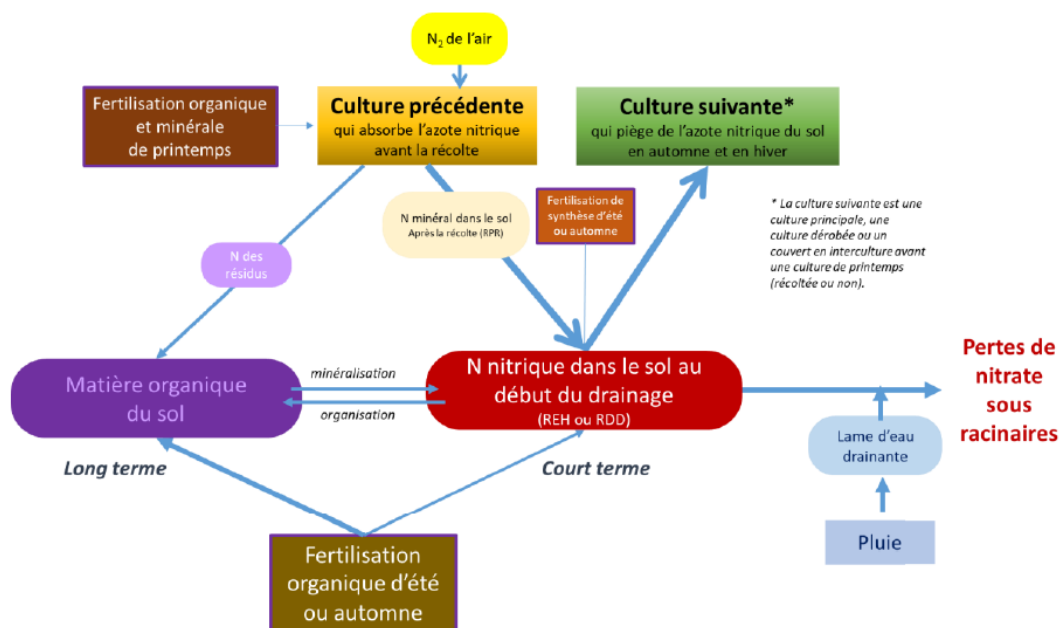


Figure 10 Pratiques et états clés conduisant aux pertes de  $\text{NO}_3^-$  en automne-hiver, source RMT Bouclage

#### 4.1.3. Leviers pour diminuer les pertes par lixiviation

Si une culture précédente annonce une importante quantité d'azote minéral dans le sol et que la CP (Culture Principale) suivante présente de faibles capacités ou si son semis intervient après la période principale de drainage (cultures de printemps et d'été), l'insertion d'une CI (Culture Intermédiaire), comme montré sur la Figure 11, contribue à compenser ce faible piégeage. En effet, la CI réduit le reliquat d'azote minéral à la sortie de l'hiver, à l'inverse d'un sol laissé nu. Aussi, elle libère, après



Figure 11 Succession culturale-type pour limiter les pertes de  $\text{NO}_3^-$

destruction, une partie de son azote organique qui devient disponible pour la culture suivante. En effet, ses résidus (racines, tiges, feuilles) sont riches en azote et ont un C/N faible favorisant une minéralisation rapide (UNIFA, 2017). Afin que la lixiviation de cet azote soit minimisée, il est préférable d'attendre au minimum début décembre avant de détruire la CI, comme le montre la Figure 12. De

plus, l'espèce de le CI détermine fortement l'effet sur la culture suivante. L'utilisation de légumineuses, pures ou en mélange, restitue des quantités élevées d'azote grâce à la fixation symbiotique. Elles sont donc à proscrire dans les SdC intensifs en apport d'azote minéral et organique, ou peuvent alors servir à limiter l'utilisation d'intrants (Cabeza-Orcel & Moureaux, 2017).

Les crucifères (moutarde, radis, colza) et les graminées (ray-grass, avoine) sont plus efficaces que les légumineuses pour capter le  $\text{NO}_3^-$  du sol, mais qui présentent tout de même un effet significatif. Les

couverts végétaux comprenant des légumineuses (vesce, trèfle, fenugrec, etc.) en mélange avec des non-légumineuses, sont autorisés comme « piège à nitrate » en zone vulnérable classée au titre de la directive nitrate (UNIFA, 2017). Ces mélanges apparaissent alors comme un moyen de combiner les avantages des unes et des autres.

Ainsi, en implantant la CI au plus près de la récolte d'été et en la détruisant le plus tardivement possible, le couvert est suffisamment développé à l'automne pour capter l'azote minéral du sol et la période de sol nu est minimisée. Cela peut aussi passer par l'intégration d'une culture associée à la CP de manière que le couvert soit déjà bien implanté à sa récolte (Figure 13). Lorsque la culture associée est une légumineuse, la céréale s'installe plus rapidement que la légumineuse et lui fait concurrence pour l'azote et la lumière. Cependant, cela stimule la nodulation chez la légumineuse qui utilise davantage la fixation symbiotique pour se développer. Au final, les deux espèces n'utilisent pas les mêmes sources d'azote et sont donc complémentaires (UNIFA, 2017).

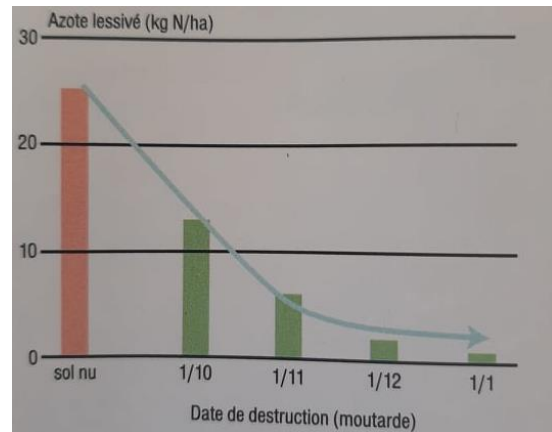


Figure 12 Effet de la date de destruction d'une CI de moutarde sur la quantité d'azote lixivié, source INRA-ITCF, 2002

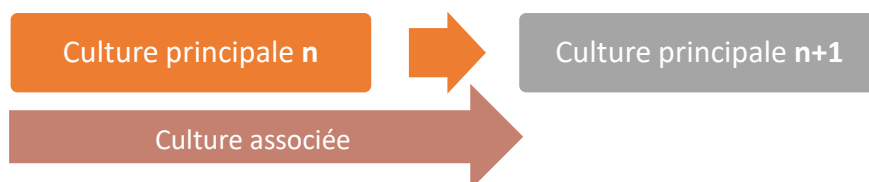


Figure 13 Intégration d'une culture associée dans la succession culturale pour limiter les pertes

Enfin, l'enfouissement des pailles (pauvres en azote et riches en carbone) après moisson permet d'alimenter la biomasse microbienne (bactéries et champignons). Ces organismes consomment jusqu'à 20 à 30 kg d'azote minéral/ha à partir du sol et limitent donc la perte de  $\text{NO}_3^-$  par lixiviation (UNIFA, 2017).

## 4.2. Volatilisation de l' $\text{NH}_3$

### 4.2.1. Description

La volatilisation est le transfert vers l'atmosphère, par diffusion ou convection, de l' $\text{NH}_3$  gazeux présent à la surface du sol, qui est issu de la transformation de l'azote présent sous forme d' $\text{NH}_4^+$  (ammonium). Les pertes par volatilisation surviennent très rapidement après les apports d'engrais azotés minéraux, de produits organiques, et les enfouissements de résidus végétaux riches en azote : la majorité de la

volatilisation se produit ainsi dans les heures qui suivent, et elle est pratiquement achevée au bout de trois semaines (RMT Bouclage, 2021a).

#### 4.2.2. Les déterminants de la volatilisation

##### 4.2.2.1. Actions du sol et du climat

Le processus de volatilisation est très dépendant du sol et du climat. Ainsi, certaines conditions physico-chimiques augmentent le risque après épandage des effluents d'élevage et des engrais azotés :

- Le pH du sol car il conditionne l'équilibre de la transformation de l' $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NH}_3$ . Plus le pH est élevé (plus de 7), plus l'équilibre se déplace vers la production d' $\text{NH}_3$  (Figure 14) ;
- la température du sol car elle agit directement sur cet équilibre chimique. Plus la température est élevée, plus l'équilibre penche vers la

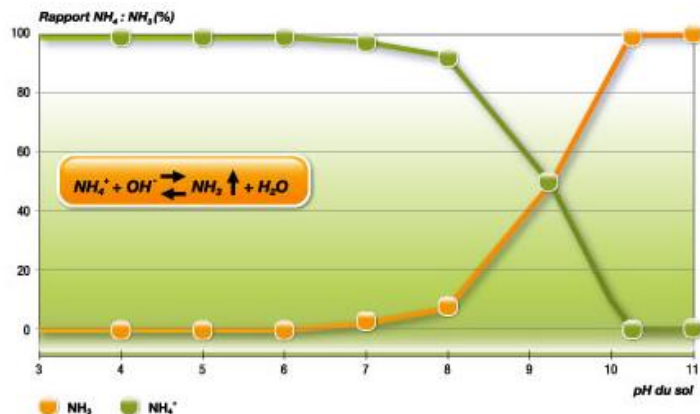


Figure 14 Evolution du rapport  $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$  en fonction du pH, source ADA

production d' $\text{NH}_3$ . De plus, son action est synergique avec celle du pH. Ainsi, les épandages de fin d'été, sur sol sec et chaud, sont plus sensibles à la volatilisation que des épandages de printemps, sur sol frais. De plus, le vent favorise le renouvellement de la couche d'air, diminue sa concentration en ammoniac. Ainsi, lorsqu'il y a beaucoup de vent, le transfert entre le sol et l'atmosphère se poursuit longtemps grâce à la différence de concentration entre la surface du sol et la couche d'air environnante, et la quantité d'ammoniac volatilisé devient alors importante (RMT Bouclage, 2021a).

##### 4.2.2.2. Actions des pratiques culturales

Etant donné que la quantité d' $\text{NH}_3$  volatilisé dépend en premier lieu de la quantité d' $\text{NH}_4^+$  présente à la surface du sol, le choix de la forme d'engrais minéral apporté est crucial. Ainsi, plus l'engrais est riche en ammonium  $\text{NH}_4^+$  et/ou en urée (qui est son précurseur), plus le risque de volatilisation est fort. Comme le montre la Figure 15, l'urée est l'engrais le plus à risque car étant constitué exclusivement d'urée, 100% de la quantité apportée devient de l' $\text{NH}_4^+$  après hydrolyse<sup>3</sup>. De plus, l'hydrolyse de l'urée conduit à une augmentation du pH autour des granulés, ce qui favorise très nettement la production d' $\text{NH}_3$ . La solution azotée, contenant 50% d'urée, 25% d' $\text{NH}_4^+$  (soit 75% d' $\text{NH}_4^+$  après hydrolyse de l'urée), et 25% de  $\text{NO}_3^-$  présente un risque intermédiaire. Enfin, l'ammonitrate qui contient 50% de  $\text{NO}_3^-$  et 50% d' $\text{NH}_4^+$  est moins à risque (RMT Bouclage, 2021a). En effet, la forme nitrate n'est pas soumise au risque de la volatilisation. Le facteur d'émission des ammonitrates est donc 4 à 7 fois plus

<sup>3</sup> L'hydrolyse est la transformation de l'azote uréique (présent dans l'urée) en azote ammoniacal par des enzymes appelées uréases. Ce processus est rapide dès que la température du sol dépasse 10°C (UNIFA, 2017).

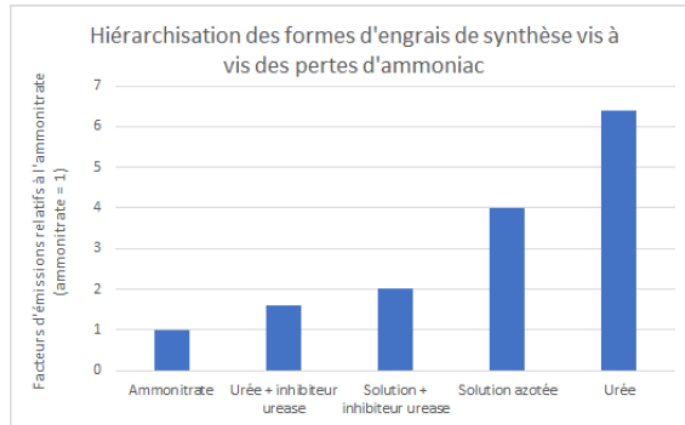


Figure 15 Hiérarchie des risques de volatilisation suivant les engrais de synthèse par comparaison avec l'ammonitrate, source EMEP

faible que celui respectivement des solutions azotées et de l'urée (Pellerin et al., 2014) Ainsi, on peut voir sur le graphique que l'urée multiplie par 6,5 les émissions par rapport à l'ammonitrate.

La dose d'engrais apportée est un autre facteur important : plus la quantité d' $\text{NH}_4^+$  et d'urée apportée est importante, plus le risque de volatilisation augmente.

Concernant la fertilisation organique, et de la même manière que les fertilisants minéraux, ce sont les produits à plus forte concentration en  $\text{NH}_4^+$  et acide uréique qui sont les plus risqués en termes de volatilisation (i.e. lisiers, fientes etc.). Etant donné que c'est la concentration en ces éléments à la surface du sol après l'apport qui influe sur la volatilisation, c'est la quantité au moment de l'épandage qui compte et non la minéralisation du produit qui est trop lente pour influencer le phénomène. Il y a un risque de perdre jusqu'à 70% de l'azote après l'épandage si l'apport n'est pas incorporé au sol dans la demi-journée.

En effet, incorporer l'engrais en profondeur contribue à diminuer la concentration de l'urée et l' $\text{NH}_4^+$  en surface. Cela peut se faire par un travail du sol postérieur à l'épandage (dans les 4h qui suivent l'apport d'engrais) ou par l'utilisation d'outils spécifiques. Par exemple, les injecteurs (pour injection des produits organiques liquides) et les dispositifs d'épandage d'engrais de synthèse associés à des outils de travail du sol permettent d'injecter/localiser l'engrais en profondeur.

Enfin, la culture en place vient influencer la volatilisation. Le microclimat qu'elle engendre par la densité de sa végétation en surface peut faire baisser la température et la vitesse du vent et ainsi réduire les risques de volatilisation (Figure 16) (RMT Bouclage, 2021a).

#### 4.2.3. Leviers pour diminuer les pertes par volatilisation

Tout d'abord, le choix de la forme d'engrais est crucial. Les formes nitriques, prélevées par les plantes directement, sont préférables aux formes uréiques ou ammoniacales. En revanche, lorsque l'urée est associée à un inhibiteur d'uréase, son potentiel de volatilisation est considérablement réduit (jusqu'à -70% pour l'urée et -40% pour la solution azotée). En effet, cet additif bloque temporairement l'hydrolyse de l'urée en  $\text{NH}_4^+$  pendant 5 à 15 jours. Une précipitation dans les 15 jours après l'apport permet donc de dissoudre et incorporer l'engrais dans le sol, et augmente par la même occasion la

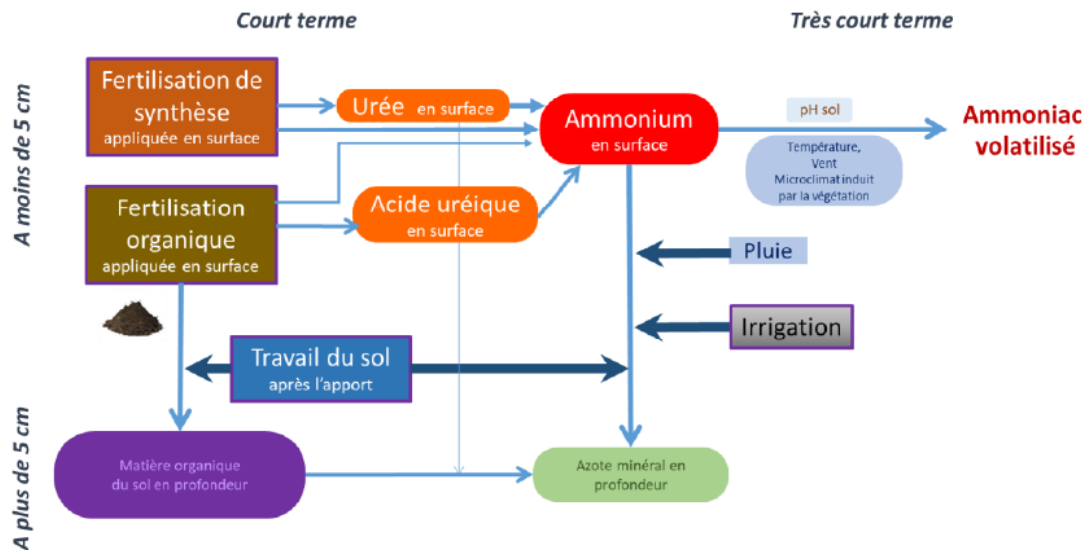


Figure 16 Pratiques et états clés conduisant aux pertes de NH<sub>3</sub>, source RMT Bouclage

part directement utilisée par les plantes. Aussi, les engrais enrobés permettent une libération progressive de l'azote à travers la coque du granulé sur quelques semaines à quelques mois et réduisent jusqu'à 30% le risque de volatilisation (UNIFA, 2017).

Ensuite, le choix de la date d'application est crucial. Si l'apport est positionné juste avant une pluie (d'au moins 10 mm), que le vent est inférieur à 15 km/h, et que la température de l'air ne dépasse pas les 10-15°C, les risques de volatilisation sont fortement réduits (UNIFA, 2017).

Enfin, les méthodes d'incorporation de l'engrais au sol sont à mobiliser. Cela peut être (i) l'incorporation de l'azote au semis qui met l'azote à proximité immédiate des racines, (ii) l'enfouissement rapide avec un travail du sol, (iii) l'utilisation d'un injecteur pour les apports organiques.

#### 4.3. Dénitrification du N<sub>2</sub>O

Le processus de dénitrification du N<sub>2</sub>O est généralement réalisé par des microorganismes et a lieu dans les 10 premiers cm du sol. C'est la réduction successive du NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en nitrite puis en NO et N<sub>2</sub>O qui a lieu principalement en absence d'oxygène dans le sol, c'est-à-dire le plus souvent lorsqu'il est saturé en eau (après une forte pluie ou un dégel, après un tassement). Or, les flux de N<sub>2</sub>O sont fortement variables dans le temps et dans l'espace, et difficilement prédictibles (Hénault et al., 2012). Ainsi, seules les pertes par lixiviation et volatilisation – pour lesquelles il existe de réels leviers à mobiliser pour leur limitation – sont étudiées pour l'évaluation des SdC dans ce rapport.

#### 5. Enjeu de la réduction des pertes en termes d'autonomie azotée

La fourniture en azote provient d'une part des services écosystémiques, et d'autre part des intrants apportés par l'agriculteur. La capacité de l'agroécosystème à fournir des services écosystémiques est modulée par les pratiques de l'agriculteur. Ainsi, l'autonomie est élevée lorsque la part d'azote fournie par les services écosystémiques (e.g. azote fixé par les légumineuses) est la plus élevée possible et la part apportée par les engrais est la plus faible possible (Dardonville, 2021). Cependant, l'agriculteur ne diminue pas automatiquement les intrants à mesure que les services écosystémiques augmentent. En



revanche, dès lors qu'il décide de changer ses pratiques pour moins perdre d'azote (pour des raisons environnementales et/ou économiques), le niveau de fourniture d'azote par les services écosystémiques augmente.

Ainsi, le calcul de la quantité d'azote fixé sur la quantité d'azote total apporté et fixé constitue donc un indicateur pour l'évaluation de l'autonomie azotée du SdC, dans la mesure où l'azote fixé (que l'on peut facilement évaluer avec Syst'N<sup>®</sup>) est un des services écosystémiques, et l'azote total apporté correspond à la part des intrants utilisés.

## 6. Nécessité de développer l'outil Syst'N<sup>®</sup>

L'estimation des risques de pertes avec des indicateurs de pratiques (e.g. dose d'azote, nombre d'apports, surface avec CIPAN (Culture Intermédiaire Piège à Nitrate etc.) ou des bilans par différence entre les entrées et les sorties d'azote dans le système sont des méthodes en « régime stationnaire » qui dominent actuellement (RMT Bouclage, 2020). Or, étant donné que la dynamique de l'azote dans les parcelles est très dépendante des interactions entre les cultures successives, l'impact d'une pratique agricole appliquée sur une parcelle ne peut être évalué sans une réflexion à des échelles temporelles et spatiales supérieures à celle de la durée de la culture fertilisée et de la parcelle (Pellerin et al., 2014). Le calcul des pertes d'azote avec des modèles dynamiques prenant plus ou moins en compte le climat, le sol, le SdC et les interventions culturales existe, mais des améliorations sont nécessaires afin qu'ils puissent être appropriés et utilisés par les praticiens et porteurs d'enjeux (McCown, 2002). Ainsi, des demandes de nouveaux outils ont été faites par des praticiens impliqués dans la gestion de l'azote et l'environnement comme les CA, les Agences de l'eau etc. L'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) et les ICTA (Instituts et Centres Techniques Agricoles) ont alors conçu en partenariat un outil de diagnostic et d'évaluation de ces pertes dans les SdC : Syst'N<sup>®</sup>.

L'outil Syst'N<sup>®</sup> répond à ces demandes en élargissant l'échelle temporelle sur laquelle considérer les effets de la gestion de la fertilisation, sur des couples de cultures et leurs intercultures, et au-delà : il évalue les pertes à l'échelle pluriannuelle.

## 7. Objectifs de la mission et problématique

Etant donné que plus de la moitié des émissions sont issues des engrais minéraux, par leur fabrication et leur épandage, une meilleure maîtrise du cycle de l'azote dans les agrosystèmes est un levier incontournable pour atteindre la multi-performance de la production agricole.

Pourtant, certaines solutions permettant de limiter les pertes d'azote existent et ont déjà été communiquées auprès des agriculteurs (enfouissement de matière organique dans les 4h après épandage par exemple). Ces tactiques d'ajustement des intrants aux conditions locales ne sont pas anecdotiques mais encore à développer (Pellerin et al., 2014). En effet, ces solutions sont soit mal connues, soit non mises en œuvre à cause de freins sociaux (temps de travail) ou économiques (acquisition de matériel spécifique), soit méritent d'être améliorées pour faciliter leur mise en œuvre.

