



HAL
open science

Evaluation des émissions de nitrate par les champs pour la conception de projets de territoire et l'accompagnement de la transition en aires d'alimentation de captage

Raymond Reau, Marine Bedu, Claudine Ferrané, Jean-Baptiste Gratecap,
Soizic Jean-Baptiste, Laurette Paravano, Virginie Parnaudeau, Lorène Prost

► To cite this version:

Raymond Reau, Marine Bedu, Claudine Ferrané, Jean-Baptiste Gratecap, Soizic Jean-Baptiste, et al.. Evaluation des émissions de nitrate par les champs pour la conception de projets de territoire et l'accompagnement de la transition en aires d'alimentation de captage. *Innovations Agronomiques*, 2017, 57 (Juin 2017), pp.99-115. 10.15454/1.5137819587418933E12 . hal-01783986

HAL Id: hal-01783986

<https://hal.science/hal-01783986v1>

Submitted on 2 May 2018

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Evaluation des émissions de nitrate par les champs pour la conception de projets de territoire et l'accompagnement de la transition en aires d'alimentation de captage

Reau R.¹, Bedu M.², Ferrané C.¹, Gratecap J-B.³, Jean-Baptiste S.¹, Paravano L.⁴, Parnaudeau V.², Prost L.⁵

¹ INRA, UMR Agronomie, BP1, F-78850 Thiverval-Grignon cedex

² INRA, UMR SAS, 65 Route de Saint Briec, CS84215, F-35042 Rennes cedex

³ Chambre d'agriculture d'Eure-et-Loir, 10 Rue Dieudonné Costes, F-28000 Chartres

⁴ Chambre d'Agriculture de l'Yonne, BP50289, F-89005 Auxerre cedex

⁵ INRA, UR LISIS, BP1, F-78850 Thiverval-Grignon cedex

Correspondance : raymond.reau@inra.fr

Résumé

Depuis les années 2000, la politique de protection des aires d'alimentation des captages (AAC) repose sur la réussite de plans d'actions territoriaux, évaluée par l'analyse des pratiques agricoles.

Cette évaluation est mobilisée lors des diagnostics et de la conception du plan d'action, pour estimer les émissions de polluants par les champs suivant leurs systèmes de culture, et la capacité du territoire à produire de l'eau de qualité. Les méthodes d'évaluation des émissions de nitrate ont été étudiées dans le diagnostic territorial des pressions agricoles de l'AAC de Saint Memmie (Marne), puis dans la construction et la mise en œuvre du plan d'action de l'AAC de Brienon (Yonne).

Organisées via un « observatoire » des pratiques et des états des champs cultivés, les mesures d'azote dans le sol et les observations des biomasses et des quantités d'azote qu'elles contiennent, restent les outils les plus pertinents pour estimer les émissions de nitrates et la dynamique de l'azote comme pour mobiliser les agriculteurs et d'autres acteurs via des outils de médiation comme des « tours de plaine ».

Les outils de simulation comme Syst'N ont un rôle complémentaire pour extrapoler les émissions de nitrate au-delà des quelques champs faisant l'objet de mesures, pour estimer le montant du lessivage et la qualité de l'eau à attendre dans le territoire, par exemple dans un « tableau de bord » utile à l'apprentissage et à l'aide à la décision des acteurs du territoire. Enfin ces simulations restent aussi essentielles pour évaluer a priori les résultats à attendre de nouvelles façons de cultiver, ou d'un nouveau scénario de territoire.

Mots-clés : Qualité de l'eau, Système de culture, Observatoire, Tableau de bord, Syst'N

Abstract: Nitrate emission assessment for designing territory projects and supporting transition in drinking water catchment area

Since the 2000's the policy for the protection of catchment areas is based on territorial action plan, the success of which is assessed by practices analysis.

This assessment is mobilized to estimate pollutants emissions from fields (according to the cropping system) and the ability to maintain a good water quality. The methods for assessment of nitrate emissions was studied in territorial diagnosis of agricultural pressures in the catchment area of Saint Memmie (Marne) and in the setting up of the action plan in Brienon (Yonne).

Nitrogen measurements in soil and the reporting of biomass and nitrogen quantities for crops are organized in an “observatory” of practices and cultivated fields’ states. They remain the most appropriate tool to estimate nitrates emissions and nitrogen dynamics but also to mobilize local actors.

Simulation tools like Syst’N have a complementary role in extrapolating emissions from measurements to the whole territory, estimating nitrate leaching and expected water quality, like in a dashboard. They are also used to evaluate new cropping systems and scenarios for the territory.