La mission s'inscrit dans le cadre de l'axe 1 du PEI PARTAGE « Solutions innovantes pour limiter les pertes ». Il s'agit d'évaluer, par la simulation, les performances des SdC des exploitations du Living Lab



en termes de pertes d'azote avant et après reconception. L'outil Syst'N® utilisé permet d'identifier visuellement les moments clés de la rotation où les pertes interviennent – et donc de relier directement pratiques agricoles et pertes –, et sert donc également d'appui à la reconception. Ainsi, cette évaluation a pour objectifs (i) de sensibiliser les agriculteurs aux pertes d'azote dans les SdC en les quantifiant et les expliquant, (ii) de vérifier que les SdC reconçus perdent moins d'azote que les SdC initiaux et (iii) d'identifier des solutions pour diminuer ces pertes.

Cela nous amène à la problématique suivante :

**En quoi la modélisation des flux d'azote dans le système sol-plante-eau-atmosphère avec Syst'N® favorise la conception de SdC plus autonomes en azote en limitant les pertes ?**

Les hypothèses d'étude sont donc :

- Chiffrer et localiser les pertes dans la rotation, ainsi que chiffrer la fixation symbiotique, permet de prioriser les actions efficaces et donc d'orienter la conception de nouvelles façons de faire ;
- les chiffres sont des arguments efficaces pour motiver les agriculteurs à concevoir de nouvelles façons de faire (chiffrer les pertes permet notamment de les transformer en €) ;
- le chiffrage reposant sur de la modélisation prend en compte les interactions qu'il est parfois difficile d'appréhender, comme dans le cycle de l'azote qui est complexe.

Pour permettre de répondre à ces hypothèses, la méthodologie suivie est expliquée dans la partie suivante.

# Matériel et méthodes

## 1. Présentation des SdC étudiés

Deux exploitations engagées dans le « Living Lab » du PEI PARTAGE sont sélectionnées pour la modélisation des flux d'azote à l'échelle de leur SdC dans ce rapport.

### 1.1. D'un système lorrain conventionnel à un système biologique avec méthanisation

#### 1.1.1. Contexte pédoclimatique

Cette première exploitation est de type polyculture-élevage bovin viande et est située à Mairy-Mainville en Meurthe-et-Moselle (54), dans l'ancienne région Lorraine, à l'ouest de Thionville. Son SdC occupe une surface de 246 ha sur un sol argilo-limoneux au pH alcalin et est soumis à des phénomènes d'hydromorphie. Il est localisé en zone vulnérable nitrates. Le Tableau 1 présente les caractéristiques du sol retenues pour les simulations réalisées pour ce SdC.

Tableau 1 Principales caractéristiques du sol du SdC de Mairy-Maiville

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Densité apparente	Cailloux (%)	Norg (%)	MO (%)	C/N	pH <sub>eau</sub>	CaCO <sub>3</sub> (%)
0-25	30,8	61,3	7,9	1,3	0	0,1	3	10	7,9	1,3
25-75	40	58	3	1,56	0					

NB : Les données granulométriques proviennent de la base de données sol régionalisée Arvalis incluse dans le logiciel Syst'N® et les valeurs physico-chimiques proviennent d'une analyse de sol.

Le climat est de type semi-continentale avec des températures contrastées, à la fois en journée et entre les saisons. Les données climatiques présentées sur la Figure 17 sont issues de la station météorologique de Nancy (54), à une centaine de kilomètres au sud de l'exploitation, et correspondent aux données moyennes sur la période 2001-2020. Les précipitations moyennes annuelles sont de 750 mm/an et la température moyenne annuelle est de 11°C. Les mois de janvier, février, avril et juin sont habituellement secs (entre 44 et 57 mm de pluviométrie) et les périodes durant lesquelles les précipitations sont généralement les plus abondantes sont les mois de mai, août et décembre

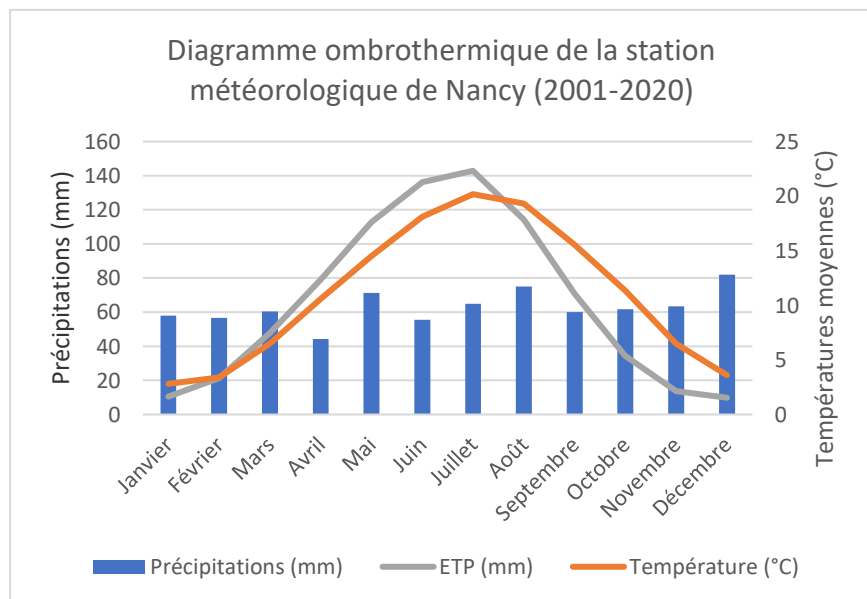


Figure 17 Données climatiques moyennes (2001-2020) de la station météorologique de Nancy

(71, 75 et 82 mm respectivement). L'été est assez chaud et présente des précipitations non négligeables (entre 60 et 75 mm environ) – à l'exception des dernières années qui ont connu de fortes sécheresses –, avec une évapotranspiration raisonnable qui n'entraîne généralement pas de déficit hydrique : l'irrigation n'est donc pas déployée.

### 1.1.2. Présentation du SdC

L'exploitation s'est engagée dans un collectif de méthanisation en septembre 2020, ce qui l'a conduite à modifier son SdC, avec une rotation allongée qui intègre des CIVE (Culture Intermédiaire à Vocation Energétique) : du seigle et du sorgho en double culture (deux cultures en un an). Cet engagement a été accompagné par la conversion du SdC en AB afin de mieux valoriser les effluents d'élevage. Ceux-ci et les CIVE ensilées alimentent le méthaniseur, et le digestat produit est valorisé en tant qu'engrais organique et apporté par injection régulièrement : il se substitue totalement aux engrais chimiques. Ce passage en « tout organique » induit l'augmentation de la quantité de MO apportée (en kgN/ha/an). De nouvelles légumineuses sont introduites en CP en tête de rotation (luzerne ou soja) afin d'enrichir le sol en azote pour les cultures suivantes. Cependant, moins de CI de légumineuses sont présentes par rapport à la situation avant reconception (Figure 18).

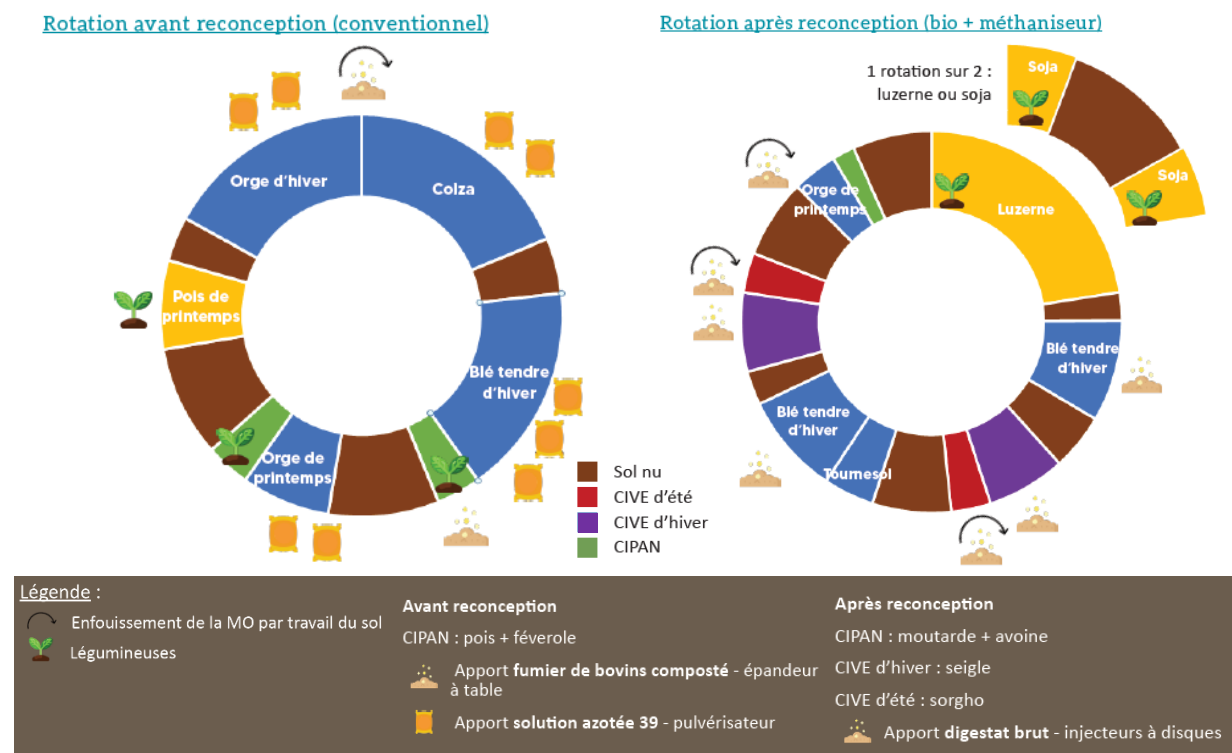


Figure 18 Présentation des rotations du SdC avant reconception (à gauche) et après reconception (à droite)

D'autre part, le sol est travaillé avec un outil à dents ou à disques et il n'y a qu'un seul passage de charrue post-luzerne ; tous les résidus de récolte sont exportés. L'hydromorphie ainsi que la présence de vulpins et chardons ont pour conséquences l'implantation tardive des cultures et le désherbage fréquent.

## 2.1. Système diversifié avec associations culturales en Champagne

### 2.1.1. Contexte pédoclimatique

Cette seconde exploitation est de type céréalière avec plus de 10% de la SAU cultivée en cultures industrielles, et est située à Montloué dans l'Aisne (02), à la frontière des Ardennes (08), proche de l'ancienne région Champagne-Ardenne, au nord de Reims. Son SdC occupe une surface de 263 ha sur un sol limono-argileux sur craie au pH alcalin et dont 30% de la surface est soumise à des phénomènes d'hydromorphie. Il est localisé en zone vulnérable nitrates. Le Tableau 2 présente les caractéristiques du sol retenues pour les simulations réalisées pour ce SdC.

Tableau 2 Principales caractéristiques du sol du SdC de Montloué

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Densité apparente	Cailloux (%)	Norg (%)	MO (%)	C/N	pH <sub>eau</sub>	CaCO <sub>3</sub> (%)
0-25	20,3	27,8	51,9	1,45	3	0,2	2,3	8,9	8	0,3
25-40	24,6	26,3	49	1,45	7					
40-50	25	26,1	48,9	1,35	30					
50-90	24,6	26,3	49,1	1,35	30					

NB : Les données proviennent de la base de données sol régionalisée Arvalis incluse dans le logiciel Syst'N®.

Le climat est peu différent de celui de Nancy. Les données climatiques présentées sur la Figure 19 sont issues de la station météorologique de Fagnières (51), à une centaine de kilomètres au sud de l'exploitation, et correspondent aux données moyennes sur la période 2000-2019. Les précipitations moyennes annuelles sont un peu plus faibles (630 mm/an) et la température moyenne annuelle est identique (11°C). Les mois de mars, avril et septembre sont habituellement secs (entre 35 et 46 mm de pluviométrie) et les périodes durant lesquelles les précipitations sont généralement les plus abondantes sont les mois de juillet, août et décembre (61, 68 et 63 mm respectivement). A l'instar de la Lorraine, l'été présente donc des précipitations non négligeables – à l'exception des dernières années qui ont connues de fortes sécheresses –, avec une évapotranspiration raisonnable qui n'entraîne généralement pas de déficit hydrique : l'irrigation n'est donc pas déployée.

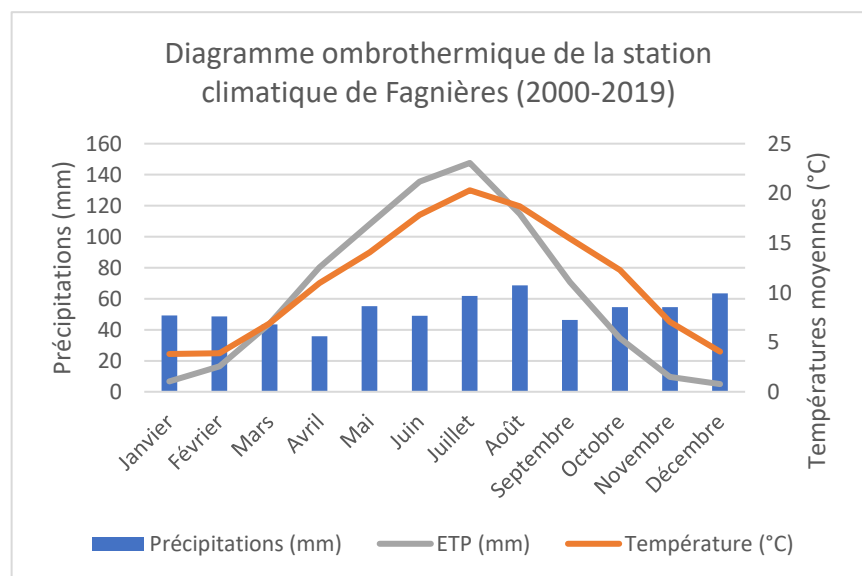


Figure 19 Données climatiques moyennes (2000-2019) de la station météorologique de Fagnières

## 2.1.2. Présentation du SdC

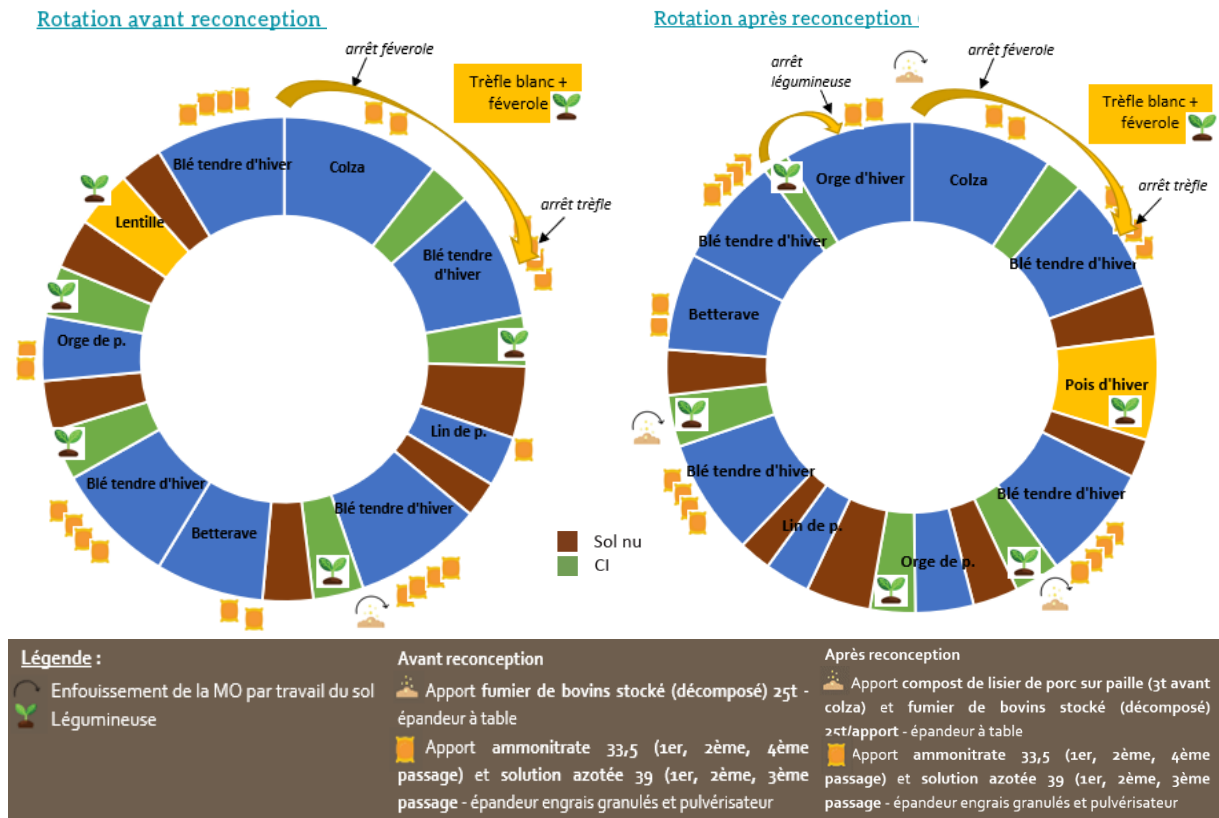


Figure 20 Présentation des rotations du SdC avant reconception (à gauche) et après reconception (à droite)

Comme le montre la Figure 20, avant comme après reconception, le SdC est diversifié, à rotation longue, et est conçu de manière à (i) limiter les pertes de  $\text{NO}_3^-$ , avec la mise en place de couverts d'interculture et en prêtant attention aux successions de culture, et (ii) fixer de l'azote grâce aux légumineuses (CP, CI, cultures associées). Il est entièrement conduit en TCS (Techniques Culturelles Simplifiées) et le semis-direct est privilégié. Aussi, il y a incorporation systématique des engrais organiques avec un outil à disque sur 10 cm.

Après reconception, la tête de rotation reste la même (colza associé à trèfle blanc et féverole) mais l'ordre des cultures dans la rotation change ensuite : le pois d'hiver remplace le lin de printemps en précédent du premier blé, qui intervient maintenant après l'orge de printemps et en précédent du deuxième blé. La succession betterave-blé survient en fin de rotation, et l'orge d'hiver qui suit est semé dans un couvert de légumineuse déjà en place. Ensuite, le nombre d'apports d'azote organique passe d'un à trois, mais les apports d'engrais minéraux (ammonitrate et solution azotée) ne sont pour autant pas réduits. Une seule légumineuse est présente en CP : la lentille est remplacée par le pois d'hiver. Enfin, les pailles de blé et d'orge étaient toujours exportées avant reconception ; celles de blé sont maintenant exportées une fois sur deux. Les résidus de toutes les autres cultures sont quant à eux toujours enfouis.

Pour ces deux SdC (lorrain et champenois), les pertes de  $\text{NO}_3^-$  sont un critère important puisqu'ils sont tous deux positionnés en zones vulnérable aux  $\text{NO}_3^-$ . Les pertes d' $\text{NH}_3$  sont aussi regardées du fait d'un contexte de sol avec un pH élevé. L'outil Syst'N<sup>®</sup>, présenté ci-après, permet d'évaluer ces pertes.

## 2. Evaluation des pertes d'azote avec Syst'N®

### 2.1. Description du logiciel

#### 2.1.1. Fonctionnement global

Son simulateur a été construit par l'assemblage de formalismes de modèles existants, représentant les grands types de transferts de l'azote dans le système et utilisables pour une gamme large de SdC et de situations pédoclimatiques. Le modèle intègre par exemple des modules issus de (i) STICS (Brisson et al., 1998) pour le bilan hydrique et la lixiviation des NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, de (ii) AZOFERT® (Machet et al., 2004) pour la minéralisation de la MO et des résidus de récolte, de (iii) AZODYN (Jeuffroy & Recous, 1999) pour l'absorption d'azote par les cultures et (iv) de Volt'air (Génermont & Cellier, 1997) pour les émissions d'NH<sub>3</sub> au champ. Syst'N® est ainsi basé sur un modèle dynamique de simulation des flux d'azote dans le système sol-plante-atmosphère à l'échelle spatiale d'une parcelle homogène (**Voir Annexe 1 Schéma du modèle intégré au simulateur de Syst'N, constitué de modules issus de différents modèles, source RMT Bouclage – p.54**), fonctionnant à un pas de temps journalier et permettant l'enchaînement de plusieurs années culturales (le nombre d'années de simulation est au choix). Il calcule les flux d'azote (en kg) dans le sol et en direction des compartiments eau et air, à partir des données d'entrée décrivant le climat, le sol et le SdC (Parnaudeau et al., 2012). Ces flux sont calculés avec une incertitude de +/- 10 kg N (RMT Bouclage, 2021b).

Le logiciel Syst'N® possède également une version « web », qui est capable, contrairement à la version classique, de superposer plusieurs cultures sur une même période et donc de simuler des cultures associées. C'est cette version qui est utilisée pour cette étude ; il est à noter qu'elle est encore en test et subit des mises à jour régulières.

#### 2.1.2. Les données d'entrée

Les données à saisir en entrée décrivent les pratiques culturales ainsi que le contexte pédoclimatique. Le Tableau 3 présente dans le détail les données requises pour le fonctionnement de l'outil : (i) l'année de début de simulation et le nombre d'années de simulation, (ii) la description des caractéristiques du sol, (iii) les données climatiques, (iv) l'historique cultural de la parcelle des 10 dernières années, (v) le précédent de la rotation, et (vi) la succession des cultures avec l'itinéraire technique de chaque culture principale, décrit sous la forme d'une suite d'interventions culturales (la CI ou CIPAN qui la précède, les fertilisations organique et minérale, le travail du sol, les fauches et périodes de pâturage pour les prairies) (**Voir Annexe 2 Interfaces de saisie des données du simulateur Syst'N – p.54**).

Tableau 3 Données requises pour le fonctionnement de l'outil Syst'N

Caractéristiques du sol	Climat	Historique culturel des 10 dernières années	Précédent de la rotation	Rotation
<p>Sélection type de sol régional (<b>base de données</b>) avec entrées automatiques</p> <p><b>OU entrée manuelle</b></p> <p>Description de chaque horizon</p> <p>-Profondeur</p> <p>-Granulométrie</p> <p>Description de l'horizon de surface</p> <p>-% N organique</p> <p>-% MO</p> <p>-C/N</p> <p>-pH eau</p> <p>-% CaCO<sub>3</sub></p> <p>Profondeur obstacle à l'enracinement</p>	<p><b>Données journalières</b></p> <p>-Précipitations</p> <p>-T°C moyenne de l'air</p> <p>-</p> <p>Evapotranspiration</p> <p>-Rayonnement global</p>	<p><b>Travail du sol</b></p> <p>-Labour/travail superficiel/semis direct</p> <p><b>PRO et résidus de culture</b></p> <p>-Nature des PRO apportés et fréquence d'apport</p> <p>-Gestions des résidus (enfouis/enfouis 1 fois sur 2/enlevés)</p>	<p><b>Caractéristiques</b></p> <p>-Espèce cultivée</p> <p>-Date de récolte</p> <p>-% paille exportée</p> <p>-Rendement</p>	<p><b>Description de chaque CP</b></p> <p>-Espèce cultivée</p> <p>-Dates de semis et de récolte</p> <p>-Rendement</p> <p>-% paille exportée</p> <p>⇒ <b>CI</b></p> <p>-Type cultivé (légumineuse à graines/fourragère, moutarde, ray-grass ou repousses colza)</p> <p>-Dates de semis et de récolte</p> <p>⇒ <b>Fertilisation organique/minérale</b></p> <p>-Produit utilisé</p> <p>-Date, dose, outil pour chaque apport</p> <p>-Pour les PRO : paramètres de composition (<b>base de données ou entrée manuelle</b>)</p> <p>⇒ <b>Travail du sol</b></p> <p>-Date et profondeur pour chaque passage</p> <p>-Outil utilisé</p> <p>⇒ <b>Fauche et pâture (pour les prairies)</b></p> <p>-Dates de passage</p> <p>-Hauteur restante (cm)</p>

Ces données décrivent une situation : l'année de début de simulation et le nombre d'années de simulation sont à renseigner également

Les données climatiques de deux stations sont sélectionnées pour cette étude : celles de la station de Fagnières (Marne) pour les SdC localisés en Champagne-Ardenne et celles de la station de Nancy (Meurthe-et-Moselle) pour les SdC localisés en Lorraine.

Les données sol sont renseignées selon la disponibilité d'une analyse de sol sur le SdC étudié, auquel cas les caractéristiques du sol sont entrées manuellement dans l'interface de saisie. Dans le cas contraire, un type de sol est sélectionné dans la base de données « sols »<sup>4</sup> régionale et les caractéristiques sont complétées automatiquement.

De la même manière, les paramètres de composition des PRO selon la disponibilité d'une analyse d'effluent pour le produit apporté, auquel cas ceux-ci (% N total, % N-NH<sub>4</sub>, % MS) sont entrés manuellement. Dans le cas contraire, le type d'effluent est sélectionné et les paramètres de

<sup>4</sup> Tous les sols sont issus de la base de données Arvalis et incluent la description du profil et les caractéristiques physicochimiques pour environ 20 types de sols par région métropolitaine.

composition sont complétés automatiquement, à l'exception des valeurs des digestats de méthanisation qui proviennent de références de la région Grand Est (Chambres d'agriculture, 2019).

Certaines cultures cultivées dans les SdC étudiés, telles que le seigle et le sorgho, ne sont pas paramétrées dans Syst'N®. Elles sont alors substituées par des cultures présentant des caractéristiques similaires selon les critères de (i) biomasse potentielle, (ii) rendement potentiel (iii) profondeur d'enracinement, et (iv) potentiel de piégeage d'azote du sol. Ainsi, le seigle (fourrager) est remplacé par du ray-grass, le sorgho (fourrager) par du maïs ensilage, et la lentille par du pois de printemps (ITAB, 2012 ; GIEE Magellan, 2019).

### *2.1.3. Les sorties*

Le simulateur estime les pertes jour après jour, mais on les visualise à un pas de temps plus long pour en faciliter la lecture (mois, rotation). A la sortie, le simulateur donne accès à (i) un bilan des pertes moyennes annuelles à la rotation (***Voir Annexe 3 Capture d'écran sortie Syst'N : Bilan des pertes à l'échelle de la rotation (moyennes annuelles tenant compte de toutes les cultures de la rotation p.57)***) et à (ii) un aperçu de la dynamique des pertes sur toute la durée de la simulation (au pas de temps du mois) et à l'échelle de la rotation en moyennant les pertes pour chaque répétition de la rotation (***Voir Annexe 4 Capture d'écran sortie Syst'N : Dynamique des pertes au cours de la succession – p.58)***).

### *2.1.4. Raisons du choix de l'outil*

Tout d'abord, Syst'N® constitue un outil simple et robuste d'estimation de l'ensemble des pertes azotées aux échelles de la parcelle et de la rotation, en tenant compte des pratiques culturales les affectant. Il permet en effet de faire le lien entre les pertes d'azote et les caractéristiques du SdC combinées à celles des conditions climatiques.

L'objectif étant d'améliorer l'autonomie azotée (c'est-à-dire substituer les engrais de synthèse par d'autres sources et ressources, utiliser les combinaisons précédents suivants et les CI pour recycler l'azote du sol plutôt que de la laisser quitter le système sol-culture), cela induit la nécessité d'une prise en compte de l'échelle pluriannuelle et d'un diagnostic pour mieux comprendre et faire comprendre l'origine des pertes d'azote. Aucun outil équivalent n'existe actuellement en France (Pellerin et al., 2014).

Ensuite, il est facile d'utilisation : les données requises à son fonctionnement sont faciles d'accès, et l'outil comprend des bases de données pour pallier un éventuel manque de données.

Enfin, il est un outil approprié dans une démarche de conseil. D'une part, les pertes calculées sont sensibles à des variations d'ITK (itinéraire technique) : date d'apport, type de produit utilisé et dose apportée. D'autre part, la simulation d'un nouveau SdC sur la base de l'initial peut être réalisée rapidement, ce qui présente l'avantage de pouvoir tester des idées, au cours d'une réunion de groupe par exemple.

## 2.2. Démarche d'évaluation

Une démarche d'évaluation peut être définie comme la mise en place d'un ensemble d'étapes organisées, allant des réflexions et des choix préalables à l'évaluation, jusqu'à l'interprétation et à la



représentation des résultats. La démarche englobe tous les choix successifs réalisés : le choix de la finalité et du niveau d'évaluation, des critères évalués, le choix de la méthode à utiliser, la modalité de collecte de données, la représentation des résultats, etc. (Lairez et al., 2015).

### 2.2.1. Démarche globale

L'évaluation a pour finalité principale de sensibiliser les agriculteurs aux marges de progrès en termes de pertes d'azote et d'autonomie azotée. Dans un premier temps, cela passe par la quantification des pertes azotées et leur conversion en euros perdus, du ou des SdC de leur exploitation. Dans un second temps, une fois le diagnostic établi, il s'agit d'identifier les éléments techniques à améliorer afin d'établir des recommandations pour accompagner le changement de pratiques. De nouvelles simulations peuvent être réalisées afin de tester différents scénarios de changement de pratiques.

Le choix est fait d'utiliser une méthode d'évaluation existante. Se baser sur des cadres d'analyse et des outils existants permet d'une part, d'uniformiser la collecte et l'analyse des données, et d'autre part, de standardiser les évaluations, ce qui facilite l'échange d'expériences et d'informations (Lairez et al.,

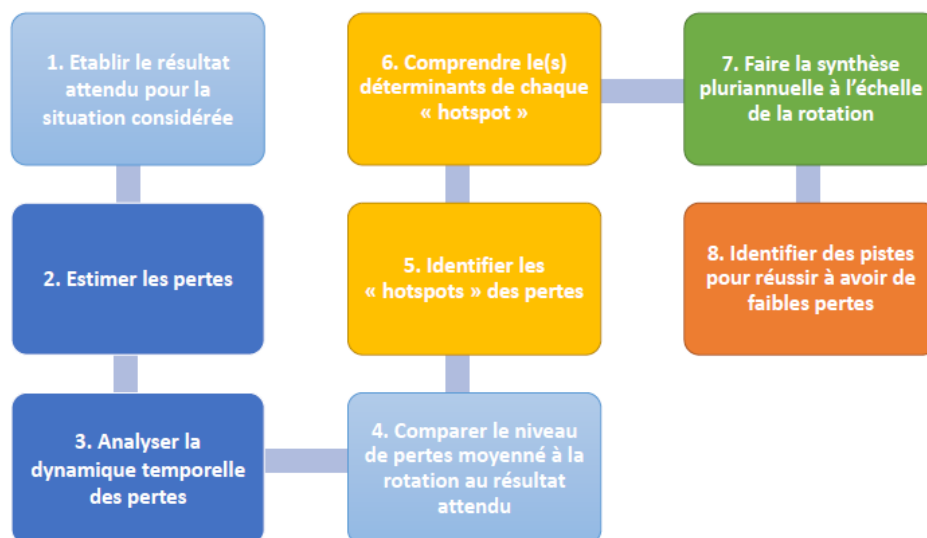


Figure 21 Démarche d'évaluation des pertes d'azote établie dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N, source RMT Bouclage

2015). Pour cette étude, la démarche d'évaluation des pertes d'azote établie dans le cadre du projet « Agro-éco-Syst'N »<sup>5</sup> et décrite par la Figure 21 est utilisée.

Pour chaque exploitation étudiée, les pratiques culturales moyennes des dernières années de chaque SdC sont simulées sur les 20 dernières années climatiques (2000-2019 pour les SdC situés en Champagne-Ardenne, et 2001-2020 pour les SdC situés en Lorraine). La rotation est donc répétée autant de fois que nécessaire sur 20 années climatiques.

<sup>5</sup> Le projet Agro-éco-Syst'N (2017-2020) a permis la production de références sur les performances azotées des SdC, afin d'identifier les systèmes capables d'émettre peu d'azote vers l'environnement tout en produisant en quantité comme en qualité.

Les SdC à évaluer n'ont en réalité pas tous été reconçus, par manque de temps des conseillers départementaux pour l'animation des ateliers de groupe. La Figure 22 présente la boucle de

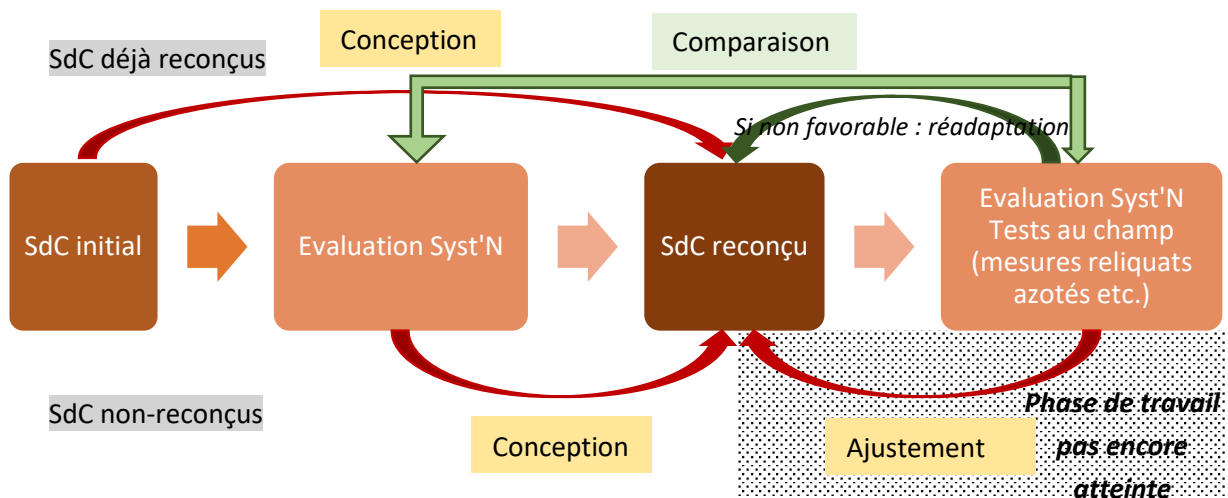


Figure 22 Boucle de rétroaction évaluation-reconception des SdC déjà reconçus et non-reconçus

rétroaction évaluation-reconception, d'une part pour les SdC déjà reconçus (en haut de la figure), et d'autre part pour les SdC non-reconçus (en bas de la figure). Le principe est pratiquement le même : le SdC initial est évalué pour les SdC non-reconçus, ce qui permettra de proposer des pistes d'adaptation pour la création d'un SdC reconçu. Quant aux SdC déjà reconçus avant la première évaluation Syst'N, il est possible de comparer les situations avant et après reconception, ce qui permet de vérifier si le SdC reconçu perd moins d'azote que le SdC de départ, et l'adapter si ce n'est pas le cas. L'évaluation des SdC déjà reconçus a donc une phase d'avance, étant donné qu'ils sont d'ores et déjà en phase d'« ajustement » contrairement aux SdC non reconçus.

### 2.2.2. Récolte des données

Les données d'entrée Syst'N® (Tableau 1) sont récoltées auprès des neuf conseillers départementaux, qui ont chacun à leur charge un groupe d'agriculteurs. Pour ce faire, un fichier Excel a préalablement été élaboré (*Voir Annexe 5 Extraits du fichier Excel de récolte des données d'entrée Syst'N – p.59*) et présenté aux conseillers lors d'une réunion, durant laquelle le logiciel Syst'N® leur a par ailleurs été présenté. De nombreux échanges par mail/téléphone et relances ont eu lieu avant l'obtention de fichiers exhaustifs. Des analyses de sol et effluents spécifiques à chaque SdC leur ont aussi été demandées afin de s'approcher au plus près de la réalité.

### 2.2.3. Définition des seuils de pertes

#### 2.2.3.1. Pour l'évaluation de la performance environnementale

Cette première étape, dans la démarche d'évaluation Agro-éco-Syst'N, consiste à fixer des seuils de pertes à partir desquels il est considéré que le système n'est pas performant d'un point de vue environnemental. Les seuils retenus pour cette étude sont ceux ayant été fixés dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N et sont représentés sur la Figure 23. Pour les deux types de pertes évalués – lixiviation des  $\text{NO}_3^-$  et volatilisation de  $\text{NH}_3$  –, trois classes de résultats sont définies : une classe de réussite, une

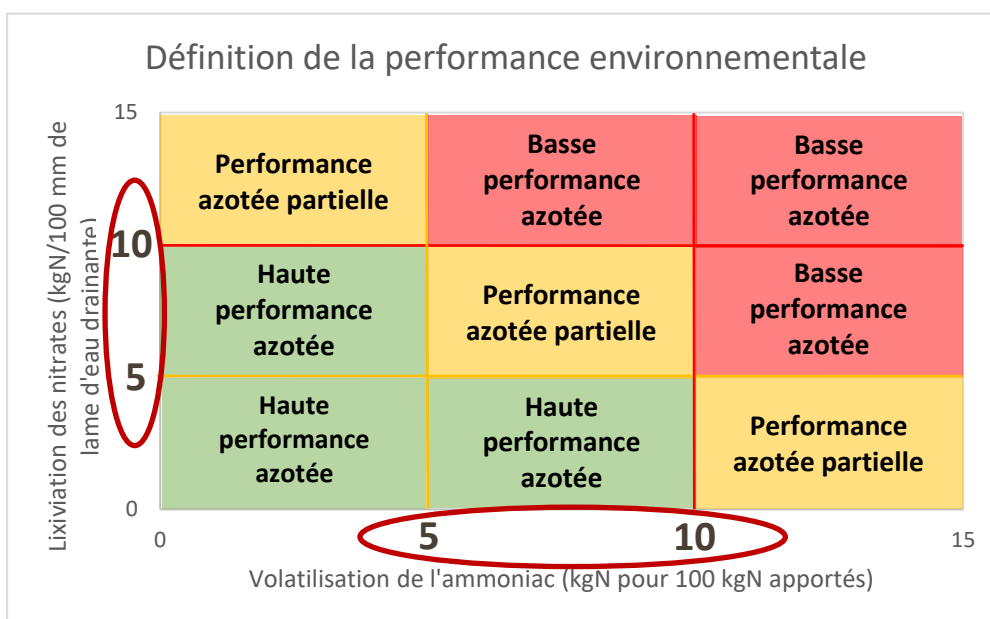


Figure 23 Seuils de pertes environnementaux définis dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N, source RMT Bouclage

classe d'échec et entre les deux, une classe intermédiaire de résultats acceptables. Cela conduit à proposer deux seuils de résultats, un premier « attendu » et une deuxième « acceptable », ce qui est aussi utile pour éviter qu'une incertitude sur les calculs ou les mesures conduisent à assimiler le résultat d'un échec à une réussite, et inversement. Ces niveaux de performance sont établis en valeur relative à la dose d'azote apportée pour l' $\text{NH}_3$  et au volume d'eau drainée pour le  $\text{NO}_3^-$ , plutôt que par des pertes absolues en kgN/ha. Ceci est utile afin de faire abstraction de ces deux grands déterminants des pertes, le volume d'eau drainé (lié au type de sol et au climat de l'année) pour le  $\text{NO}_3^-$  et la dose de l'apport pour l' $\text{NH}_3$ .

Concernant la lixiviation des  $\text{NO}_3^-$ , les valeurs des seuils proposés ont été calculées à partir de la norme de potabilité des eaux dans les captages, qui est de 50 mg de  $\text{NO}_3^-$ /l d'eau. Cela équivaut à 11 mg d'azote/l d'eau<sup>6</sup> et rapporté à 100 mm de lame d'eau drainante, cela revient à 11 kgN/100 mm. Pour simplifier, le seuil est fixé à 10 kgN/ha/100 mm. Au-dessus de ce seuil, le SdC est donc qualifié de faiblement performant. En-dessous, les situations sont considérées comme à faibles pertes de lixiviation, avec un deuxième seuil à 5 kgN/ha/100 mm, sous lequel le SdC est qualifié de hautement performant.

Concernant la volatilisation de l' $\text{NH}_3$ , faute de norme comme pour le  $\text{NO}_3^-$  et compte tenu des références expérimentales disponibles<sup>7</sup> et du fait que ces émissions dépendent d'abord de la quantité d'azote présente sous forme d' $\text{NH}_4^+$  et d'urée, les seuils proposés sont de 5 et de 10 kg d'azote volatilisé pour 100 kg d'azote apporté, ce qui correspond à des seuils de 5 et 10% de la quantité totale apportée. Cela permet également de faire le lien entre les pertes azotées et un gaspillage des intrants.

<sup>6</sup> 1 mg  $\text{NO}_3^-$  = 0,23 mg N

<sup>7</sup> Les références en question sont celles issues des projets Volat'NH3 (Casdar, 2009-12), EvaPRO (Ademe, 2015-19) et EvaMIN (2016-19).

Enfin, afin de qualifier la performance azotée globalement sur une situation donnée, les performances sur le  $\text{NO}_3^-$  et l' $\text{NH}_3$  sont agrégées en trois niveaux de « double performance » comme le montre la Figure 23 : (i) performance « haute » quand les pertes de  $\text{NO}_3^-$  et d' $\text{NH}_3$  sont toutes les deux faibles ou faibles pour l'une des formes et moyennes pour l'autre, (ii) performance « partielle » quand les pertes sont faibles pour l'une des formes mais élevées pour l'autre ou que les pertes sont moyennes pour les deux formes, et (iii) performance « basse » quand les pertes sont élevées pour les deux formes ou élevées pour l'une et moyenne pour l'autre.

#### 2.2.3.2. Pour l'évaluation de la performance économique

Afin d'évaluer la performance économique du SdC étudié, les pertes en flux total (c'est-à-dire la totalité des pertes par volatilisation et lixiviation en  $\text{kgN/ha/an}$  non rapportées à la dose d'azote apportée et au volume d'eau drainée respectivement) sont d'abord converties en euros<sup>8</sup>, donnant des pertes en €/ha/an. Cela représente le flux réel perdu en euros.

Ensuite, étant donné qu'il est impossible d'atteindre « zéro perte », une partie de ce flux total est considéré comme « inévitable ». Plus précisément, sont considérées comme « inévitables », les pertes sous les seuils de 5  $\text{kgN/100 mm}$  d'eau drainante pour la lixiviation et de 5  $\text{kgN/100 kg d'N}$  apporté pour la volatilisation, qui correspondent aux seuils les plus exigeants pour ces deux types de pertes.

Ainsi, la potentielle économie pouvant être réalisée est calculée au regard des pertes « évitables » uniquement.

#### 2.2.4. Evaluation et interprétation des résultats

L'évaluation se fait d'abord sur la valeur des pertes moyennes à la rotation. Si cette valeur correspond à un niveau de performance « basse », il est nécessaire d'identifier les « hotspots » d'émissions de  $\text{NO}_3^-$  et/ou  $\text{NH}_3$  parmi les années de la rotation, c'est-à-dire les épisodes de pertes pour lesquels les valeurs perdues sont les plus élevées (supérieures à la moyenne de la rotation ou aux seuils maximaux). Cela permet d'analyser en priorité au niveau de quelles successions de deux cultures de la rotation les pertes dépassent ces valeurs. Pour ce faire, l'interface de sortie est mobilisée car elle permet de visualiser assez rapidement ces épisodes de pertes.

Ensuite, afin de comprendre l'origine des pertes, les pratiques-clés et états-clés (Figure 10 et Figure 16) doivent être analysés. Plus précisément, pour les pertes par lixiviation, il est nécessaire d'analyser (i) la période de drainage en automne et hiver associée à la quantité d'azote minéral dans le sol au début de drainage, (ii) l'origine du fort REH : présence ou non d'une CI, culture précédente qui restitue beaucoup d'azote, culture suivante à levée tardive ou à croissance lente etc., (iii) les pratiques de fertilisation réalisées sur la culture précédente. Pour les pertes par volatilisation, il est nécessaire de revenir à la volatilisation associée à chaque apport afin d'en analyser l'efficacité, sachant le délai très court entre le moment de l'apport et le début des émissions. Il est donc nécessaire d'analyser (i) les types d'engrais utilisés afin d'évaluer la quantité d'azote apportée sous forme d' $\text{NH}_4^+$  et urée, qui constitue le pool d'azote volatilisable, (ii) si l'engrais azoté a été enfoui, et si oui, au bout de combien de temps après l'apport (le risque de pertes est élevé après 24h), (iii) si l'apport est en végétation ou

---

<sup>8</sup> Le prix d'1 uN retenu pour les calculs est de 0,85€ (source : Terre-net, marchés agricoles, le 19/03/2021, prix au départ de l'usine/port).

non, et (iv) le pH du sol. La température ou le vent jouent également un rôle sur les pertes par volatilisation, mais ne peuvent pas servir pour cette étude à l'interprétation des résultats, étant donné que l'on simule des pratiques moyennes (dates approximatives et moyennes de pertes de différentes années climatiques).