Keywords: Water quality, Cropping system, Observatory, Dash board, Syst’N

Introduction

18 millions de mètres cubes d'eau destinée à la consommation humaine sont produits chaque jour en France dans quelques 33 000 captages. Assurer aux consommateurs une alimentation en eau potable de qualité pour éviter tout risque sur le plan sanitaire est un enjeu de santé publique. Avec la Directive cadre sur l'eau et les lois Grenelle engagées dans les années 2000, la politique de protection des aires d'alimentation des captages (AAC) repose sur la réussite de plans d'actions territoriaux. Il s'agit d'atteindre l'objectif environnemental de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) qui est de restaurer ou maintenir le bon état des ressources en eau, tel que le précise un article spécifique de la DCE, exigeant d'atteindre rapidement des eaux de qualité dans ces captages (Jean-Baptiste *et al.*, 2016). Pour les nitrates, une norme européenne pour l'eau potable (50 mg/l) a été instaurée en 1975 par une directive européenne, en tenant compte des risques sanitaires encourus par la population la plus vulnérable.

De nombreuses ressources d'eau destinée à la consommation humaine sont aujourd'hui polluées. La contamination par les nitrates et/ou les pesticides représente une cause importante d'abandons de captages. Les Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) adoptés fin 2015 évaluent à environ 3000 le nombre de points de captages sensibles (Jean-Baptiste *et al.*, 2016).

Programmée pour un millier d'AAC, la démarche de protection des lois Grenelle prévoit une série d'études préalables en trois étapes : l'identification, la délimitation et l'étude de la vulnérabilité de l'AAC, le diagnostic des pressions et la construction d'un plan d'action (Ministères, 2013), puis la mise en œuvre du plan d'action.

L'évaluation des pratiques agricoles occupe donc une place centrale dans la démarche de protection des AAC. En effet, le diagnostic des pressions prévoit de caractériser les pratiques agricoles et non agricoles actuelles, au regard de leur impact. Le plan d'action comprend un suivi des actions et de leurs résultats, une évaluation de ce qui a été obtenu (via un tableau de bord par exemple), en allant jusqu'à proposer de nouvelles orientations pour le plan d'action en cours de mise en œuvre (Ministères, 2013), si les résultats obtenus ne sont pas à la hauteur des ambitions initiales.

Du point de vue des nitrates, si l'analyse de conformité des pratiques agricoles reste la règle (Jean-Baptiste *et al.*, 2016), on évalue aujourd'hui de plus en plus souvent les émissions de nitrate issues des champs cultivés, grâce à la mise à disposition par la recherche d'outils d'évaluation opérationnels (Corpen, 2006) ; non seulement des outils qui rendent compte des pertes totales des champs cultivés aux échelles annuelle ou pluriannuelle, mais aussi qui informent sur la dynamique des émissions des champs cultivés au cours de l'année. Parmi ces outils, Syst’N (Parnaudeau *et al.*, 2012) est actuellement utilisé par des chargés d'études et des animateurs d'AAC (Hannebert, 2015 ; Bedu *et al.*, 2016).

Après un point bibliographique, cet article analyse comment sont réalisées aujourd'hui les évaluations des émissions de nitrate issus des champs agricoles dans les AAC au cours du diagnostic comme dans la construction initiale et la re-conception de certains plans d'actions. Les résultats y sont présentés via 3 cas d'étude. Enfin, il analyse les différentes postures d'évaluation, la place des outils d'estimation des émissions de nitrate au champ, ainsi que leurs perspectives d'utilisation.

1. Comment concevoir avec des outils incertains pour prédire la qualité des eaux

Le Diagnostic Territorial des Pressions Agricoles (Ministères, 2013) est généralement analysé par conformité des pratiques agricoles, en confondant alors « pratiques » et « pressions ». Ces analyses, conduites à l'échelle des exploitations agricoles, sont peu pertinentes pour comprendre ce qui pose problème à l'échelle du territoire (Jean-Baptiste *et al.*, 2016). Dans cette logique, le suivi des plans d'action se limite souvent à une analyse de l'évolution des pratiques, jugée satisfaisante dans la mesure où cette évolution va dans le bon sens, indépendamment de la distance à parcourir pour obtenir de l'eau de qualité (Jean-Baptiste *et al.*, 2017). Afin de dépasser ces limites pour les AAC à problématique « nitrates », ces auteurs suggèrent de réaliser des diagnostics d'émissions de nitrate, et de mobiliser non seulement les connaissances sur les pratiques mais aussi les mesures qui rendent compte de l'azote présent dans les sols en entrée d'hiver par exemple et des observations sur les états des champs (états des couverts).

Cependant, les modèles d'évaluation des émissions de polluants dans l'eau donnent des résultats incertains à l'échelle de ces AAC. Cela provient notamment des limites de leur capacité prédictive intrinsèque, comme à la méconnaissance des pratiques agricoles réelles et aux longs délais de réponse de l'eau des nappes souterraines. Devant la difficulté de fournir des prédictions très fiables aux décideurs, et devant ces incertitudes, Walters (2007) souligne que la seule voie est de suivre sur le terrain les résultats que donnent les projets qui ont été décidés, afin de développer les connaissances et contribuer à l'apprentissage des acteurs concernés pour les aider à affiner leurs choix au cours du temps.