Après l'analyse des « hotspots », un bilan à l'échelle de l'ensemble de la rotation est réalisé en soulignant les épisodes de pertes (sous quelles cultures elles interviennent) et les combinaisons de pratiques associées, en faisant le lien avec le contexte pédoclimatique du SdC.

Enfin, cette démarche permet de proposer de nouvelles pratiques pour les épisodes de la rotation les plus critiques. De nouvelles simulations pour vérifier que le SdC proposé permet de conduire à une situation perdant moins d'azote peuvent ensuite être réalisées.

# Présentation et analyse des résultats

## 1. SdC lorrain

### 1.1. Quantification des flux d'azote : comparaison avant-après reconception

Le bilan des flux d'azote moyens en kgN/ha/an à l'échelle du SdC est l'une des deux sorties Syst'N® et est présenté dans le Tableau 4, avant et après reconception. Plus précisément, le bilan des pertes moyennes annuelles à la rotation (surligné en bleu) permet de situer globalement le niveau moyen des pertes annuelles ; il prend notamment en compte d'éventuelles « compensations » entre des cultures/années très fortement émettrices et d'autres qui le sont moins.

Tableau 4 Flux moyens d'azote total simulés à l'échelle du SdC lorrain sur l'ensemble de la rotation : a) avant reconception, b) après reconception (kgN/ha/an)

#### a) Avant reconception

Entrées de N (en kgN/ha/an)				Sorties de N (en kgN/ha/an)	
Fertilisation minérale	104	Bilan apparent (entrées N – sorties N par exportation)	56	Exportations par les récoltes	99
Fertilisation organique	32	Variation du stock d'azote total dans le sol (entrées N – sorties N par exportation – pertes N)	5	Résidus de récolte, pailles si exportées	48
<b>APPORTS TOTAUX</b>	<b>136</b>	Concentration moyenne en NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> sous le profil (en mg NO <sub>3</sub> /l)	83	<b>SORTIES TOTALES</b>	<b>147</b>
Fixation d'azote	67				
<b>ENTREES TOTALES</b>	<b>203</b>				

Pertes d'azote moyennes annuelles (en kgN/ha/an)		Lame drainante annuelle (en kgN/ha/an)
Ammoniac	9	222
Nitrate	42	
<b>TOTAL</b>	<b>51</b>	

#### b) Après reconception

Entrées de N (en kgN/ha/an)				Sorties de N (en kgN/ha/an)	
Fertilisation minérale	0	Bilan apparent (entrées N – sorties N par exportation)	73	Exportations par les récoltes	41
Fertilisation organique	89	Variation du stock d'azote total dans le sol (entrées N – sorties N par exportation – pertes N)	23	Résidus de récolte, pailles si exportées	29
<b>APPORTS TOTAUX</b>	<b>89</b>	Concentration moyenne en NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> sous le profil (en mg NO <sub>3</sub> /l)	92	<b>SORTIES TOTALES</b>	<b>70</b>
Fixation d'azote	54				
<b>ENTREES TOTALES</b>	<b>143</b>				

Pertes d'azote moyennes annuelles (en kgN/ha/an)		Lame drainante annuelle (en kgN/ha/an)
Ammoniac	2	228
Nitrate	47	
<b>TOTAL</b>	<b>49</b>	

Après reconception (Tableau 4 b), les entrées moyennes d'azote pour ce SdC sont de 143 kgN/ha/an (-60 kgN par rapport au SdC avant reconception (Tableau 4 a)) avec le passage en AB et l'arrêt de l'utilisation des engrais minéraux). Les entrées exogènes issues des engrais organiques représentent 89 kgN/ha/an (elles ont presque triplé par rapport au SdC avant reconception) et les entrées issues de la fixation biologique de l'azote atmosphérique (soja + luzerne) représentent 54 kgN/ha/an (elles ont diminué de 13 kgN/ha/an par rapport à la situation avant reconception). Les sorties moyennes d'azote à l'échelle du SdC sont de 70 kgN/ha/an après reconception (Tableau 4 b)) (issues de l'exportation des grains des récoltes et des résidus) et ont fortement diminué du fait du passage en AB et donc de la diminution des rendements (-77 kgN/ha/an) (Tableau 4 a)).

Concernant les pertes moyennes d'azote à l'échelle de la succession culturale étudiée, la situation avant reconception, comme indiqué dans le Tableau 4 a), se caractérise par de faibles pertes d' $\text{NH}_3$  (9 kgN/ha/an) et très élevées en  $\text{NO}_3^-$  (42 kgN/ha/an). Après reconception (Tableau 4 b)), les pertes d' $\text{NH}_3$  diminuent pour devenir quasiment nulles (2 kgN/ha/an). Néanmoins, les pertes de  $\text{NO}_3^-$  augmentent légèrement. Lorsque l'on rapporte ces valeurs en pourcentage de la quantité d'azote total apporté pour l' $\text{NH}_3$ , et de la lame d'eau drainante pour le  $\text{NO}_3^-$ , le SdC passe de basse performance azotée à performance azotée partielle, grâce à la forte diminution des pertes par volatilisation (Figure 24).

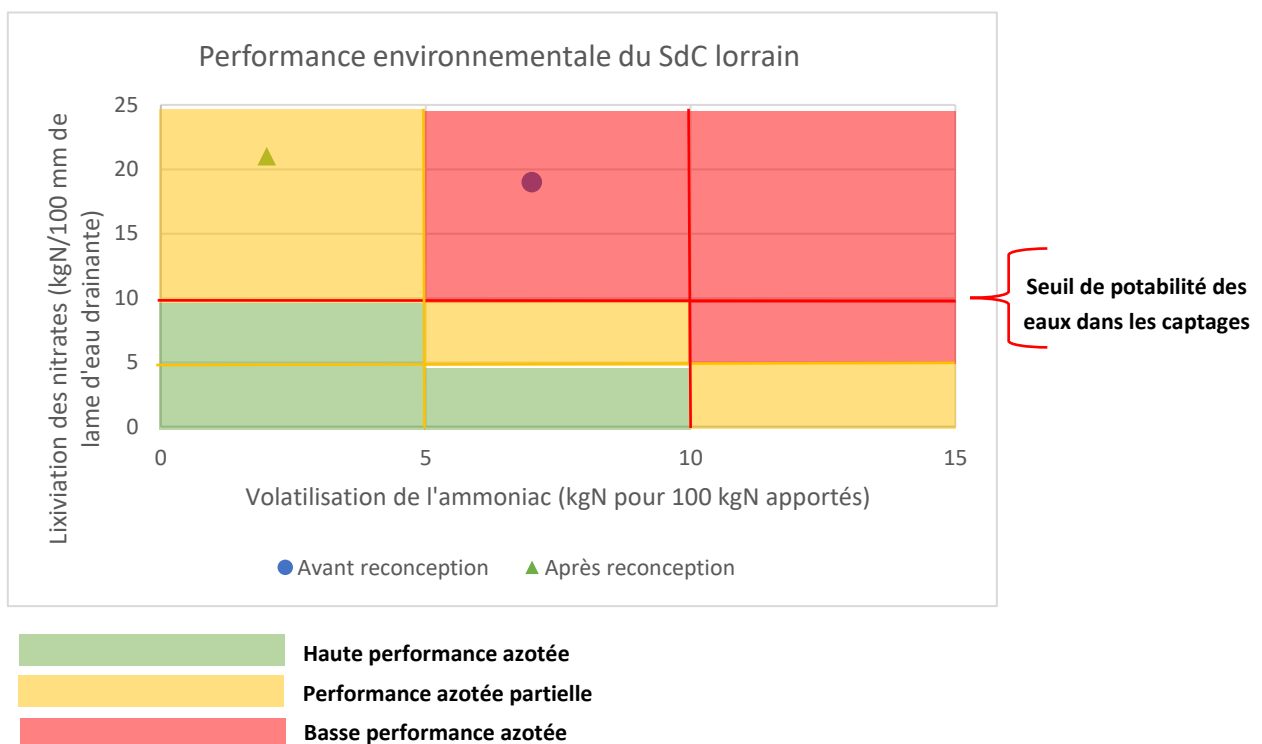


Figure 24 Performance environnementale du SdC lorrain selon l'agrégation des pertes de  $\text{NO}_3^-$  et d' $\text{NH}_3$

L'objectif n'est donc atteint que pour le  $\text{NH}_3$  et la performance azotée globale du système s'avère toujours insuffisante. En effet, même si la performance azotée partielle est atteinte, le seuil de potabilité des eaux dans les captages est largement dépassé, avec une concentration moyenne en  $\text{NO}_3^-$  sous le profil de 92 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$  (Tableau 4 b)).

Si l'on regarde l'évolution de l'autonomie azotée telle que définie dans le paragraphe *Contexte - 5. – Enjeu de la réduction des pertes en termes d'autonomie azotée – p.16*, on peut voir qu'elle augmente légèrement après reconception (Figure 25). En effet, même si la fixation symbiotique diminue légèrement, son rapport à la quantité d'intrants apportée est plus élevé.

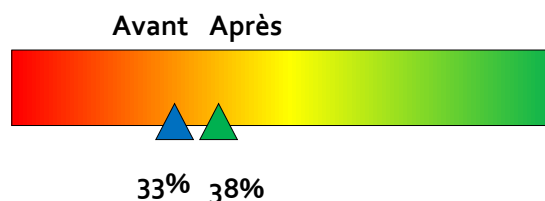


Figure 25 Evolution de l'autonomie azotée du SdC lorrain avant-après reconception

Enfin, la quantification des pertes d'azote permet de les transformer en euros. Etant donné que les agriculteurs se soucient de la performance économique de leur SdC, ceci est intéressant pour sensibiliser les agriculteurs aux pertes, et les inciter à reconcevoir leur SdC. Comme les pertes n'ont pas beaucoup diminué après reconception, la somme perdue ne diminue pas beaucoup non plus (Figure 26). Cependant, si l'on regarde les pertes évitables, on peut voir que le système après reconception a un potentiel de réduction des pertes un peu plus important (+ 2€/ha/an). Ainsi, ce SdC peut potentiellement économiser 30€/ha/an, ce qui revient à économiser 7 444€/an à l'échelle de sa surface totale (246 ha).

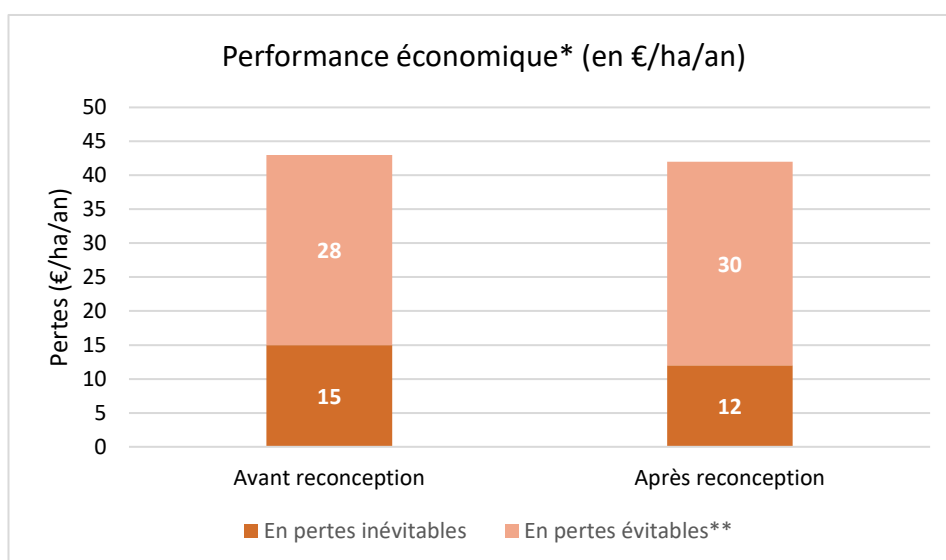


Figure 26 Performance économique du SdC lorrain (avant et après reconception) avec différenciation des pertes évitables et inévitables

Ainsi, des améliorations du SdC après conception sont encore possibles : il va donc maintenant être question d'identifier les hotspots d'émission de  $\text{NO}_3^-$  de la situation après reconception, grâce à la sortie Syst'N® de la dynamique des pertes. Les émissions d' $\text{NH}_3$  ne seront pas étudiées ici puisque sont pratiquement inexistantes.

### 1.2. Identification des « hotspots » d'émission de $\text{NO}_3^-$ après reconception

La Figure 27 donne un aperçu de la dynamique moyenne des pertes de  $\text{NO}_3^-$  sur toute la durée de la simulation, où les hotspots sont observés, à un pas de temps mensuel, et permet de comprendre quand les principales pertes ont lieu, en relation avec le calendrier des cultures successives, des interventions culturales, et de la météorologie. Grâce à la représentation graphique, cinq hotspots



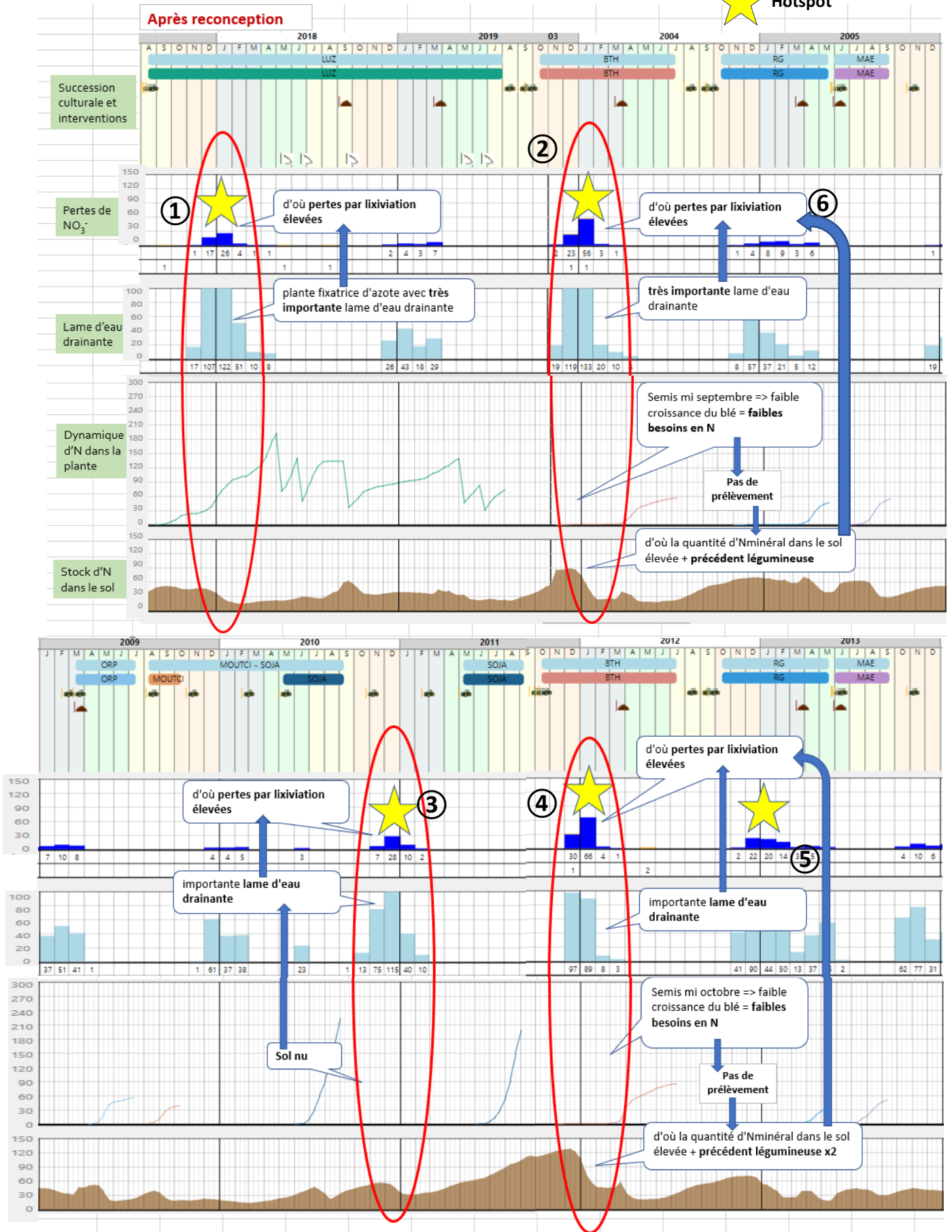


Figure 27 Schéma faisant le lien entre les pertes d'azote par lixiviation et les caractéristiques du SdC lorrain (après reconception)

(étoiles jaunes) sont identifiés à l'échelle de ce SdC après reconception, et sont liés à différentes problématiques :

- la première est la restitution d'un fort reliquat azoté post-légumineuse associé à un semis tardif. Le hotspot le plus important en termes de quantité d'azote lixivié est le ④ et intervient sous blé post-soja à l'automne. On peut en effet voir que le soja (légumineuse cultivée deux années de suite) restitue une quantité importante d'azote dans le sol après sa récolte, et que le blé, en étant semé mi-octobre, bénéficie d'une faible croissance pendant l'automne, ce qui ne lui permet pas de capter l'azote contenu dans le sol. Cet azote, associé à une forte lame d'eau drainante hivernale, se retrouve (en moyenne sur plusieurs années) lixivié à hauteur de 100 kg N/ha pour une lame drainante de 194 mm, soit une concentration de 228 mg NO<sub>3</sub>-/l sous le profil sur la période de décembre à février. Le second hotspot est le ② et intervient une nouvelle fois sous blé, post-luzerne, pour les mêmes raisons, et avec une lame d'eau drainante encore plus conséquente (le mois de décembre est en moyenne le plus pluvieux de l'année en Lorraine), et ce malgré un sol riche en limon et argile (Figure 17)) ;
- la seconde est la lame d'eau drainante. Cette lame d'eau est la principale responsable des pertes du hotspot ①, étant donné que le REH est assez faible (environ 50 kgN/ha) avec l'implantation de la luzerne mi-août.
- la troisième est le sol laissé nu en période d'interculture. Le hotspot ③ intervient en période d'interculture entre les deux sojas tandis que le sol est laissé nu : le stock d'azote minéral du sol (environ 60 kgN/ha) se retrouve lixivié en période hivernale. Enfin, le hotspot ⑤ intervient sous le seigle semé tardivement (mi-octobre) qui n'est alors pas capable de capter l'azote du sol présent en grande quantité en l'absence de couvert d'interculture post-blé. La même configuration se présente à l'endroit ⑥, mais avec des pertes peu élevées du fait d'une lame d'eau drainante plus faible.

### 1.3. Synthèse pluriannuelle à l'échelle de la rotation après reconception

Pour le diagnostic de cette situation, ce sont les années climatiques réelles de Nancy de 2001 à 2020 qui sont considérées. Avec un sol de type argilo-limoneux moyennement profond, cela conduit à une lame d'eau drainante de 230 mm environ, pour une période de drainage étalée de novembre à février. Les REH sont très variables d'une année à l'autre suivant le moment de la rotation, ils passent de 15 kgN/ha lorsqu'un couvert de moutarde est mis en place (e.g. entre orge de printemps et soja) à 130 kg N/ha après récolte du soja précédant un blé.

Les pertes de moyennes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> à la rotation sont de 47 kg N/ha/an et s'étalent de 10 à 100 kg N/ha/an selon l'année de la rotation et dépassent ainsi – compte tenu de la lame d'eau –, largement le seuil de 10 kg N/100 mm (21 kg N/100 mm).

Avec des cultures d'hiver semées tardivement et des cultures de printemps non précédées par une CIPAN (à l'exception d'une CIPAN implantée entre orge et soja sur les 17 années de la rotation), ce SdC présente beaucoup de périodes de sol nu, ce qui ne lui permet donc pas d'intercepter l'azote minéral (provenant de la minéralisation de l'azote organique) du sol à l'automne. L'importante et régulière

quantité d'azote disponible s'explique par (i) des apports organiques réguliers d'effluents organiques depuis de nombreuses années qui ont conduit à un sol aujourd'hui riche en MO (3%) qui minéralise beaucoup, (ii) des cultures précédentes connues pour restituer de l'azote (luzerne et soja) qui n'est ensuite pas suffisamment maîtrisé, et (iii) des apports de digestat systématiques sur toutes les cultures à l'exception du soja.

Concernant les pertes d'ammoniac par volatilisation, qui intervenaient avant reconception au printemps lors de l'épandage des engrais minéraux, elles sont dorénavant quasiment nulles grâce à l'arrêt de l'usage de ces engrais et l'utilisation d'un injecteur à disques pour l'épandage du digestat.

#### 1.4. Identification des pistes pour réussir à avoir de faibles pertes

Après avoir identifié les pratiques à risques, il est possible d'identifier des voies de progrès pour l'amélioration de la gestion de l'azote à l'échelle de la succession culturale. Trois pistes sont identifiées ici :

- La quantité d'azote disponible après la luzerne est supérieure aux besoins du blé en période hivernale : détruire la luzerne en fin d'hiver et semer une culture de printemps (e.g. orge de printemps) permettrait une meilleure valorisation de l'azote ;
- planter des CIPAN même en interculture courte (e.g. entre blé et seigle) si les conditions météorologiques le permettent, afin de capter l'azote minéral du sol et limiter les lixiviations hivernales ;
- supprimer le 2ème soja afin de diminuer la quantité d'azote minéral du sol restitué.

La situation peut être ajustée en tenant compte de ces pistes d'amélioration et être simulée afin de vérifier que le SdC nouvellement proposé permet de conduire à une situation plus performante (et idéalement à haute performance azotée).

## 2. Le SdC champenois

### 2.1. Quantification des flux d'azote : comparaison avant-après reconception

Le bilan des flux d'azote moyens en kgN/ha/an à l'échelle du SdC est présenté dans le Tableau 5, avant et après reconception.

Comme le montrent les Tableaux 5 a) et b). Les entrées moyennes d'azote pour ce SdC sont quasiment identiques avant et après reconception (219 et 217 kgN/ha/an). La reconception a induit une faible baisse d'apports minéraux (-15 kgN/ha/an) et l'a compensée avec une légère augmentation d'apports organiques (+12 kgN/ha/an). Les entrées issues de la fixation biologique de l'azote atmosphérique (pois + CI, cultures associées de légumineuses) représentent 58 kgN/ha/an (Tableau 5 b)) (elles ont diminué de 2 kgN/ha/an par rapport à la situation avant reconception). Les sorties moyennes d'azote à l'échelle du SdC sont identiques avant et après reconception (169 et 170 kgN/ha/an) (Tableau 5 a) et b)).

Tableau 5 Flux moyens d'azote total simulés à l'échelle du SdC champenois sur l'ensemble de la rotation : a) avant reconception, b) après reconception (kgN/ha/an)

### a) Avant reconception

Entrées de N (en kgN/ha/an)				Sorties de N (en kgN/ha/an)	
Fertilisation minérale	149	Bilan apparent (entrées N – sorties N par exportation)	50	Exportations par les récoltes	130
Fertilisation organique	14	Variation du stock d'azote total dans le sol (entrées N – sorties N par exportation – pertes N)	-21	Résidus de récolte, pailles si exportées	39
<b>APPORTS TOTAUX</b>	<b>163</b>	Concentration moyenne en NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> sous le profil (en mg NO <sub>3</sub> /l)	163	<b>SORTIES TOTALES</b>	<b>169</b>
Fixation d'azote	56				
<b>ENTREES TOTALES</b>	<b>219</b>				

Pertes d'azote moyennes annuelles (en kgN/ha/an)		Lame drainante annuelle (en kgN/ha/an)
Ammoniac	10	165
Nitrate	61	
<b>TOTAL</b>	<b>71</b>	

### b) Après reconception

Entrées de N (en kgN/ha/an)				Sorties de N (en kgN/ha/an)	
Fertilisation minérale	133	Bilan apparent (entrées N – sorties N par exportation)	47	Exportations par les récoltes	133
Fertilisation organique	26	Variation du stock d'azote total dans le sol (entrées N – sorties N par exportation – pertes N)	-20	Résidus de récolte, pailles si exportées	37
<b>APPORTS TOTAUX</b>	<b>159</b>	Concentration moyenne en NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> sous le profil (en mg NO <sub>3</sub> /l)	159	<b>SORTIES TOTALES</b>	<b>170</b>
Fixation d'azote	58				
<b>ENTREES TOTALES</b>	<b>217</b>				

Pertes d'azote moyennes annuelles (en kgN/ha/an)		Lame drainante annuelle (en kgN/ha/an)
Ammoniac	8	164
Nitrate	59	
<b>TOTAL</b>	<b>67</b>	

Concernant les pertes moyennes d'azote à l'échelle de la succession culturale étudiée, la situation avant reconception, comme indiqué dans le Tableau 5 a), se caractérise par de faibles pertes d'NH<sub>3</sub> (10 kgN/ha/an) et très élevées en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (61 kgN/ha/an). Après reconception (Tableau 5 b)), les pertes d'NH<sub>3</sub> diminuent très légèrement (8 kgN/ha/an), et les pertes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> restent stables (elles passent de 61 à 59 kgN/ha/an). Lorsque l'on rapporte ces valeurs en pourcentage de la quantité d'azote total apporté pour l'NH<sub>3</sub>, et de la lame d'eau drainante pour le NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, le SdC reste à basse performance azotée après reconception, mais se trouve à la limite de la performance azotée partielle (Figure 29).

L'objectif n'est donc atteint pour le NH<sub>3</sub> ni pour le NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et la performance azotée globale du système s'avère toujours insuffisante. En effet, même si la performance azotée partielle est atteinte, le seuil de potabilité des eaux dans les captages est largement dépassé, avec une concentration moyenne en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sous le profil de 159 mg NO<sub>3</sub>/l (Tableau 5 b)).

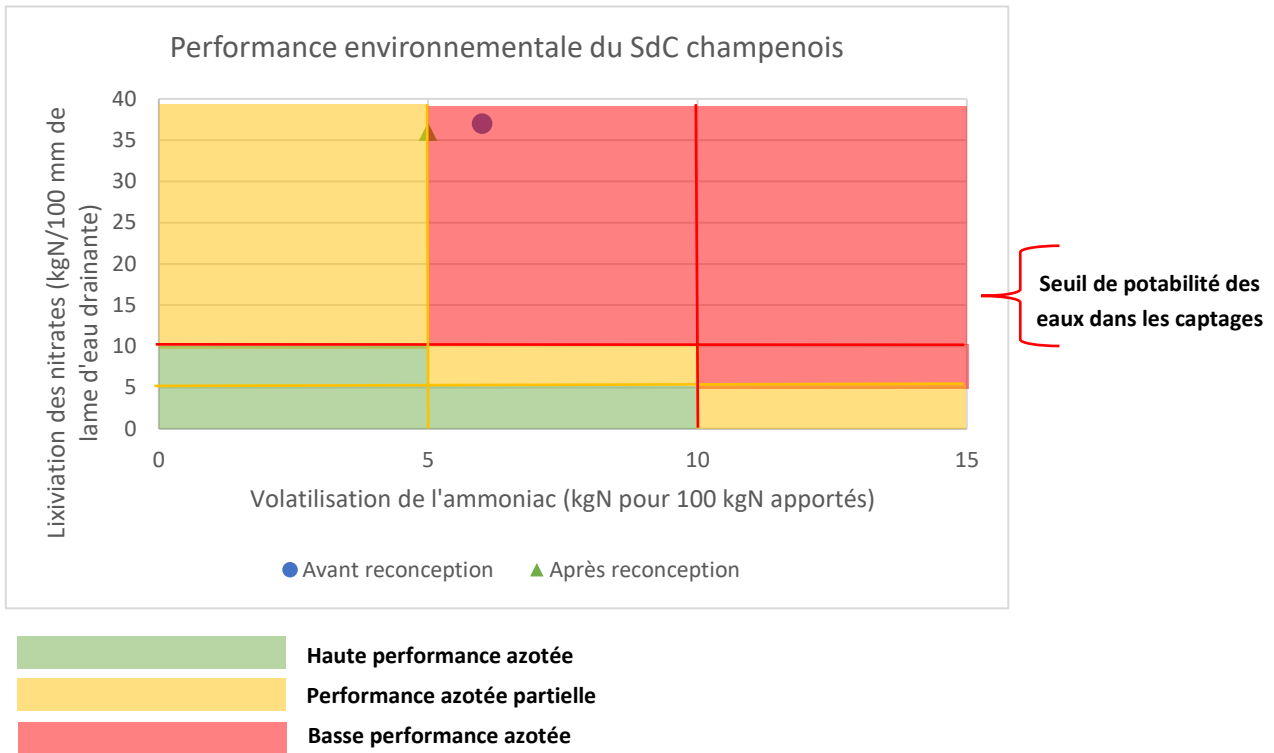


Figure 29 Performance environnementale du SdC champenois selon l'agrégation des pertes de  $\text{NO}_3^-$  et d' $\text{NH}_3$

Si l'on regarde l'évolution de l'autonomie azotée, on peut voir qu'elle augmente légèrement après reconception (Figure 28). En effet, même si la fixation symbiotique diminue légèrement, son rapport à la quantité d'intrants apportée est plus élevé.

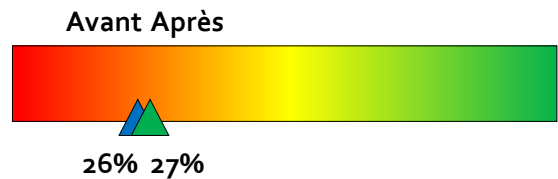


Figure 28 Evolution de l'autonomie azotée du SdC champenois avant-après reconception

Concernant la performance économique, et comme les pertes n'ont pas beaucoup diminué après reconception (comme pour le SdC lorrain), la somme perdue ne diminue pas beaucoup non plus (Figure 30). Si l'on

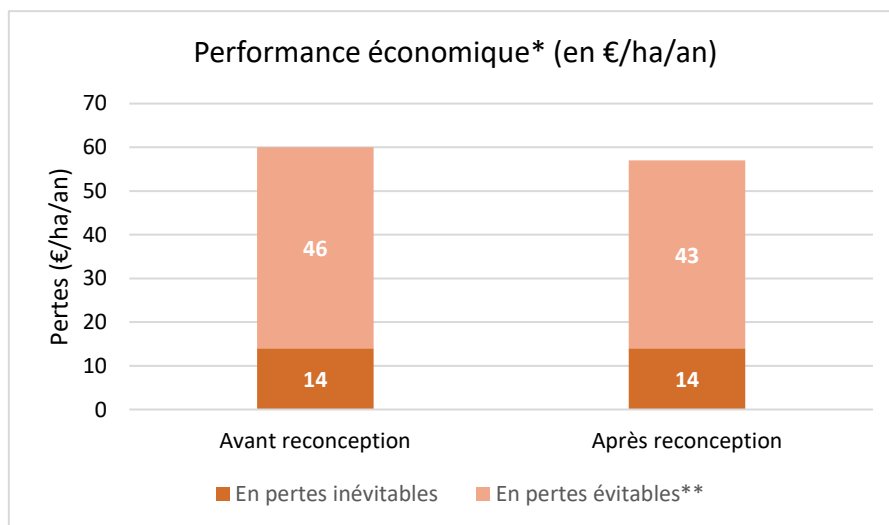


Figure 30 Performance économique du SdC lorrain (avant et après reconception) avec différenciation des pertes évitables et inévitables

regarde des pertes évitables après reconception, on peut voir que le SdC peut potentiellement encore économiser 43€/ha/an, ce qui revient à économiser 11 309€/an à l'échelle de sa surface totale (263 ha).

De la même manière que le SdC lorrain, des améliorations du SdC après conception sont encore possibles : il va donc maintenant être question d'identifier les hotspots d'émission de  $\text{NH}_3$  et  $\text{NO}_3^-$  et de la situation après reconception.

## 2.2. Identification des « hotspots » d'émission après reconception

### 2.2.1. Emissions de $\text{NH}_3$

La Figure 31 donne un aperçu de la dynamique moyenne des pertes moyennes d' $\text{NH}_3$  sur la durée de la simulation où les hotspots sont observés. Deux hotspots sont identifiés sur cette portion du SdC après reconception et reproduisent à l'identique sur la suite de la succession culture :

- Le hotspot ① intervient lors du 2<sup>ème</sup> apport d'engrais minéral sur colza associé à du trèfle blanc. La forme d'engrais apportée (solution azotée) et la dose (120 unités), associées à un pH du sol très élevé, sont responsables de ces pertes par volatilisation ;
- le hotspot ② intervient lors du 3<sup>ème</sup> apport d'engrais minéral sur blé, pour les mêmes raisons que le hotspot ① sur colza.

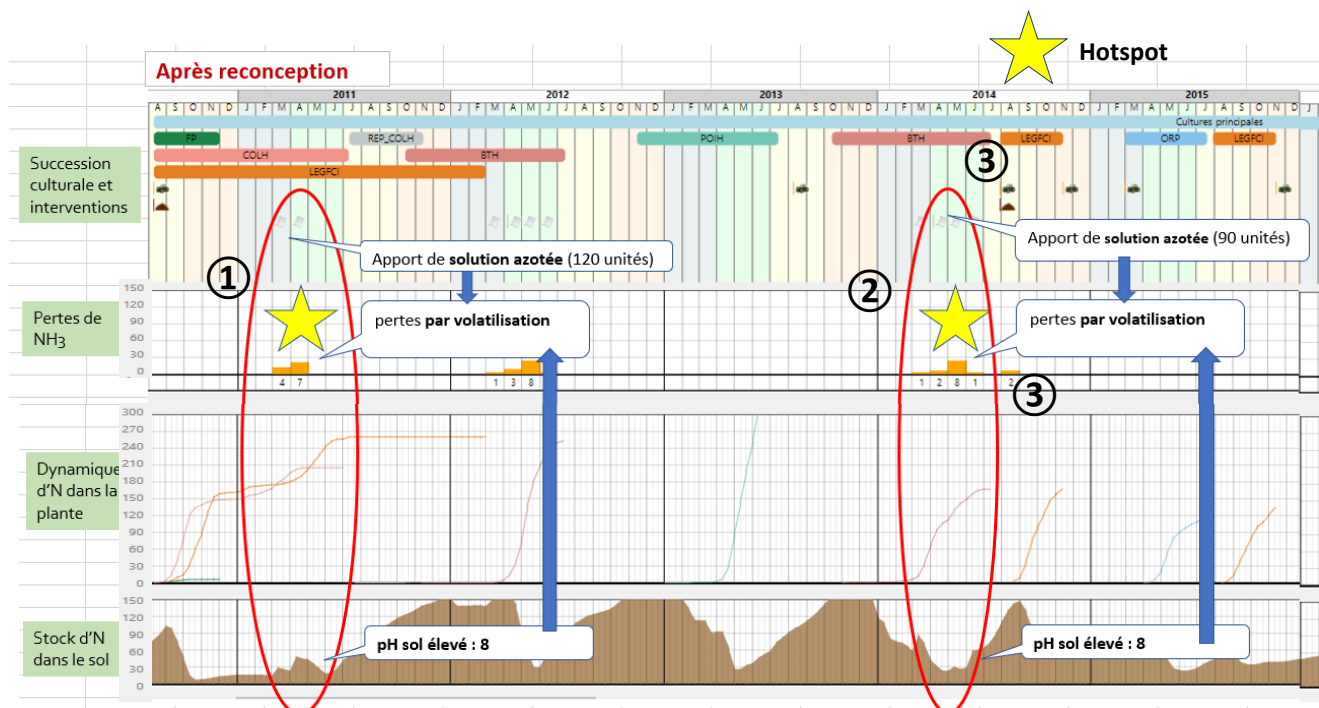


Figure 31 Schéma faisant le lien entre les pertes d'azote par volatilisation et les caractéristiques du SdC champenois (après reconception)

### 2.2.2. Emissions de $\text{NO}_3^-$

La Figure 32 donne un aperçu de la dynamique moyenne des pertes de  $\text{NO}_3^-$  sur la durée de la simulation où les hotspots sont observés. Trois hotspots sont identifiés, en début de rotation, à

l'échelle de ce SdC après reconception, et sont tous liés à la problématique de la restitution d'un fort reliquat azoté post-légumineuse associé à un semis tardif :

- Le hotspot le plus important en termes de quantité d'azote lixivié est le ③ et intervient sous blé post-pois en hiver. On peut en effet voir que le pois (légumineuse) restitue une quantité importante d'azote dans le sol après sa récolte (le REH est supérieur à 150 kgN/ha), et que le blé, en étant semé mi-octobre, bénéficie d'une faible croissance pendant l'automne, ce qui ne lui permet pas de capter l'azote contenu dans le sol. Cet azote, associé à une lame d'eau drainante non négligeable et constante tout au long de l'hiver, se retrouve (en moyenne sur plusieurs années) lixivié à hauteur de 161 kg N/ha pour une lame drainante de 197 mm, soit

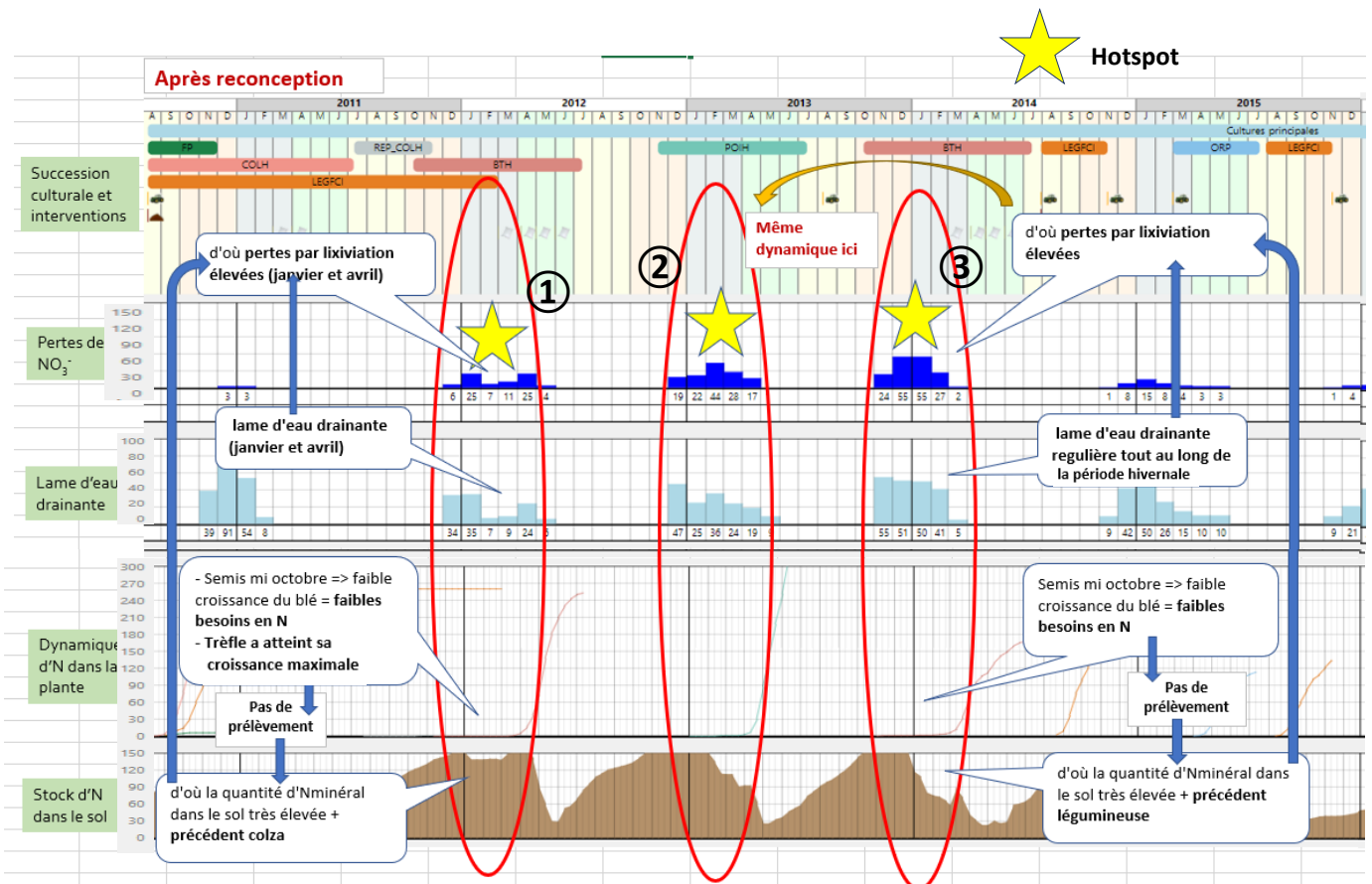


Figure 32 Schéma faisant le lien entre les pertes d'azote par lixiviation et les caractéristiques du SdC champenois (après reconception)

une concentration de 362 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l sous le profil sur la période de novembre à février ;

- le hotspot ② est un peu plus faible du fait de la lame d'eau moins importante, mais intervient pour les mêmes raisons : le blé associé à une légumineuse restitue une quantité importante d'azote dans le sol après sa récolte (le REH est supérieur à 150 kgN/ha). Le pois d'hiver, en étant semé mi-novembre, bénéficie d'une faible croissance pendant l'automne, ce qui ne lui permet pas de capter l'azote contenu dans le sol. Cet azote, toujours associé à une lame d'eau drainante constante, se retrouve lixivié de manière non négligeable ;



- le hotspot ③, un peu plus faible que les deux autres, intervient en janvier et avril, en même temps que les pics de lame d'eau drainante. Le blé, en étant semé mi-octobre, bénéficie d'une faible croissance pendant l'automne, ce qui ne lui permet pas de capter le fort REH d'environ 130 kgN/ha qui succède à la récolte du colza, culture qui restitue beaucoup d'azote au sol. Bien que le blé soit implanté dans un couvert de trèfle, celui-ci étant en place depuis un an, il a atteint sa croissance maximale et n'est donc pas en mesure de capter l'azote minéral du sol. Cet azote est donc lixivié.

### 2.3. Synthèse pluriannuelle à l'échelle de la rotation après reconception

Pour le diagnostic de cette situation, ce sont les années climatiques réelles de Fagnières de 2000 à 2019 qui sont considérées. Avec un sol de type limono-argileux sur craie moyennement profond, cela conduit à une lame d'eau drainante de 165 mm environ, pour une période de drainage étalée de novembre à février. Les REH sont très variables d'une année à l'autre suivant le moment de la rotation. Ils passent de 15-30 kgN/ha/an lorsque les CI de légumineuses sont mises en place avant les cultures de printemps, à plus de 150 kg N/ha/an, en début de rotation, avec une succession de trois cultures qui restituent beaucoup d'azote au sol : colza – blé associé à une légumineuse – pois d'hiver. Ainsi, l'insertion de légumineuses dans ce système augmente le risque de pertes par lixiviation.

Les pertes moyennes de  $\text{NO}_3^-$  à la rotation sont de 53 kg N/ha/an et s'étalent de 10 à 165 kg N/ha/an selon l'année de la rotation et dépassent ainsi – compte tenu de la lame d'eau –, largement le seuil de 10 kg N/100 mm (37 kg N/100 mm).

Les cultures d'hiver semées tardivement ne sont pas capables de capter la forte quantité d'azote minéral. Celle-ci s'explique par (i) les légumineuses qui en restituent beaucoup, (ii) des intercultures en début de rotation laissées nues (il n'y a pas de CIPAN entre le blé et le pois d'hiver, et le pois d'hiver et le blé), et (iii) l'intensivité en intrants du SdC en ce début de rotation. En effet, bien que le semis du colza soit associé à une légumineuse, trois tonnes de compost de lisier de porc est apporté au même moment, puis reçoit 210 unités d'azote minéral en fin d'hiver/début de printemps. Ensuite, les 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> blé qui succèdent respectivement à un colza et un pois d'hiver, reçoivent 220 unités d'azote minéral. Ainsi, cela explique pourquoi les pertes par lixiviation sont conséquentes les trois premières années de la rotation lors de la période hivernale de drainage.

La suite de la rotation (Figure 20), décrit une suite de deux cultures de printemps (orge de printemps et lin de printemps), toutes deux précédées par une CIPAN détruit assez tardivement (mi-novembre), ce qui limite la lixiviation hivernale par sa capacité à absorber l'azote du sol. Ensuite, la succession betterave-blé permet de laisser le sol couvert entre ces deux cultures (récolte de la betterave fin octobre et semis du blé dans les jours qui suivent après un travail de sol). Même si le blé est semé tardivement, la betterave a absorbé presque l'intégralité de l'azote contenu dans le sol et en restitue peu. Enfin, la succession de fin de rotation blé-CIPAN-orge d'hiver semé dans le CIPAN, constitue un ensemble favorable. En effet, implanter une CIPAN en interculture courte aussitôt la récolte du blé, tout en semant l'orge d'hiver fin septembre dans ce couvert, jusqu'à la destruction de celui-ci par le gel en début d'hiver, permet une absorption de l'azote du sol efficace et laisse un REH faible pour l'orge d'hiver, dont les besoins en azote démarrent au printemps.