Pour construire et faire vivre des projets de territoire et contribuer au dialogue territorial entre les différents acteurs concernés, Girardin *et al.* (2005) ont proposé d'élaborer et de mobiliser un tableau de bord ; un outil intermédiaire rendant compte régulièrement au cours de la vie du projet des moyens mis en œuvre, des pratiques réalisées, des résultats obtenus dans les situations travaillées, et enfin du résultat global de l'ensemble du territoire en liaison avec les résultats attendus à terme. La démarche proposée ici a deux particularités principales : elle prend en compte la dimension territoriale et multi-acteur des AAC, et elle considère qu'il est essentiel d'éclairer régulièrement les décideurs des AAC sur l'état de leur territoire, afin d'orienter le projet au fil de l'eau et de contribuer à leur apprentissage, comme le suggère Walters (2007).

Cette logique amène à considérer le plan d'action d'une AAC plutôt comme un projet orienté sur les résultats à atteindre en termes de qualité de l'eau et géré par des acteurs locaux, qui évolue de façon dynamique en fonction de ce qui est acquis et appris au fur et à mesure, plutôt que comme une liste de pratiques phares à généraliser dans le territoire et à appliquer par les agriculteurs. Le projet peut ainsi être considéré comme un objet qu'on conçoit après le diagnostic initial, au moment de la définition du plan d'action, puis que l'on fait évoluer en boucle de progrès suivant les premières réussites mais aussi les difficultés rencontrées. Pour ces activités de conception, Meynard *et al.* (2012) distinguent la phase de construction initiale ou conception *de novo*, de l'adaptation *in itinere* pendant la mise en œuvre qualifiée de conception pas à pas.

Dans cette perspective où le plan d'action fait l'objet d'une gestion dynamique axée sur les résultats plus que d'un simple « suivi », l'évaluation consiste à évaluer les émissions de nitrate des différents champs cultivés au fil du temps, de comprendre ce qu'on peut en attendre à terme de qualité de l'eau au captage, pour faire les choix d'orientation et d'adaptation nécessaire pour atteindre effectivement la qualité d'eau requise à terme. Cette démarche ne se limite pas à suivre l'évolution des pratiques problématiques (à réduire) et des pratiques à encourager (à développer).

Ces évaluations des émissions de nitrate peuvent être réalisées à partir de mesures au champ, coûteuses et complexes quand on utilise des lysimètres, mais plus aisées à partir de mesures d'azote minéral dans le sol couplées avec des estimations de lessivage avec le modèle de Burns (1974) ou le

modèle LIXIM (Mary *et al.*, 1999). Elles peuvent être réalisées également par simulations avec des outils simulant ces pertes aux champs à partir d'une description des pratiques à l'échelle d'un cycle cultural comme avec les outils de type INDIGO (Bockstaller *et al.*, 2006) ou à l'échelle pluriannuelle d'une rotation de culture comme Syst'N (Parnaudeau *et al.*, 2012).

L'objectif de Syst'N est d'outiller les acteurs de terrain pour le diagnostic des pertes d'azote, et de les aider à comprendre la dynamique de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère, en se basant sur des références scientifiques et techniques existantes (Figure 1). L'outil Syst'N est composé d'un modèle journalier qui simule les pertes d'azote au champ à l'échelle pluriannuelle, en fonction du climat, du type de sol et du système de culture. Il simule trois types de pertes d'azote : la lixiviation des nitrates (NO₃-), la volatilisation d'ammoniac (NH₃) et l'émission de protoxyde d'azote (N₂O) par dénitrification. Des interfaces conviviales de saisie des données d'entrée d'une part, et d'observation des sorties à différentes échelles temporelles (rotation, succession de deux cultures, trimestre et jour) d'autre part, constituent une caractéristique clef de Syst'N qui le rend pédagogique et facile à prendre en main. Différentes utilisations de l'outil ont été recensées par Hannebert (2015) ; l'outil est ainsi utilisé :

- pour estimer les émissions de nitrate au champ à partir d'une connaissance du milieu et des pratiques agricoles,
- pour estimer les pertes d'azote à partir de la connaissance des états des champs cultivés, par exemple en utilisant le Reliquat Entrée Hiver¹ (REH), qui permet de corriger les écarts entre observation et simulation au début du drainage,
- pour estimer les pertes à l'échelle de l'ensemble d'une AAC, et à l'échelle pluriannuelle (Dupas *et al.*, 2015).

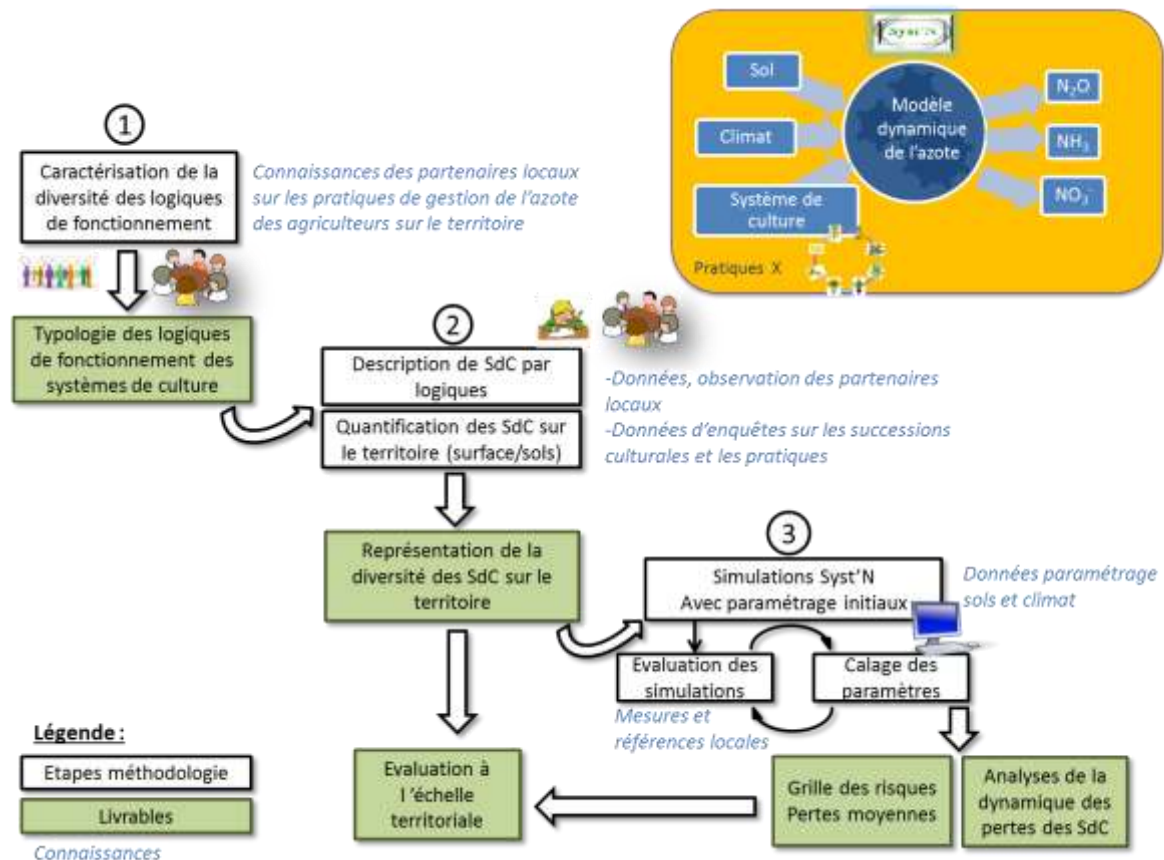


Figure 1 : Utilisation de Syst'N pour réaliser des diagnostics dans les AAC (Bedu *et al.*, 2016)

¹ Quantité d'azote minéral présent dans le profil de sol mesurée avant la période de drainage hivernale

Au-delà d'une « simple » estimation des pertes, l'analyse des usages de l'outil (Hannebert, 2015) montre que celui-ci est utile par ses caractéristiques pédagogiques, qui permettent aux utilisateurs de progresser dans leur compréhension des flux d'azote et des facteurs qui génèrent les pertes dans leurs systèmes.

Les outils présentés ci-dessus évaluent les émissions à l'échelle spatiale du champ cultivé. Cet article analyse plus particulièrement comment les chargés d'étude et les animateurs des AAC utilisent les outils d'évaluation non seulement au cours des activités de diagnostics, mais aussi pour les activités de conception initiale du premier plan d'action, comme pendant sa re-conception pas à pas, pour éclairer les acteurs et les décideurs à l'échelle de l'ensemble du territoire.

2. Evaluer les émissions agricoles pour établir le diagnostic de territoire et sélectionner des façons de cultiver à promouvoir

L'évaluation des émissions de nitrate a été étudiée au travers d'une série de diagnostics territoriaux des pressions agricoles qui a mobilisé Syst'N dans 9 AAC (Bedu *et al.*, 2016), illustrée ici à partir du cas de l'AAC de Saint Memmie (Marne) qui couvre 2672 ha.