Concernant les pertes ammoniacales, c'est l'utilisation de solution azotée en périodes printanière et estivale, associé à un pH élevé de 8, qui les provoquent. Sur le début de la rotation, comme vu sur la Figure 31, il est possible de se demander si l'apport d'azote minéral en ① sur colza est nécessaire. En effet, son association à une légumineuse fait que sa quantité d'azote est déjà très élevée au moment de l'apport (210 kgN/ha), et à son maximum puisqu'elle reste stable même après l'apport.

Les apports organiques, tous enfouis immédiatement par un travail de sol, induisent de faibles pertes par volatilisation (voir ③ sur la Figure 31).

#### 2.4. Identification des pistes pour réussir à avoir de faibles pertes

Après avoir identifié les pratiques à risques, il est possible d'identifier des voies de progrès pour l'amélioration de la gestion de l'azote à l'échelle de la succession culturale. Quatre pistes sont identifiées ici :

- Supprimer les apports d'engrais minéraux sur colza qui ne paraissent pas nécessaire : cela permettrait d'améliorer aussi l'autonomie azotée du SdC ;
- privilégier l'utilisation de la forme ammonitrate pour les apports azotés sur blés afin de réduire les pertes par volatilisation ;
- planter une CIPAN (e.g. moutarde) dans l'interculture assez longue entre blé et pois d'hiver (de mi-juillet à mi-novembre), afin de capter une partie de l'azote minéral du sol et limiter les lixiviations hivernales ;
- planter une CIPAN (e.g. moutarde) dans l'interculture courte entre pois d'hiver et blé, et la laisser en place jusqu'à sa destruction par le gel en hiver, afin de capter une partie de l'azote minéral du sol et limiter les lixiviations hivernales (sur le même modèle favorable « blé-CIPAN-orge d'hiver semé dans le CIPAN » en fin de rotation).

De la même manière que pour le SdC lorrain, la situation peut être ajustée en tenant compte de ces pistes d'amélioration et être simulée afin de vérifier que le SdC nouvellement proposé permet de conduire à une situation plus performante (et idéalement à haute performance azotée).

### 3. Communication des résultats

L'objectif d'une évaluation est de simplifier une réalité complexe afin de gagner en analyse et en lisibilité. En effet, un agriculteur n'a pas nécessairement le même point de vue qu'une administration ou qu'un citoyen. Il s'agit donc de trouver le juste compromis entre la volonté de représenter au mieux la diversité des préoccupations en jeu et une nécessaire simplification de ce qui est évalué (Lairez et al., 2015).

Ainsi, les résultats des évaluations Syst'N® sont présentés sous la forme d'une « fiche d'identité » individualisée par exploitation étudiée (**Voir – Annexe 6 Exemple d'une fiche d'identité – p.60**). La fiche d'identité présente : (i) le contexte dans lequel se situe le SdC, (ii) la rotation des SdC avant et après reconception (ou du SdC initial) et son ITK, (iii) la représentation quantifiée des flux d'azote dans le système sol-plante-eau-atmosphère, (iv) la synthèse de la performance azotée en termes de pertes d'azote avec une conversion en euros et impact carbone, (v) des indicateurs d'autonomie azotée et (vi) quelques pistes d'amélioration. Elle a donc pour but de sensibiliser les agriculteurs aux pertes

d'azote dans les SdC et à la possibilité de les diminuer. De plus, ces fiches serviront de support aux discussions autour de l'évolution des pratiques puisqu'elles seront présentées et discutées lors des réunions de groupe hivernales d'agriculteurs animées par les conseillers départementaux.

### 1. Points forts des résultats

La modélisation des flux d'azote avec Syst'N® dans les deux SdC a permis ici de montrer que :

- le passage en AB (SdC lorrain) permet de diminuer significativement les pertes ammoniacales au vu du risque potentiel de volatilisation élevé (d'autant plus élevé lorsque le pH est supérieur à 7,5) de la plupart des engrais minéraux (urée et solution azotée) ; à condition que les apports d'engrais organiques soient réalisés dans les bonnes conditions (utilisation d'un injecteur ou enfouissement après l'apport par un travail du sol) ;
- pour le SdC lorrain, bien que le passage en AB ait été accompagné d'une diminution des entrées d'azote, les pertes de  $\text{NO}_3^-$  n'ont pas diminué. Cela montre que le pilotage de la fertilisation seul ne permet pas d'améliorer les performances azotées en termes de pertes d'azote, et que la prise en compte de l'échelle pluriannuelle est primordiale. Il a en effet été remarqué, grâce à Syst'N®, que les périodes de sol nu (entre la récolte de la culture d'hiver et le semis de la culture de printemps ; le semis tardif des cultures d'hiver) dans les moments où l'azote est susceptible d'être lixivié (e.g. post-légumineuse), potentiellement contraintes par un travail du sol plus ou moins intensif pour lutter contre les adventices, sont responsables de ces pertes.
- le SdC champenois, bien qu'engagé dans une démarche d'amélioration de l'autonomie azotée, par l'insertion de légumineuses aussi bien en CP qu'en CI, ne va pas au bout de la démarche puisque ne diminue pas les entrées exogènes, notamment les apports d'engrais minéraux (avant reconception comme après reconception). Le choix est fait après reconception, de modifier l'ordre de la succession culturale après les trois premières années de la rotation. Cependant, la simulation après reconception montre que les hotspots interviennent durant les premières années de la rotation, d'où l'intérêt de la simulation Syst'N® pour identifier quel morceau de rotation est à retravailler.

Ainsi, face aux limites des outils basés sur les bilans annuels, Syst'N® ouvre des pistes pour le renouvellement des démarches de diagnostic des pertes d'azote, ainsi que de nouveaux indicateurs (e.g. autonomie azotée, impact économique des pertes d'azote) utilisables dans les évaluations multicritères des SdC. De plus, les résultats d'identification des hotspots et de leurs déterminants tels que présentés sont ainsi un support pour la reconception de SdC plus performants en termes de pertes d'azote.

Enfin, la reconception *a priori* (sans diagnostic Syst'N®) n'est pas la méthode à privilégier : on voit pour ces deux SdC étudiés que les pertes n'ont pas diminué dans les situations après reconception. Il est donc préférable d'utiliser Syst'N® comme appui à la reconception.

## 2. Discussion

### 2.1. Limites du logiciel Syst'N®

Tout d'abord, Syst'N® présente certaines limites au niveau de ses données d'entrées. Premièrement, le panel de cultures paramétrées est trop restreint par rapport à la diversité des CP et CI dans les SdC évalués. La méthanisation étant en expansion dans le Grand Est (47 unités ont été mises en fonctionnement en 2020), les SdC intègrent de plus en plus de CIVE (dont le seigle et le sorgho qui ont un fort pouvoir méthanogène) dans leurs rotations afin d'approvisionner les digesteurs, et ces cultures ne sont pas paramétrées dans l'outil. Les paramétrages sont également indisponibles pour un grand nombre d'espèces de couverts végétaux. Dans ces conditions, les cultures non décrites dans Syst'N® doivent être remplacées par une autre culture au comportement d'absorption et de croissance voisin, ce qui accroît les incertitudes dans l'activité de diagnostic. Deuxièmement, la base de données de composition des PRO présente une limite concernant les digestats. Il est uniquement possible de sélectionner un digestat générique pour chaque type : « digestat brut », « digestat solide », ou « digestat liquide », tandis que ceux-ci présentent une certaine variabilité liée aux matières entrantes dans le digesteur. En outre, il est possible de modifier manuellement les paramètres de composition, mais des analyses d'effluent ne sont pas toujours disponibles.

Ensuite, Syst'N® s'appuie sur une modélisation des flux d'azote se limitant à la zone racinaire. Il estime quelle quantité d'azote est sortie de l'agrosystème et ne permet pas d'évaluer ces transferts au-delà. Par conséquent, il n'est pas suffisant pour faire un pronostic de l'impact environnemental de ces fuites d'azote sur la qualité de l'eau d'une nappe. Il permet seulement d'estimer la lixiviation des  $\text{NO}_3^-$  au-delà de la limite basse des racines (RMT Bouclage, 2013). La teneur en  $\text{NO}_3^-$  des aquifères ou des cours d'eau dépend également de (i) la disposition du SdC au sein du bassin versant ou du paysage, (ii) l'existence éventuelle de zones faiblement émettrices diluant la teneur en  $\text{NO}_3^-$  (prairies naturelles, bandes enherbées, forêts), et (iii) la taille du réservoir récepteur des flux de  $\text{NO}_3^-$  et son temps de renouvellement (Beaudoin et al., 2005). Si l'on souhaite effectuer un diagnostic un peu plus large à l'échelle du bassin versant, le diagnostic Syst'N® peut-être associé à un diagnostic Territ'eau, outil ayant pour objectif de mieux maîtriser les pollutions diffuses agricoles dans les bassins versants de taille moyenne. A partir d'une estimation de la lixiviation à l'échelle de la parcelle intégrée sur la durée de la rotation, modulée par les effets tampons présents à l'échelle du bassin versant, son module azote estime par une « note nitrate » l'émission de  $\text{NO}_3^-$  vers les eaux (Massa et al., 2008).

### 2.2. Limites de la méthode d'évaluation des pertes

#### 2.2.1. Utilisation d'une méthode d'évaluation existante

L'utilisation d'une méthode existante (méthode développée par le projet Agro-Eco-Syst'N) pour l'évaluation des pertes permet un gain de temps et offre un accès à de nombreuses études menées dans des contextes différents, en plus de donner une légitimité à la méthode employée. Cependant, par l'utilisation de seuils de pertes « généraux » par exemple, les enjeux locaux sont moins considérés. Néanmoins, au vu du nombre d'exploitations à étudier (49) et de l'étendue de la région d'étude, il paraissait difficile d'établir des seuils pertinents pour chaque exploitation ou groupe d'exploitations. Par la suite, il est possible d'envisager des modélisations de « cas-types » de SdC lorrains et

champenois afin d'obtenir des références et de confronter les SdC étudiés aux cas-types, tout en permettant aux agriculteurs et conseillers de discuter ensemble de ces seuils.

### 2.2.2. Données d'entrée pédoclimatiques utilisées

Tout d'abord, des analyses de sol n'étant pas toujours disponibles pour chaque SdC, la base de données « sols » de Syst'N est sollicitée. La sélection du type de sol est alors conditionnée par des caractéristiques assez générales fournies par le conseiller : la profondeur (superficielle < 40 cm, moyenne 40 à 80 cm, et profonde > 80 cm), la pierrosité (non caillouteux < 5%, peu caillouteux 5 à 15%, caillouteux > 15%, et le taux de calcaire (non calcaire 0 à 5%, calcaire > 5%). En fonction des caractéristiques sélectionnées et de la région dans laquelle est localisée le SdC, une liste plus ou moins riche de types de sol apparaît et il faut alors sélectionner le plus pertinent, toujours en concertation avec le conseiller.

Afin d'étudier la sensibilité des pertes d'azote simulées aux données d'entrée sol, un test a été effectué avec un SdC pour lequel une analyse de sol complète était disponible. Ainsi, le même SdC a été simulé à deux reprises avec (i) les données d'entrées sol complétées à partir de l'analyse et (ii) le type de sol sélectionné à partir de la base de données. Le Tableau 6 présente le résultat de ce test de sensibilité. On peut voir que la simulation effectuée avec le sol de la base de données (sol argilo-limoneux à pH = 6) surestime les pertes : elles sont de 36 kg N/ha/an alors qu'elles sont de 10 kg N/ha/an avec les caractéristiques du sol mesurées au champ (sol argileux à pH = 8). On en déduit que les pertes d'azote par lixiviation sont sensibles à la granulométrie (les pertes diminuent quand le taux d'argile augmente). Si l'on rapporte ces valeurs à 100 mm de lame d'eau drainante, on trouve également un écart important : 17 kgN/100 mm d'eau (base de données) contre 9 kgN/100 mm d'eau (analyse). En effet, la lame d'eau est deux fois plus importante quand simulée avec le sol de la base de données, tandis que les pertes sont trois fois plus conséquentes. Concernant les pertes par volatilisation, elles sont un peu plus élevées pour la simulation avec le sol de l'analyse (8 contre 6% des apports totaux, dues au pH plus élevé), mais la différence est moins significative que celle des pertes par lixiviation. On vérifie alors que les pertes d'azote par volatilisation sont sensibles au pH (elles augmentent quand le pH augmente). Après agrégation de ces deux types de pertes, la performance azotée est différente selon le type de sol renseigné : elle est basse pour le sol de la base de données et partielle pour le sol issu de l'analyse. Ce test met en évidence que les données d'entrée sol sont primordiales pour une évaluation au plus juste du contexte et donc montre l'intérêt de mobiliser des analyses de sol spécifiques aux SdC étudiés pour simuler les pertes d'azote. Néanmoins, comparer les situations avant/après reconception avec des pertes relatives diminue le risque de se tromper car les deux systèmes vont suivre la même dynamique.

Tableau 6 Test de sensibilité des pertes d'azote simulées aux données d'entrée sol

	Lame drainante annuelle (mm d'eau/an)	Lixiviation (kg N/ha/an)	Pertes d'azote sous forme de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> pour 100 mm de lame d'eau drainante	Volatilisation (kg N/ha/an)	Pertes d'azote sous forme d'NH <sub>3</sub> en % des apports totaux	Performance azotée
<b>Base de données</b>	208	36	<b>17</b>	13	<b>6</b>	<b>Basse</b>
<b>Analyse</b>	106	10	<b>9</b>	17	<b>8</b>	<b>Partielle</b>

Avec : (i) **base de données** : sol argilo-limoneux, pH = 6 (ii) **analyse** : sol argileux, pH = 8.

Le résultat de ce test a été exposé aux conseillers lors d'une réunion afin de les encourager à effectuer des analyses de sol sur les exploitations, mais cela n'a pas encore été réalisé entièrement.

Ensuite, les données de deux stations climatiques uniquement sont utilisées pour couvrir d'une part, la région Lorraine, et d'autre part, la région Champagne-Ardenne. Ainsi, les résultats des simulations dont les SdC sont les plus éloignés de leur station attribuée présentent probablement certains biais.

### *2.2.3. Evaluation de la performance environnementale*

D'une part, les seuils définis par le projet Agro-Eco-Syst'N sont particulièrement exigeants. Il est en effet très difficile d'atteindre ce qui a été défini comme « haute performance azotée ». En effet, au-delà des pratiques à mobiliser afin de diminuer les impacts, les conditions météorologiques ne sont pas maîtrisables et ont un effet sur les pertes. D'autre part, une fois que les seuils les plus élevés sont dépassés, la performance azotée est considérée comme basse, mais le niveau de dépassement n'est pas pris en compte.

### *2.2.4. Prédiction du modèle*

Etant donné que le choix a été fait d'évaluer des ITK moyens, il n'a pas été possible de valider la prédiction du modèle par des mesures de reliquats azotés. En effet, la valeur d'un reliquat est pertinente quand elle est associée à un ITK réel. De plus, il n'a pas non plus été possible d'effectuer des mesures réelles de pertes. Cette limite, ainsi que celle de la simulation des ITK moyens, est prise en compte et relativisée par le fait que Syst'N® est avant tout utilisé à vocation pédagogique, dans l'objectif de sensibiliser les agriculteurs et de leur apporter des références (aux conseillers également) afin de les orienter vers des changements de système.

## 3. Eléments de réflexion

### 3.1. Optimisation de la fertilisation azotée à l'échelle de la culture

A l'échelle de la culture et non plus du SdC, la synchronisation des apports azotés avec les besoins de la plante permet de limiter les pertes d'azote et ainsi rendre la fertilisation azotée plus efficace. Cela consiste à trouver le bon équilibre entre les besoins de la plante, les conditions météorologiques, et les quantités d'azote apportées. Par exemple, le pilotage de l'azote sur blé par la « méthode INN » a pour but de réaliser des apports d'azote les plus efficaces possibles pour le blé en ayant un suivi dynamique de son état de nutrition via son INN (Indice de Nutrition Azotée). Ce suivi est réalisé par des mesures au champ grâce à un capteur de chlorophylle (N'tester®). Si l'INN mesuré est sous le « seuil critique », alors un apport est réalisé si une pluie supérieure à 15 mm est annoncée dans les trois jours, et si aucun apport n'a eu lieu dans les 15 jours précédents. La quantité d'azote à apporter est préconisée selon des abaques par date (l'INN mesuré couplé à la date de mesure définit une certaine dose d'azote à apporter). Dans le cadre du PEI PARTAGE, un réseau d'expérimentation des CDA du Grand Est s'est structuré autour du pilotage de la fertilisation azotée du blé avec cette méthode.

De plus, l'azote est plus efficace lorsque l'alimentation des plantes n'est pas limitée en phosphore, potassium, magnésium ou soufre. L'interaction positive entre l'azote et ces éléments permet d'atteindre le rendement optimum en utilisant moins d'azote (UNIFA, 2017).

### 3.2. Optimisation de la fertilisation azotée à l'échelle du territoire et couplage polyculture-élevage

L'approche territoriale est également à considérer. En effet, des échanges entre céréaliers et éleveurs spécialisés (e.g. échanges paille/fumier) au sein du territoire (considéré ici comme étant la région Grand Est) est à encourager afin d'assurer une meilleure répartition des effluents d'élevage et réduire le besoin d'engrais minéraux (Peyraud et al., 2020). Pour cela, l'autonomie du SdC en azote provenant du territoire (pour les céréaliers ou polyculteurs-éleveurs) et la participation de l'exploitation à l'autonomie azotée du territoire (pour les éleveurs ou polyculteurs-éleveurs) peuvent être calculées. Il sera ainsi possible d'identifier les biens et les besoins de chaque exploitation.

Néanmoins, cette réflexion à l'échelle territoriale peut s'opposer à celle de l'échelle du SdC. Par exemple, dans une réflexion « territoriale », un céréalier peut exporter les pailles afin de les échanger avec le fumier d'un éleveur voisin. En revanche, dans une réflexion « SdC », ce même céréalier peut vouloir restituer les pailles au sol afin de réduire les pertes d'azote. Il y a donc un équilibre à trouver pour optimiser à la fois la fertilisation azotée à l'échelle du territoire et du SdC.

Par ailleurs, il est possible d'envisager, à la fin du PEI PARTAGE, une suite couplée au PEI ARPEEGE<sup>9</sup> (Autonomie en Ressources Protéiques et Energétiques des Elevages du Grand Est), également en cours. Un des axes de travail de ce PEI étant l'accompagnement et la mise en place de nouvelles coopérations entre céréaliers et éleveurs, il sera possible d'utiliser les ressources produites afin d'améliorer l'autonomie azotée territoriale dans sa globalité.

## 4. Perspectives

### 4.1. Suite de l'étude

Les fiches d'identité de synthèse produites pour chaque exploitation ainsi que l'identification des hotspots dans les rotations avec l'explication de leurs déterminants, seront présentées et expliquées lors des réunions hivernales entre chaque groupe d'agriculteurs et conseiller prévues en cette fin d'année. Le discours sera également appuyé par la quantification des pertes économiques liées aux pertes azotées, tout en montrant quelle part de ces pertes est évitable. L'objectif sera d'utiliser ces ressources pour alimenter les discussions entre les agriculteurs, afin qu'ils proposent eux-mêmes des pistes d'amélioration. Cela permettra de poursuivre la démarche de co-conception, avec cette-fois-ci l'appui chiffré et visuel des moments critiques de pertes fourni par Syst'N<sup>®</sup>. Les résultats obtenus sont aussi un moyen de faire discuter de sujets en lien avec l'environnement (au-delà des chiffres obtenus et de la performance associée).

---

<sup>9</sup> Pour plus d'informations : [https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Grand-Est/049\\_Inst-Acal/RUBR-agro-environnement/Autonomie\\_proteines/ARPEEGE-plaquette\\_vf.pdf](https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/049_Inst-Acal/RUBR-agro-environnement/Autonomie_proteines/ARPEEGE-plaquette_vf.pdf)

Plus tard, il serait pertinent de travailler avec les ITK réels des dernières années, et de les simuler en confrontation avec les quelques mesures de reliquats qui ont été réalisées. Cela permettrait de valider la prédiction du modèle (au moins pour la simulation de l'azote minéral du sol).

#### 4.2. Pertes d'azote et bilan carbone

La méthode « grandes cultures » du label bas-carbone venant d'être officiellement approuvée par le ministère de la transition écologique, il est de l'intérêt des exploitations agricoles de limiter leurs émissions de GES. En effet, cela leur offre la possibilité de produire des crédits carbone et de disposer ainsi d'une nouvelle perspective de valorisation de leurs efforts de transition. Comme vu précédemment, le poste « engrais » représente environ 70% des émissions de GES des exploitations de type COP. Ainsi, par exemple, une diminution des pertes de  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_3$  de 10 kgN/ha/an permet d'éviter l'émission de 12 600 kg éq.  $\text{CO}_2$ <sup>10</sup> à l'échelle du SdC (cela prend uniquement en compte la diminution des pertes et pas les autres effets de la rotation), d'où l'intérêt de sensibiliser les agriculteurs à la question des pertes d'azote. De plus, afin qu'ils se rendent compte de ce la quantité en kg éq. $\text{CO}_2$  représente, celle-ci est convertie en nombre de kilomètres parcourus en voiture (sur la base d'une voiture diesel consommant 7l/100 km).

#### 5. De la simulation à l'évaluation au champ des performances azotées

Afin de s'assurer de la pertinence des données de sortie, une autre façon de valider la prédiction du modèle Syst'N® pourrait être de les confronter aux données de sortie issues des mêmes simulations, réalisées avec d'autres logiciels (par exemple STICS pour les pertes par lixiviation, Volt'air pour les pertes par volatilisation).

Les pistes d'amélioration proposées à l'issue de la démarche d'évaluation et des réunions hivernales doivent être – parallèlement à l'élaboration d'une nouvelle simulation les incluant –, testées au champ, accompagnées de mesures de reliquats et d'absorption d'azote par les plantes. Ajoutées à la nouvelle simulation, ces mesures permettront de valider de manière effective l'efficacité de la démarche pour la réduction des pertes d'azote basée sur Syst'N®.

---

<sup>10</sup> 1 uN = 12,6 kg éq.  $\text{CO}_2$



## Conclusion

Les interfaces pédagogiques en sortie de l'outil, qui relient la succession et les interventions culturales aux dynamiques de pertes d'azote, et à celles d'azote contenu dans la plante et dans le sol simultanément, permettent d'identifier les pratiques et combinaisons de pratiques à risque induisant les phénomènes de lixiviation et volatilisation.