2.1 Le cas d'étude de Saint Memmie (Marne)

Ce diagnostic des émissions de nitrate a démarré en 2014 par la collecte des informations pour la description des principales situations culturales du territoire, décrites comme la suite des interventions culturales au champ à l'échelle pluriannuelle resituées dans le milieu cultivé (sol, climat, etc...). Chaque situation culturale résulte de l'interaction du système de culture pratiqué avec le milieu cultivé. A Saint Memmie, ces informations ont été obtenues non pas en enquêtant un échantillon d'agriculteurs mais par l'interview d'un conseiller expérimenté de la Chambre d'agriculture, connaissant déjà assez bien les agriculteurs non seulement dans la diversité de leurs pratiques de la gestion de l'azote, les logiques à l'oeuvre mais connaissant aussi les états de leurs champs cultivés (biomasses végétales en automne, reliquats d'azote minéral en entrée d'hiver), ainsi que par 3 réunions de travail en 2014 et 2015 avec ses pairs de la Chambre d'agriculture et de coopératives (Gratecap *et al.*, 2016). Cette description a été réalisée au grain du couple de cultures précédent-suivant, afin de rendre compte de l'adaptation des interventions culturales en fonction de la culture précédente, et de l'interaction entre l'effet précédent et l'effet suivant vis-à-vis du risque de pertes de nitrates.

La diversité des situations culturales du territoire a été décrite au travers de 11 couples précédent-suivant, croisés avec 6 grands types de pratiques culturales (en interculture précédant la culture comme pendant la culture) pour chaque type de sol; la Surface Agricole Utile (SAU) associée à chacune des 66 situations a été estimée (Gratecap *et al.*, 2016). L'évaluation *ex post* des émissions de nitrate des différentes situations culturales a ensuite été réalisée avec l'outil Syst'N.

2.2 Typologie des situations culturales évaluées avec Syst'N

Les 66 situations identifiées à Saint Memmie ont chacune été évaluées avec Syst'N pour l'année climatique 2014-15, une année climatique sélectionnée pour sa lame d'eau drainante représentative ; le tableau 1 présente les résultats obtenus pour le sol de rendzine grise, après calage des paramètres de description des champs cultivés à partir des mesures d'azote et des observations de biomasse disponibles (Gratecap *et al.*, 2016) . Cette grille des pertes de nitrate montre une forte variation des pertes suivant les situations, avec des pertes variant pour cette année de 5 à 81 kg/ha/an. Les pertes les plus importantes de plus de 40 kg/ha/an d'azote sous forme de nitrate se situent après un colza sous un blé, après un blé sous l'interculture précédent une culture de printemps, après une orge de printemps avant une betterave sucrière, et enfin après un blé sous une orge d'hiver. Ces pertes importantes sont fréquentes avec les logiques agricoles A, B et C ; elles sont plus exceptionnelles pour

les logiques D, E et F. Les pertes les plus faibles sont obtenues avant, sous ou après la luzerne, sous le colza et après la betterave.

Tableau 1 : Grille de risque de pertes de nitrate par succession de 2 cultures pour St-Memmie. Niveaux de pertes moyens / maximum (*en italique*) exprimés en kg d'azote par hectare et par an, par situation pour le sol rendzine grise (enracinement de 90 cm) et pour l'année climatique 2014-2015 (pluviométrie entre le 1^{er} octobre et le 31 mars = 297 mm/ lame d'eau moyenne = 150 mm, minéralisation annuelle = 110 kg) correspondant au 7^e décile. *Légende* : *ic* = interculture, *ci* = culture intermédiaire, *rep* = repousses, *cult* = culture, *Bett* = betterave sucrière, *Pr* = de printemps, *H* = d'hiver, *PRO* = produit résiduaire organique. Les nuances de gris indiquent les niveaux d'émissions de nitrate suivant 3 classes : moins de 20 kg, de 20 à 40 kg, et plus de 40 kg (source : Bedu et al., 2016)

Logique agricole	Couverture du sol à l'automne	PRO – Type et fréquence	Colza (rep) Blé	Blé (Ci) Cult. Pr	Orge Pr (Ci) Bett.	Blé-Orge H	Luzerne - Blé	Orge Pr-Colza	Orge H Luzerne	Bett.-Blé	Bett.-Orge Pr	Blé-Colza	Luzerne-Luzerne
A	Aucune pratique de couverture des sols	Aucun apport organique	72 kg	60 kg <i>69 kg^C</i>	60 kg <i>70 kg</i>	37 kg	27 kg	13 kg	5 kg	7 kg	13 kg	7 kg	15 kg
B	-Ci semées en septembre en ic longues -Pas de repousses colza	Vinasses tous les 5 ans	61 kg ^C <i>71 kg^C</i>	43 kg <i>53 kg^C</i>	44 kg ^{AB} <i>52 kg^D</i>	37 kg	27 kg	10 kg <i>20 kg^D</i>	5 kg	8 kg ^C	13 kg ^C	9 kg ^{CD}	15 kg
C	-Ci semées mi-août en ic longues	Compost de fientes + vinasses tous les 2 ans	50 kg ^C <i>81 kg^D</i>	38 kg ^D <i>46 kg^D</i>	37 kg ^D <i>43 kg^D</i>	41 kg	27 kg	20 kg ^D <i>34 kg^D</i>	5 kg	8 kg ^{CD}	14 kg ^D	15 kg ^D	15 kg
D		Vinasses tous les 5 ans	43 kg ^C <i>53 kg^C</i>	31 kg <i>39 kg^C</i>	32 kg ^{AB} <i>39 kg^D</i>	38 kg	27 kg	11 kg <i>22 kg^D</i>	5 kg	8 kg ^C	13 kg ^C	10 kg ^{CD}	15 kg
E		Aucun apport organique	53 kg	31 kg <i>39 kg^C</i>	27 kg <i>33 kg</i>	38 kg	27 kg	8 kg <i>16 kg</i>	5 kg	8 kg	13 kg	7 kg	15 kg
F	-Ci semées fin juil. en ic longues -Repousses colza détruites à 2 mois ou plus	Compost de fientes + vinasses 3 années sur 4	21 kg ^C <i>42 kg^D</i>	13 kg ^D	13 kg ^D	47 kg ^D	26 kg	22 kg ^D <i>33 kg^D</i>	6 kg ^C	9 kg ^D	14 kg ^D	15 kg ^D	15 kg

A : Apport organique au semis du suivant, B : Apport organique au semis de la culture intermédiaire, C : Apport organique ou destruction luzerne devant le précédent (en n-1), D : Cumul de deux apports organiques sur les trois dernières années (ou un apport + un retournement de luzerne)

Cette grille de risque permet de comprendre la diversité des pertes suivant les couples de successions de 2 cultures, et suivant la logique avec laquelle est géré l'azote dans le champ cultivé (fertilisations minérale et organique, gestion de l'interculture...).

A partir des couples de cultures successives, chacun peut recomposer des rotations culturales existantes pour évaluer le niveau des pertes à l'échelle pluriannuelle, et qualifier les systèmes de culture tels qu'ils sont pratiqués. Par exemple, la rotation Betterave-Blé-Colza-Blé-Orge de printemps a des pertes de nitrate estimées à 30 kg N/ha/an pour la logique C et à 27 kg N/ha/an pour la logique E.

2.3 Comment les émissions renseignent sur les systèmes de culture à encourager, et a contrario à décourager à Saint Memmie

Cette grille indique que les systèmes à encourager sont plutôt ceux qui s'inscrivent dans les logiques D et E, où l'on cherche à piéger l'azote en automne et où les fertilisations organiques ne sont pas fréquentes sous réserve de ne pas cultiver d'autres cultures de printemps que la betterave. On peut encourager des systèmes de culture avec des apports plus fréquents de produits résiduels organiques, sous réserve d'avoir un piégeage d'azote très efficace (cultures intermédiaires semées en juillet en interculture longue et repousses de colza laissées 2 mois ou plus), ce qui correspond à la logique F.

Par contre, selon ces estimations, sont à décourager les systèmes avec apports de matière organique tous les 2 ans (logique C), ainsi que les systèmes avec vinasse tous les 5 ans seulement mais avec un piégeage d'azote en automne minimal (pas de repousses de colza significatives, et couverts d'interculture longue semés seulement en septembre), selon la logique D. De même, en l'absence d'apports organiques, et de piégeage d'azote significatif en automne en interculture, la logique A basée sur une fertilisation de synthèse généreuse est également à décourager.

L'analyse couple par couple au sein de la rotation complétée par l'analyse au grain du trimestre permise par l'interface de sortie de Syst'N a permis d'identifier les points faibles et de souligner et de comprendre les problèmes que posent ces situations à décourager. Ainsi à Saint Memmie, dans les logiques A, B et C, le colza est une bonne culture suivante (pertes de 7 à 15 kg N/ha/an après un blé), mais une mauvaise culture précédente (pertes de 50 à 81 kg N/ha/an) ; à l'inverse, la betterave sucrière est une bonne culture précédente (pertes de 7 à 14 kg N/ha/an), mais une mauvaise à médiocre culture suivante (pertes de 37 à 70 kg N/ha/an).

Cette caractéristique des « effet précédent » et « effet suivant » des différentes cultures en matière de dynamique de l'azote n'est pas spécifique à ces logiques. Elle se traduit ici par des pertes importantes dans la mesure où les pratiques de gestion de l'azote présentent un certain déséquilibre entre les fertilisations apportées au printemps et/ou en été (notamment les apports de produits résiduels organiques) et les capacités de piégeage de l'azote minéral présent dans le sol en automne avant le début du drainage (couverture du sol à l'automne) ; avec une quantité d'azote disponible dans le sol en automne qui dépasse les capacités d'absorption de cet azote par les couverts présents.