Parmi les deux SdC étudiés, la démarche d'évaluation présentée a permis de mettre en évidence l'impact positif du passage en AB sur les pertes d'azote par volatilisation, qui sont moindres lorsqu'il n'y a pas de recours aux engrais minéraux. La dynamique des pertes par lixiviation s'est quant à elle révélée être un peu plus complexe. En effet, en agriculture biologique, les stratégies pour obtenir une bonne alimentation azotée des cultures en l'absence d'engrais azotés de synthèse consistent souvent à (i) développer la fourniture d'azote par la minéralisation via des apports organiques, et (ii) à avoir une faible fréquence de piégeage de l'azote en été et en automne dans la rotation, car cette période est utilisée pour les travaux du sol utiles à la maîtrise des adventices. En agriculture conventionnelle, avec une rotation diversifiée, l'insertion de légumineuses en CP, si non synchronisée avec des apports exogènes réduits et des CI et cultures suivantes en mesure de capter l'azote restitué, le SdC présente de forts risques de pertes par lixiviation. Les effets précédents et suivants ainsi démontrés soulignent l'importance de la prise en compte de l'échelle pluriannuelle pour l'évaluation des pertes.

Ainsi, face aux limites des outils basés sur les bilans annuels, Syst'N® ouvre des pistes pour le renouvellement des démarches de diagnostic des pertes d'azote, ainsi que de nouveaux indicateurs utilisables dans les évaluations multicritères des SdC. De plus, les résultats d'identification des hotspots et de leurs déterminants tels que présentés sont ainsi un support pour la reconception de SdC plus performants en termes de pertes d'azote. Il permet alors aux acteurs (conseillers agricoles et/ou agriculteurs) d'être guidés par des arguments reposant sur des bases scientifiques.

Plus globalement, au vu de la contribution de la fertilisation azotée aux pollutions de l'air et des eaux, la maîtrise des pertes d'azote dans les SdC est un enjeu de taille. Par ailleurs, l'agriculture a un rôle important à jouer dans l'atténuation du changement climatique et la problématique de l'autonomie azotée y apparaît primordiale.

Enfin, la volatilité des prix des intrants azotés, les pertes économiques que les pertes d'azote engendrent, et l'impact carbone de la fertilisation, sont autant d'arguments de sensibilisation à porter auprès de la sphère agricole. Les indicateurs d'autonomie azotée et économique construits grâce à Syst'N® permettent de les appuyer.

## Références bibliographiques

- Ademe. (2018). Les émissions d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/reduire-emissions-polluants/emissions-dammoniac-nh3>>. (Page consultée le 23 mars 2021).
- Beaudoin, N., Saad, J. K., Van Laethem, C., Machet, J. M., Maucorps, J., & Mary, B. (2005). Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111(1–4), 292–310. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.006>
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J. M., Meynard, J. M., & Delécolle, R. (1998). STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5–6), 311–346. <https://doi.org/10.1051/agro:19980501>
- Cabeza-Orcel, P., & Moureaux, B. (Novembre 2017). Qualité de l'eau : une gestion à long terme. *Perspectives Agricoles N°449*, 36–43.
- Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est. (n.d.). Grandes cultures [en ligne]. Disponible sur : <<https://grandest.chambre-agriculture.fr/agro-environnement/energie-methanisation/acse-air-climat-sol-energie/grandes-cultures/>>. (Page consultée le 10 août 2021).
- Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est, ATMO Grand Est, & ITADA. (2021). Webinaire transfrontalier : "agriculture et atmosphère." [Webinaire]
- Chambres d'agriculture. (n.d.). Directive nitrates [en ligne]. Disponible sur : <<https://chambres-agriculture.fr/agriculteur-et-politiques/politiques-environnementales/directive-nitrates/>>. (Page consultée le 11 août 2021).
- Chambres d'agriculture. (2019). Digestats de méthanisation : optimiser le retour au sol pour profiter des bénéfices agronomiques et économiques Résultats d'essais et suivis d'exploitation, bilan de 4 années [Rapport technique].
- CITEPA. (2015). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France - Format SECTEN [Rapport technique].
- Dardonville, M. (2021). Caractérisation des formes d'agriculture et évaluation de leur résilience aux perturbations [Soutenance de thèse]
- DRAAF Grand Est. (2020). Statistique agricole Région Grand Est [Plaquette].
- Génermont, S., & Cellier, P. (1997). A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88(1–4), 145–167. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00044-0)
- GIEE Magellan. (2019). Guide Magellan : Semis direct, du couvert annuel... au couvert permanent [Rapport technique].
- Guillier, M., Cros, C., & Reau, R. (2020). AUTO'N - Améliorer l'autonomie azotée des systèmes de culture en Champagne crayeuse Innovations Agronomiques 79 (2020), 267-279. *Innovations Agronomiques*, 79, 193–212. [https://www6.inrae.fr/ciag/content/download/6809/49578/file/Vol79-13-Guillier et al.pdf](https://www6.inrae.fr/ciag/content/download/6809/49578/file/Vol79-13-Guillier%20et%20al.pdf)
- Hénault, C., Grossel, A., Mary, B., Roussel, M., & Léonard, J. (2012). Nitrous Oxide Emission by Agricultural Soils: A Review of Spatial and Temporal Variability for Mitigation. *Pedosphere*, 22(4), 426–433. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60029-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60029-0)

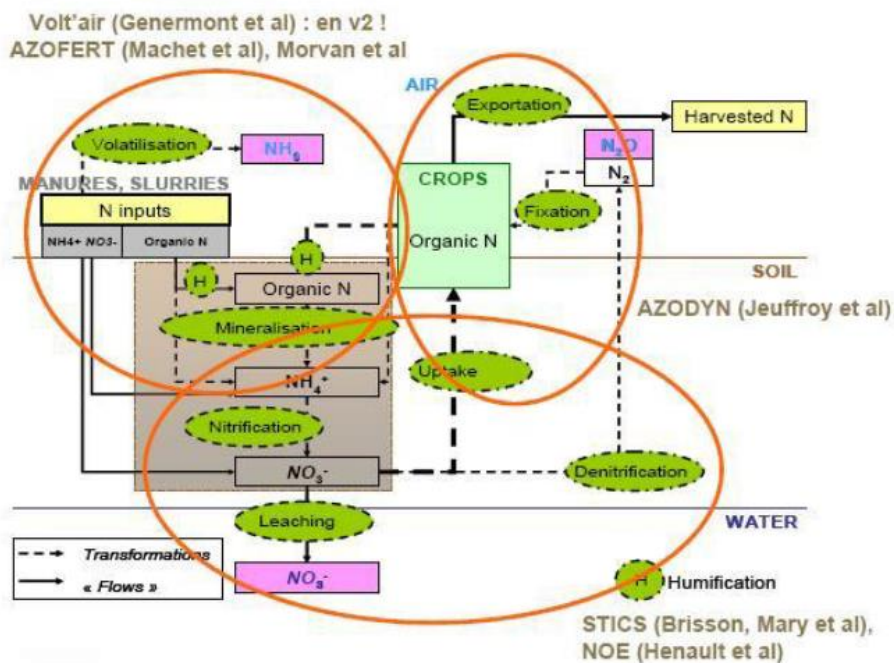
- ITAB. (2012). Couvert végétal pendant l'interculture en AB : caractéristiques des espèces [Plaquette].
- Jeuffroy, M. H., & Recous, S. (1999). Azodyn: A simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy*, 10(2), 129–144. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00059-8)
- Lairez, J., Feschet, P., Aubin, J., Bockstaller, C., Bouvarel, I. (2015). Agriculture et développement durable. Guide pour l'évaluation multicritère, *Quae ed.*, 232.
- Machet, J. M., Recous, S., Jeuffroy, M. H., Mary, B., Nicolardot, B., & Parnaudeau, V. (2004). A dynamic version of the predictive balance sheet method for fertiliser N advice. Controlling Nitrogen Flows and Losses. *Controlling nitrogen flows and losses* (pp. 191–193). Wageningen Academic Publishers. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-528-4>
- Massa, F., Gascuel-Oudou, C., Merot, P., Baudry, J., Beduneau, G., Blondel, R., Durand, P., Tico, S., & O., T. (2008). Territ''eau, une méthode et des outils pour améliorer la gestion des paysages agricoles en vue de préserver la qualité de l'eau. *Azote, Phosphore et Pesticides, Numéro Spécial, Ingénieries*, 115–132.
- Ministère de l'agriculture. (2014). *Mieux gérer l'azote pour réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole* [en ligne]. Disponible sur : < [https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/document\\_nitrates\\_v\\_internet\\_2\\_cle0a627a.pdf](https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/document_nitrates_v_internet_2_cle0a627a.pdf) >. Page consultée le 20 juillet 2021.
- Parnaudeau, V., Reau, R., Dubrulle, P., Parnaudeau, V., Reau, R., & Dubrulle, P. (2012). Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture : le logiciel Syst'N. *Innovations Agronomiques*, 21, 59–70.
- Pellerin, S., Butler, F., & Van Laethem, C. (2014). Fertilisation et environnement - Quelles pistes pour l'aide à la décision ? *Quae, Acta*.
- Peyraud, J., Cellier, P., Aarts, F., Béline, F., Bourblanc, M., Delaby, L., Donnars, C., & Dupraz, P. (2020). Les flux d'azote liés aux élevages : réduire les pertes, rétablir les équilibres [Rapport technique].
- Reau, R., Monnot, L.-A., Schaub, A., Munier-Jolain, N., Pambou, I., Bockstaller, C., Cariolle, M., Chabert, A., & Dumans, P. (2012). Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. *Innovations Agronomiques*, 5–33.
- RMT Bouclage. (2013). Syst'N : un outil pour le diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture [Plaquette].
- RMT Bouclage. (2021a). Guide de diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture [Rapport technique].
- RMT Bouclage. (2021b). Journées annuelles du RMT Bouclage [Visioconférence].
- Strayer, D. L., Beighley, R. E., Thompson, L. C., Brooks, S., Nilsson, C., Pinay, G., & Naiman, R. J. (2003). Effects of land cover on stream ecosystems: Roles of empirical models and scaling issues. *Ecosystems*, 6(5), 407–423. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0170-0>
- UNIFA. (2017). Fiches pratiques de fertilisation. *Editions France Agricole*. 200 p.
- Viard, A., Hénault, C., Rochette, P., Kuikman, P., Flénet, F., & Cellier, P. (2013). Le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), puissant gaz à effet de serre émis par les sols agricoles: Méthodes d'inventaire et leviers de réduction. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 20(2), 108–118. <https://doi.org/10.1684/ocl.2013.0501>

## Liste des annexes

<i>Annexe 1 Schéma du modèle intégré au simulateur de Syst'N, constitué de modules issus de différents modèles, source RMT Bouclage.....</i>	<i>54</i>
<i>Annexe 2 Interfaces de saisie des données du simulateur Syst'N.....</i>	<i>54</i>
<i>Annexe 3 Capture d'écran sortie Syst'N : Bilan des pertes à l'échelle de la rotation (moyennes annuelles tenant compte de toutes les cultures de la rotation).....</i>	<i>57</i>
<i>Annexe 4 Capture d'écran sortie Syst'N : Dynamique des pertes au cours de la succession.....</i>	<i>58</i>
<i>Annexe 5 Extraits du fichier Excel de récolte des données d'entrée Syst'N .....</i>	<i>59</i>
<i>Annexe 6 Exemple d'une fiche d'identité.....</i>	<i>60</i>

## Annexes

Annexe 1 Schéma du modèle intégré au simulateur de Syst'N, constitué de modules issus de différents modèles, source RMT Bouclage



Annexe 2 Interfaces de saisie des données du simulateur Syst'N

Année de début + durée de la simulation

Saisie de la situation

Contexte géographique et climatique

Situation: avantconception Description de la situation

DESCRIPTION SITUATION

Nom de la situation (I pas de caractères accentués!) Descriptif

ANNEE de début de simulation

Nombre d'années de simulation  
 Minimum recommandé: 7

Numero de l'exploitation

Territoire auquel est liée la situation

Sous-territoire auquel est liée la situation

Surface de la situation-parcelle en ha

Classe de pente

Région

Fichiers climatiques locaux  
 Station climatique

Fichier Paramètres Test Fenêtres Aide Télécharger les résultats

**Date semis** **Rendement**

**Date récolte** **% de paille exportée**

Situation: avantconception rotation

Culture	Date implantation	Date récolte	Rendement	Unité	% de paille exportée	Densité (plts/ha)	Mat. fraîche(kg/plant)
X Colza d'hiver (COLH)	15/08/n	10/07/n+1	35	q/ha	0		
X Blé tendre d'hiver (BTH)	20/09/n	14/07/n+1	78	q/ha	100		
X Mais ensilage (MAE)	15/04/n	10/09/n	12	t MS/ha	100		
X Blé tendre d'hiver (BTH)	20/10/n	20/07/n+1	75	q/ha	100		
X Orge d'hiver (ORH)	20/09/n	01/07/n+1	80	q/ha	100		
X <choisir...>							

Accédez aux différents éléments de l'itinéraire technique d'une culture via l'arborescence à gauche.

**Saisie de la succession des cultures de la rotation**

HISTORIQUE CULTURAL DE LA PARCELLE

Système de travail du sol (voir Aide)

Gestion des résidus de culture

Nature des PRO\* apportés sur la parcelle

Date de retournement de la prairie précédente

Fréquence d'apport des PRO\*

Durée de la prairie précédente

**Saisie de l'historique cultural (pratiques de travail, fertilisation organique, gestion de résidus de culture des 10 dernières années)**

**Culture précédente de la rotation (sa date de récolte, % de paille exportée et rendement)**

PRECEDENT DE LA ROTATION

Nom de la culture qui précède la rotation considérée

Date de la récolte du précédent (jj/mm)

% de paille exportée (le cas échéant)

Rendement du précédent  
 q/ha

Date du travail du sol d'enfouissement des résidus (jj/mm/n+x -> voir écran INFOS)

Profondeur du travail du sol d'enfouissement des résidus (cm)

Outil de travail du sol d'enfouissement des résidus

La date de début de simulation est la date de récolte du précédent que vous indiquez ici.

Syst'N - GAEC\_du\_rouge\_bois\_sol\_Morhange\_

Fichier Paramètres Test Fenêtres Aide T

Description du dossier

Situations

- avantconception
  - Historique cultural
  - ORH (Orge d'hiver)
  - Rotation
    - COLH (Colza d'hiver)
      - Ferti Organique
        - FBP
      - Ferti Minérale
        - SOL39
        - SFNAM
        - SOL39
    - cipan
      - Travail du sol
        - 25/07/n
        - 15/08/n
- Fertilisation
  - Paturage
  - Fauche
- BTH (Blé tendre d'hiver)
- MAE (Mais ensilage)
- BTH (Blé tendre d'hiver)
- ORH (Orge d'hiver)
- Sol
- Données mesurées

Situation: avantconception Culture n°1: COLH Apports organiques

Détail des apports organiques

Apports organiques

Type	Date	Dose	Unité	% N Total	% N-NH4	MS (% MF)	Outil d'application
X Fumier de bovins pailleux(FBP)	10/08/n	30	T MF	0.4	0.05	20.0	épandeur à fumier avec table
X <choisir...>							<choisir...>

Trier par date

Situation: avantconception Culture n°1: COLH Apports minéraux

Détail des apports minéraux

Apports minéraux

Type	Date	Unités N apportées (kgN/ha)	Outil d'apport
X Solution azotée 390(SOL39)	20/02/n+1	70	pulvérisateur engrais liquide
X Sulfonitrate d'ammoniaque(SFNAM)	01/03/n+1	55	épandeur engrais granulé
X Solution azotée 390(SOL39)	20/03/n+1	55	pulvérisateur engrais liquide
X <choisir...>			<choisir...>

Trier par date

Situation: avantconception Culture n°1: COLH Travail du sol

Détail des travaux du sol

Travaux du Sol

Date	Profondeur	Outil
X 25/07/n	15	Outil à dents ou à disques
X 15/08/n	5	Semis combiné herse rotative
X		<choisir...>

Trier par date

Description du SdC

Situation: avantconception Description du sol

Région définie pour la situation: Lorraine

Sols régionaux: Alluvions sablo argileuses caillouteuses - Personnalisés

Région d'origine: Argile limoneuse(AL)

Code: Argile lourde non calcaire(ALNC)

Type de sol: Argilo-calc moyen/calc dur(ACM)

Horizons du sol

Profondeur du sol: 75

Données modifiables

Epais.(cm)	% Argile	% Limon	% Sable	Texture	DA (terre fine)	% Cailloux
X 25	56	27.6	16.4	Argile	1.51	0
X 50	40	57.8	2.5	<choisir...>	1.56	0
X				<choisir...>		

OU

Saisie sans passer par la sélection du type de sol

Caractéristiques du 1er horizon

Remplir au moins 2 des 3 champs suivants

% N Org. 0.1 % MO 3.12 C/N 10

% CaCO3 13.4 pH 8 CEC (mEq/100 g) 28.2

Profondeur obstacle à enracinement 75 % Argile décarbonatée

Description du sol

Rappel de la succession culturale et des apports d'azote

Groupes de cultures	Cultures/Rendements	Apports organiques	Apports minéraux
COLH	Colza d'hiver → 35 q/ha	120	180
BTH	Blé tendre d'hiver → 78 q/ha	0	185
LEGFCI - MAE	Légumineuse fourragère Maïs ensilage → 12 t MS/ha	120	150
BTH	Blé tendre d'hiver → 75 q/ha	0	185
ORH	Orge d'hiver → 80 q/ha	0	160

Entrées d'azote (apports + fixation symbiotique)

Entrées d'azote (kg N/ha/an)

Fertilisation minérale \*:

172

Fertilisation organique \*:

48

Fixation d'azote:

36

Profondeur du sol considérée (cm):

75

Bilan d'azote

Solde azote Apport-Export\* (kg N/ha/an):

31

Variation du stock d'azote total dans le sol si résidus et pailles exportés

\* (kg N/ha/an):

42

Minéralisation de l'azote du sol et des résidus de culture (kg N/ha/an):

47

Concentration moyenne en NO3 sous le profil (mg NO3/l):

36

Sorties d'azote (absorption par les cultures et exportation par les récoltes et résidus de culture)

Sorties d'azote (kg N/ha/an)

Exportation par les récoltes \*:

115

Résidus de récolte, pailles si exportées:

74

Absorption par les cultures:

119

Récapitulatif des pertes moyennes

Pertes d'azote moyennes annuelles (kg N/ha/an)

Protoxyde d'azote (N2O):

1

soit en équivalent CO2 \*:

233

Ammoniac (NH3):

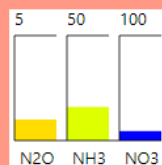
16

Nitrate (NO3) lessivé:

9

Nitrate (NO3) ruisselé:

0

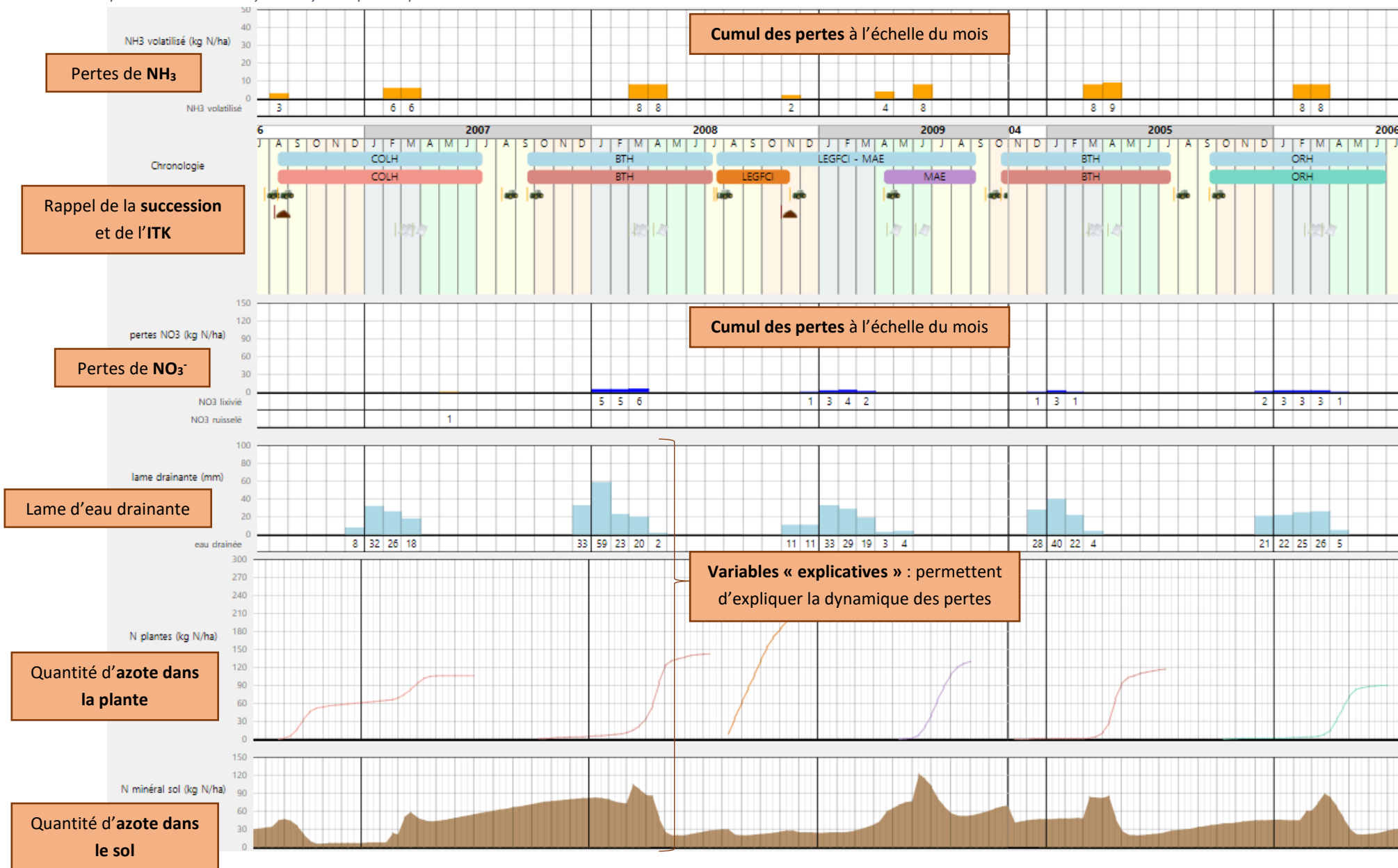


Lame drainante annuelle (mm d'eau/an):

105



Annexe 4 Capture d'écran sortie Syst'N : Dynamique des pertes au cours de la succession



	A	B	C	D	E	F	G
1	<b>Descriptif de l'historique culturel : Permet de décrire le passé de la parcelle en termes de restitution organique</b>						
2							
3						<b>Eventuellement : Est-ce qu'il y a eu une prairie temporaire OU permanente dans ce système ?</b>	
4		Système de travail du sol <i>Depuis 10 ans ou plus. Si un labour ou un travail superficiel a eu lieu dans les 10 ans, choisissez l'option correspondante. Dérouler pour choisir</i>	Fréquence d'apport des PRO <i>Dérouler pour choisir</i>	Nature des PRO apportés (si apport) <i>Dérouler pour choisir</i>	Gestion des résidus de culture <i>Dérouler pour choisir</i>	Date de retournement de la prairie précédente <i>Dérouler pour choisir</i>	Durée de la prairie précédente <i>Dérouler pour choisir</i>
5	Bloc 1						
6	Bloc 2		1-3 ans				
7	Bloc 3		3-5 ans				
8	Bloc 4		5-10 ans				
9			Pas d'apport				

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>ITK sur la période allant de la récolte du précédent à la récolte de la culture principale pour chaque culture de la succession</b>								
3									
4			<b>Culture</b>						
5			<b>Données facultatives</b>						
6	<b>Bloc 1 avant conception</b>								
7		Rotation <i>Dérouler pour choisir</i>	Date d'implantation (jj/mm/n)	Date récolte (jj/mm/n+*)	Rendement (avec unité)	% de paille exportée	Densité (plts/ha)	Mat. Fraîche (kg/plant)	Date épiaison (ou floraison) (jj/mm/n+*)
8	Culture 1								
9	Culture 2	Betterave (BET)							
10	Culture 3	Blé dur d'hiver (BDH) Blé tendre d'hiver (BTH) Carrotte de printemps (CARPRT) Carrotte d'été (CARETE) Oignon (OH) Chou fleur d'hiver précoce (CFHF) Chou fleur d'hiver tardif (CFHT)							
11	Culture 4								
12	Culture 5								
13	Culture 6								
14	Culture 7								
15	Culture 8								
16	Culture 9								
17	Culture 10								



**BOVIN VIANDE CULTURE**

**SCEA d'aquitaine**

**SITUATION**

Vincent DAVILLE est engagé dans le collectif de méthanisation ValBioEnergie dont l'unité est localisée à Val de Briey (54) depuis septembre 2020. Cela l'a amené à modifier son système de culture, avec une rotation allongée qui intègre des CIVE (seigle et sorgho). Il a accompagné cet engagement par la conversion de son système de culture en agriculture biologique afin de mieux valoriser ses effluents d'élevage. Ceux-ci et les CIVE ensilées alimentent le méthaniseur, et le digestat produit se substitue totalement aux engrais chimiques.