Prise isolément aucune des techniques et cultures citées ci-dessus ne semble à décourager, par contre ce qui apparaît comme nécessaire de décourager ce sont les combinaisons des techniques présentes dans ces logiques A, B et C.

3. Evaluer les émissions agricoles pour structurer un premier plan d'action territorial

L'évaluation des émissions été analysée dans l'activité de construction et de mise en œuvre d'un plan d'action sur l'AAC qui alimente la ville de Briennon-sur-Armançon dans l'Yonne (Paravano *et al.*, 2016). Elle comprend deux captages situés dans les deux communes voisines de Briennon et de Champlost, dont l'aire couvre au total 2612 ha. Des captages situés également en nappes souterraines, comme celui de Saint Memmie.

3.1 Cas d'étude du plan d'action de Briennon

A Briennon, un diagnostic (Paravano *et al.*, 2010), similaire à celui de Saint Memmie, avait souligné les émissions importantes dans la rotation colza-blé-orge courante sur le territoire, notamment sous le blé après le colza (comme après le pois). L'animatrice de l'AAC a alors proposé en 2011 à 8 agriculteurs volontaires une formation-action permettant de comprendre les mécanismes à l'origine des pertes de nitrate sous les parcelles de grandes cultures annuelles, et d'explorer des façons de cultiver qui

permettraient d'obtenir les faibles pertes de nitrate nécessaires sous les champs agricoles, et ceci afin que l'eau des deux captages soit de la qualité requise par les gestionnaires de l'eau. Cette formation-action incluait un atelier de conception (Reau *et al.*, 2012) où chacun des huit agriculteurs a imaginé comment il pourrait obtenir cette qualité d'eau demain sous ses champs en cultivant autrement. Chaque proposition a fait l'objet d'une simulation pour estimer les pertes de nitrate avec l'outil Criter, dérivé de l'indicateur I_N de l'outil Indigo (Bockstaller, 2006). A l'issue de cet atelier, les agriculteurs présents se sont mis d'accord sur une combinaison de pratiques générique, faisable de leur point de vue dans l'ensemble du bassin et performant en termes économique et environnemental (Ravier *et al.*, 2015).

3.2 Construction du projet

Le projet construit a été basé sur le développement d'une rotation ayant au moins deux têtes de rotation (le colza d'hiver plus une culture de printemps), et d'une couverture piège à nitrate réussie tous les ans (une culture intermédiaire en interculture courte comme en interculture longue, des repousses de colza et de pois, ou le colza qui fait office de piège à nitrate l'année de son semis). Résultant de la conception par les agriculteurs, cette « combinaison » a alors été proposée comme guide à l'ensemble des agriculteurs concernés début 2012. Ce guide a obtenu l'accord de la majorité d'entre eux, qui a mandaté les agriculteurs leaders pour le soumettre au comité de pilotage (Paravano *et al.*, 2016).

Le scénario basé sur une généralisation de cette combinaison de pratiques sur les terres agricoles du bassin a été évalué pour l'ensemble du territoire, qui comprend non seulement des terres agricoles (1760 ha), mais aussi des villages et des voiries (247 ha) et de la forêt (656 ha), par intégration des émissions des différentes situations du bassin (agricoles ou pas). Le résultat de ce scénario a été comparé au scénario « avant-projet » en termes d'émissions de nitrate par hectare moyen de l'aire du captage telle qu'elle a été délimitée, et surtout à l'objectif de qualité d'eau et de pertes de nitrates.

Ce scénario a été soumis au Comité de pilotage en juin 2012, qui en a accepté le principe dans un premier temps (Paravano *et al.*, 2016).

La construction d'un projet local agricole par les agriculteurs du territoire a duré 12 mois. Le projet consistait à faire changer la part relative occupée par certaines situations culturales actuelles afin d'avoir de faibles pertes de nitrate.

3.3 Formalisation du projet sous forme d'un tableau de bord et validation par le comité de pilotage

Le volet opérationnel du projet a précisé les actions prévues et les moyens humains et financiers nécessaires pour promouvoir les pratiques ci-dessus et décourager les pratiques problématiques (sols nus en intercultures, levées de couverts ratées, destructions des repousses et des couverts trop rapides...).