Le sol est travaillé avec un outil à dents ou à disques et il n'y a qu'un seul passage de charrue post-luzerne. L'hydromorphie ainsi que la présence de vulpins et chardons ont pour conséquences l'implantation tardive des cultures et le désherbage fréquent.

**PHOTO EXPLOITANT/EXPLOITATION**

**DESCRIPTION**

- Mairy-Mainville (54)
- 1,5
- 246 ha
- Argilo-limoneux  
En zone vulnérable nitrates

Son objectif est de viser une meilleure autonomie azotée par la modification des pratiques, de la rotation et par une bonne gestion du digestat.

**Légende :**

- Enfouissement de la MO par travail du sol
- Légumineuses

**Avant reconception**

CIPAN : pois + féverole

- Apport fumier de bovins composté - épandeur à table
- Apport solution azotée 39 - pulvérisateur

**Après reconception**

CIPAN : moutarde + avoine

CIVE d'hiver : seigle

CIVE d'été : sorgho

- Apport digestat brut - injecteurs à disques

**SYSTÈME INITIAL**

Rotation avant reconception (conventionnel)

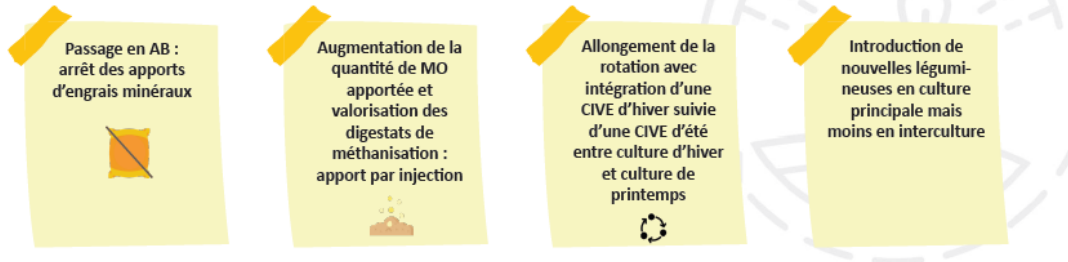
Rotation après reconception (bio + méthaniseur)

1 rotation sur 2 : luzerne ou soja

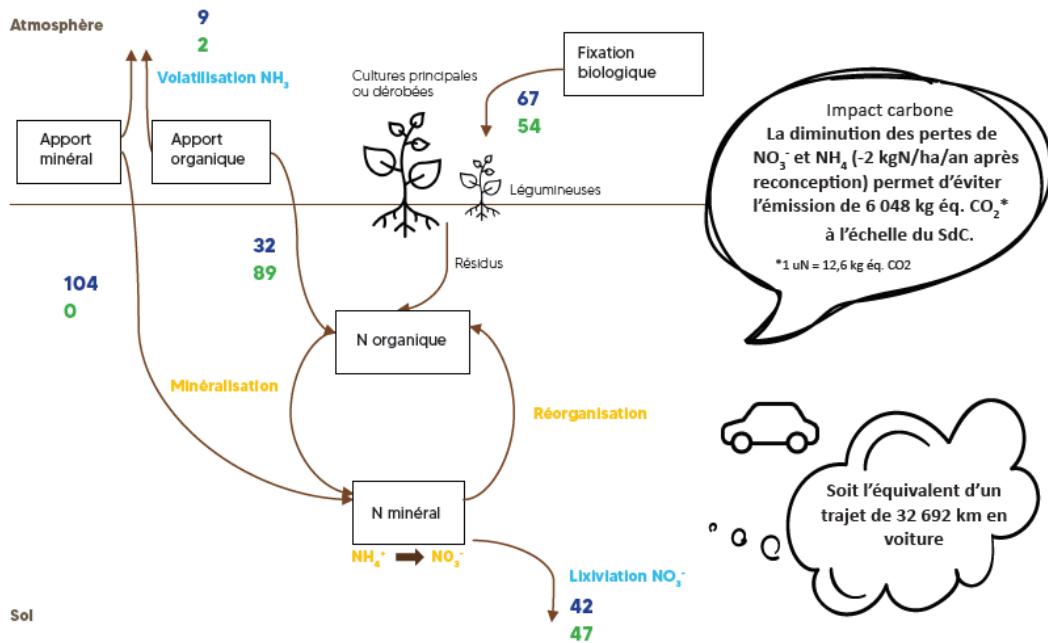
**Légende :**

- Sol nu
- CIVE d'été
- CIVE d'hiver
- CIPAN

## Changements opérés suite à la reconception



## Les flux d'azote\* dans le système

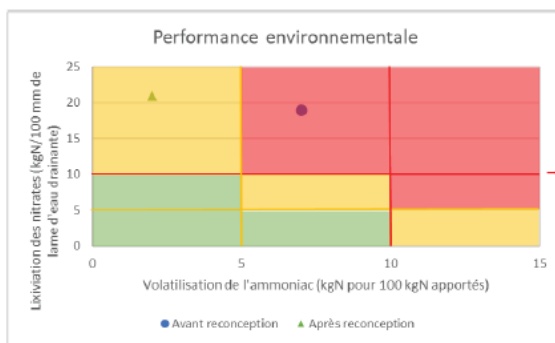


\*Les flux sont indiqués en kgN/ha/an : avant reconception – après reconception

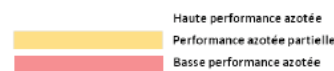
## LES PERFORMANCES AZOTÉES DU SYSTÈME DE CULTURE

### 1. Pertes d'azote dans l'environnement

Afin de faire abstraction de deux grands déterminants des pertes en kg N/ha/an que sont le volume d'eau drainé pour le nitrate et la dose de l'apport pour l'ammoniac, les pertes par lixiviation et par volatilisation sont établies respectivement au volume d'eau drainée et à la dose d'azote apportée.

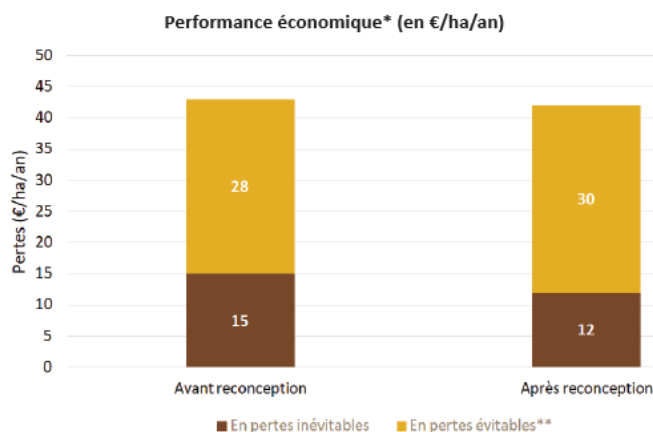


Seuil de potabilité des eaux dans les captages



- On passe d'un système à **basse performance** azotée à un système à **performance azotée partielle** grâce à la **diminution des pertes d'ammoniac par volatilisation** qui intervenaient avant reconception au printemps lors de l'épandage des engrais minéraux. L'arrêt de l'usage de ces engrais et l'utilisation d'un **injecteur à disques** pour l'épandage du digestat engendrent dorénavant de très faibles pertes.
- Les **pertes par lixiviation** augmentent légèrement. Elles interviennent avant reconception lors des périodes hivernales sous les **cultures d'hiver** qui ne sont pas suffisamment développées, et qui ont donc une **faible capacité d'absorption**, pour capter l'azote minéral contenu dans le sol, à l'exception du colza semé début août. Après reconception, ces pertes sont les plus élevées **sous blé post-luzerne** et post-soja, le **stock d'N minéral du sol étant très conséquent** du fait des propriétés fixatrices d'azote de ces plantes. Le sol nu en interculture entre les 2 soja et entre sorgho et tournesol/orge de printemps induit également des pertes.

## 2. Pertes économiques



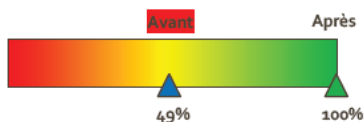
\*1 UN = 0,85€, source : Terre-net, marchés agricoles)  
 \*\*Uniquement les pertes supérieures aux seuils exigeants définis dans le projet Agro-Eco-Syst'N sont considérées ici : les pertes > à 5% des apports pour la volatilisation de NH<sub>3</sub> et > à 5 kg d'N/ha/an pour la lixiviation de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Le système après reconception a un potentiel de réduction des pertes un peu plus important (+ 2€/ha/an). Ce SdC peut **potentiellement économiser 30€/ha/an**, ce qui revient à économiser **7 444€/an** à l'échelle de sa surface totale.

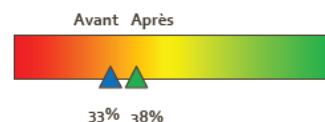
**+ Indicateur de performance économique : % des charges de fertilisation perdues (=€perdu/€acheté)**

## AUTONOMIE AZOTÉE

L'autonomie du système de culture en azote minéral



La participation des légumineuses à l'autonomie azotée du système



## QUELLES PISTES D'AMÉLIORATION ?

- La quantité d'azote disponible après la luzerne est supérieure aux besoins du blé en période hivernale : **détruire la luzerne en fin d'hiver** et semer une culture de printemps (e.g. orge de printemps) permettrait une meilleure valorisation de l'azote
- Implanter des **couverts** même en **interculture courte** (e.g. entre blé et seigle) si les conditions météorologiques le permettent, afin de capter l'azote minéral du sol et limiter les lixiviations hivernales
- Supprimer le 2ème soja** afin de diminuer la quantité d'azote minéral du sol

## Table des figures

<i>Figure 1 Domaines d'intervention des CA, source Resolia Chambres d'agriculture</i> .....	3
<i>Figure 2 Organigramme du service IRD</i> .....	4
<i>Figure 3 Articulation du PEI PARTAGE, source CRAGE</i> .....	5
<i>Figure 4 Répartition des exploitations agricoles du Living Lab PARTAGE, source CRAGE</i> .....	6
<i>Figure 5 Répartition des cultures dominantes en Grand Est, source recensement Agreste PAC 2014</i> .....	7
<i>Figure 6 Cycle de l'azote, source UNIFA</i> .....	8
<i>Figure 7 Postes d'émissions de GES des exploitations de type Céréales et Oléoprotéagineux, source CRAGE</i> .....	8
<i>Figure 8 Répartition des émissions d'ammoniac de l'agriculture en France, source ADEME outil ClimAgri®</i> .....	9
<i>Figure 9 Schéma de la formation des particules fines, source CRAGE</i> .....	9
<i>Figure 10 Pratiques et états clés conduisant aux pertes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en automne-hiver, source RMT Bouclage</i> .....	12
<i>Figure 11 Succession culturale-type pour limiter les pertes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i> .....	12
<i>Figure 12 Effet de la date de destruction d'une CI de moutarde sur la quantité d'azote lixivié, source INRA-ITCF, 2002</i> .....	13
<i>Figure 13 Intégration d'une culture associée dans la succession culturale pour limiter les pertes</i> .....	13
<i>Figure 14 Evolution du rapport NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub> en fonction du pH, source ADA</i> .....	14
<i>Figure 15 Hiérarchie des risques de volatilisation suivant les engrais de synthèse par comparaison avec l'ammonitrate, source EMEP</i> .....	15
<i>Figure 16 Pratiques et états clés conduisant aux pertes de NH<sub>3</sub>, source RMT Bouclage</i> .....	16
<i>Figure 17 Données climatiques moyennes (2001-2020) de la station météorologique de Nancy</i> .....	19
<i>Figure 18 Présentation des rotations du SdC avant reconception (à gauche) et après reconception (à droite)</i> ...	20
<i>Figure 19 Données climatiques moyennes (2000-2019) de la station météorologique de Fagnières</i> .....	21
<i>Figure 20 Présentation des rotations du SdC avant reconception (à gauche) et après reconception (à droite)</i> ...	22
<i>Figure 21 Démarche d'évaluation des pertes d'azote établie dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N, source RMT Bouclage</i> .....	26
<i>Figure 22 Boucle de rétroaction évaluation-reconception des SdC déjà reconçus et non-reconçus</i> .....	27
<i>Figure 23 Seuils de pertes environnementaux définis dans le cadre du projet Agro-éco-Syst'N, source RMT Bouclage</i> .....	28
<i>Figure 24 Performance environnementale du SdC lorrain selon l'agrégation des pertes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et d'NH<sub>3</sub></i> .....	32
<i>Figure 25 Evolution de l'autonomie azotée du SdC lorrain avant-après reconception</i> .....	33
<i>Figure 26 Performance économique du SdC lorrain (avant et après reconception) avec différenciation des pertes évitables et inévitables</i> .....	33
<i>Figure 27 Schéma faisant le lien entre les pertes d'azote par lixiviation et les caractéristiques du SdC lorrain (après reconception)</i> .....	34
<i>Figure 29 Evolution de l'autonomie azotée du SdC champenois avant-après reconception</i> .....	38
<i>Figure 28 Performance environnementale du SdC champenois selon l'agrégation des pertes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et d'NH<sub>3</sub></i> . 38	
<i>Figure 30 Performance économique du SdC lorrain (avant et après reconception) avec différenciation des pertes évitables et inévitables</i> .....	38
<i>Figure 31 Schéma faisant le lien entre les pertes d'azote par volatilisation et les caractéristiques du SdC champenois (après reconception)</i> .....	39
<i>Figure 32 Schéma faisant le lien entre les pertes d'azote par lixiviation et les caractéristiques du SdC champenois (après reconception)</i> .....	40

## Table des tableaux

<i>Tableau 1 Principales caractéristiques du sol du SdC de Mairy-Maiville.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 2 Principales caractéristiques du sol du SdC de Montloué .....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 3 Données requises pour le fonctionnement de l'outil Syst'N.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 4 Flux moyens d'azote total simulés à l'échelle du SdC lorrain sur l'ensemble de la rotation : a) avant reconception, b) après reconception (kgN/ha/an).....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 5 Flux moyens d'azote total simulés à l'échelle du SdC champenois sur l'ensemble de la rotation : a) avant reconception, b) après reconception (kgN/ha/an).....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 6 Test de sensibilité des pertes d'azote simulées aux données d'entrée sol.....</i>	<i>46</i>

## Liste des sigles et abréviations

<b>AB</b>	Agriculture Biologique
<b>AEPV</b>	Agronomie, Environnement, Production Végétale
<b>ALPA</b>	Association Lorraine pour la Promotion de l'Agriculture
<b>APCA</b>	Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture
<b>ARPEEGE</b>	Autonomie en Ressources Protéiques et Energétiques des Elevages du Grand Est
<b>CA</b>	Chambre d'Agriculture
<b>CDA</b>	Chambre Départementale d'Agriculture
<b>CITEPA</b>	Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
<b>CI</b>	Culture Intermédiaire
<b>CIPAN</b>	Culture Intermédiaire Piège à Nitrate
<b>CIVE</b>	Culture Intermédiaire à Vocation Energétique
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>COP</b>	Céréales et Oléo-protéagineux
<b>CP</b>	Culture Principale
<b>CRA</b>	Chambre Régionale d'Agriculture
<b>CRAGE</b>	Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>ICTA</b>	Instituts et Centres Techniques Agricoles
<b>INRAE</b>	Institut National pour la Recherche, l'Alimentation et l'Environnement
<b>ITK</b>	Indice de Nutrition Azotée
<b>INN</b>	Itinéraire technique cultural
<b>MO</b>	Matière Organique
<b>NEC</b>	National Emissions Ceilings
<b>NH<sub>3</sub></b>	Ammoniac
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	Ammonium
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	Nitrate
<b>PARTAGE</b>	Programme Agronomique Régional pour la Transition Agroécologique en Grand Est
<b>PEI</b>	Programme Européen pour l'Innovation
<b>PRDAR</b>	Programme Régional de Développement Agricole et Rural
<b>PRO</b>	Produit Résiduaire Organique
<b>R&amp;D</b>	Recherche et Développement
<b>RDI</b>	Recherche, Développement, Innovation
<b>REH</b>	Reliquat Entrée Hiver
<b>SAU</b>	Surface Agricole Utile
<b>SdC</b>	Système de Culture
<b>TCS</b>	Techniques Culturelles Simplifiées
<b>UNIFA</b>	Union des Industries et de la Fertilisation





## Résumé - Abstract

L'agriculture est responsable de la majorité des pertes d'azote par lixiviation des nitrates, et par volatilisation de l'ammoniac. C'est dans ce contexte que la CRAGE (Chambre régionale d'agriculture Grand Est) s'intéresse, dans le cadre du projet PARTAGE, à la réduction des pertes d'azote à l'échelle des SdC (Systèmes de Culture) du Grand Est. Les déterminants de ces pertes sont déjà connus ; l'enjeu est d'identifier, spécifiquement pour chaque SdC, les moments-clés (dits hotspots) de la rotation où elles interviennent afin de modifier les pratiques et combinaisons de pratiques les provoquant.

Pour ce faire, le logiciel de simulation Syst'N® est utilisé afin de favoriser la conception de SdC plus autonomes en azote en limitant les pertes. Les flux d'azote de deux SdC sont ici modélisés avec l'outil. La dynamique des pertes par lixiviation du SdC « champenois » montre que ses hotspots interviennent en début de rotation, avec la succession d'un colza associé à une légumineuse, d'un blé, d'un pois d'hiver et d'un blé. Chacune de ces cultures induit un fort REH (Reliquat Entrée Hiver) non capté par la culture suivante. La dynamique des pertes par lixiviation du SdC « lorrain » (conduit en AB (Agriculture Biologique)) montre que ses hotspots se produisent tout au long de la rotation du fait du sol laissé nu en interculture. La dynamique des pertes par volatilisation de ce même SdC montre la potentialité de l'AB pour la réduction de ces pertes, du fait de l'arrêt de l'usage des engrais minéraux.

De plus, à partir des flux d'azote quantifiés, des indicateurs auxquels les agriculteurs sont sensibles (pertes économiques, autonomie azotée) sont également construits afin d'appuyer un peu plus la volonté de reconception des SdC.

**Mots-clés :** Syst'N®, Pertes d'azote, Système de culture, Modélisation, Conception

Agriculture is responsible for the majority of nitrogen losses from nitrate leaching, and from ammonia volatilization. It is in this context that the Grand Est regional farming body, « la Chambre régionale d'agriculture Grand Est » is interested in reducing nitrogen losses on a cropping system scale in the Grand Est region, as part of the PARTAGE project. The drivers of these losses are already well identified; the challenge is to identify, for each cropping system specifically, the key moments (hotspots) of the crop rotation where these losses occur, in order to engage in practices and combinations of practices that limit them.

In this way, the Syst'N® simulation software is used to encourage the design of cropping systems which reduce nitrogen losses. Nitrogen flows of two cropping systems are modelled here with Syst'N®. The losses dynamic by leaching of the « champenois » cropping system, shows that the hotspots occur at the beginning of the crop sequence, with the succession of rapeseed-legume association – wheat – winter pea – wheat. Each of those crop releases an important quantity of nitrogen into the soil which is not absorbed by the following crop. The losses dynamic by leaching of the « lorrain » cropping system (organic farming) shows that the hotspots occur throughout the crop sequence due to the bare ground between two crop cycles. The losses dynamic by volatilization of this same cropping system shows the potentiality of organic farming to lower them, due to the non-use of synthetic fertilizers.

Moreover, from the nitrogen flows quantified, indicators to which farmers are sensitive (economic losses, nitrogen autonomy) are also constructed, in order to back up the willingness of redesigning cropping systems.

**Keywords :** Syst'N®, Nitrogen losses, Cropping system, Modelling, Designing