Plus original, dans la déclinaison du projet, on a précisé non seulement le niveau de mise en œuvre des pratiques-clés (Chantre, 2011) et le niveau des émissions de nitrate qu'il fallait atteindre, mais aussi les états intermédiaires à obtenir entre ces « deux extrémités de la chaîne », organisés dans un tableau de bord. Les travaux de Girardin *et al.* (2005) sur le tableau de bord, qui décline un modèle conceptuel des liens de cause à effet entre les pratiques agricoles sur le territoire et la qualité de l'eau, ont inspiré cette démarche. Pour atteindre l'objectif de concentration de l'eau aux captages, quelle quantité d'azote minéral dans les sols en entrée d'hiver dans les terres agricoles ? Pour cela, quelles quantités d'azote doit-on piéger dans les couverts et le colza ? Et quelles dates de levée et quelles dates de destruction cela suppose-t-il ? Il s'agissait de s'assurer de la cohérence entre les actions prévues et les objectifs concrets, de vérifier si le scénario résultant de la phase précédente se réalisait ou non, c'est-à-dire si les actions envisagées permettaient d'obtenir les résultats intermédiaires attendus, et au final la qualité de l'eau requise, en s'appuyant sur les connaissances disponibles et les modèles d'émissions de nitrate (ici CRITER dérivé d'Indigo, Syst'N et Burns).

Après la construction du tableau de bord, la dernière étape a consisté à déterminer les observations, les mesures et les enregistrements des informations à collecter pour le renseigner. Un observatoire a été organisé portant sur des pratiques-clés de gestion de l'azote (périodes d'implantation et de destruction des couverts et repousses observées dans chaque champ), des états des champs cultivés (qualité des couverts et repousses observés dans chaque champ, quantité d'azote lessivable dans le sol mesurée en entrée d'hiver dans un champ sur quatre) et de la qualité de l'eau (teneurs en nitrate mesurées aux deux captages tous les mois). Ces données observées et mesurées ont ensuite été traitées et agrégées afin de renseigner les indicateurs de résultats nécessaires au tableau de bord, chaque indicateur étant défini par un grain spatio-temporel, une variable et deux seuils de résultat attendu. Le tableau de bord est donc renseigné sur la base d'observations et de mesures largement collectées sur le terrain et agrégées sur la base de la connaissance de chaque champ, et non uniquement d'informations sur les pratiques agricoles enregistrées, déclarées par les agriculteurs et traitées dans un calculateur.

Ce tableau de bord et la façon dont il permet d'animer un plan d'action pour le territoire a été présenté au comité de pilotage et validé par ce comité. C'est donc sur cet outil dynamique d'évaluation que s'appuie le projet local agricole.

4. Evaluer les émissions agricoles pour gérer la reconception en dynamique

4.1 Cas de la reconception à Brienon

A partir de 2013, une édition annuelle de l'état du tableau de bord du territoire a permis d'éclairer le comité de pilotage sur la conformité des actions et des résultats obtenus dans les champs et dans l'eau. Ce faisant, il permet au comité de jouer son rôle dans le pilotage stratégique et contribuer à la dynamique du plan d'action. Le tableau de bord a alors changé de statut : il n'est plus seulement l'expression du plan d'action du territoire mais aussi l'outil central pour l'accompagnement du projet. Décliné chaque année, il sert non seulement au comité de pilotage à orienter le projet, mais aussi à l'animation agricole pour partager, questionner et mettre en discussion les résultats obtenus, en comparaison aux résultats attendus. Il contribue ainsi à réorienter les actions à chaque fois que les résultats obtenus sont éloignés de ce qui était attendu. L'évaluation est au cœur de cette dynamique : c'est bien la comparaison des résultats attendus et obtenus qui fait fonctionner la discussion autour du tableau de bord, ainsi que la compréhension des relations de cause à effet qui relient les pratiques à des impacts.

L'objectif est d'avoir peu d'azote minéral dans le sol en automne et de perdre peu d'azote par lessivage. On parle bien ici de réussir les couverts du point de vue du résultat attendu pour la qualité de l'eau, et non de s'en tenir à la stricte application de la réglementation en vigueur (au titre de la Directive nitrate notamment).

Cultiver autrement pour les agriculteurs de l'AAC se base sur un objectif d'état des champs cultivés, facilement identifiable par tous à l'automne avant le début du drainage : des couverts d'interculture longue et des repousses de colzas et pois réussies, c'est-à-dire denses, homogènes, avec une période de croissance suffisante.

Ces observations ont été réalisées en particulier lors d'un tour de plaine regroupant les agriculteurs des captages chaque année : au mois de septembre, le 9 en 2013, le 12 en 2014, le 10 en 2015, et le 13 en 2016. Plus généralement, l'activité de l'observatoire a consisté à réaliser au champ des diagnostics sur la réussite des couverts, et sur les quantités d'azote disponibles dans ces champs cultivés compte tenu de la biomasse et de l'état de nutrition de ces couverts. Malgré des années climatiques plus ou moins favorables aux levées de cultures en été, chaque année des agriculteurs ont réussi leurs couverts, et globalement la réussite des couverts fut de 66% en 2013, 70% en 2014, 54% en 2015 et 66% en 2016. Elle a consisté également à réaliser des pronostics de quantité d'azote minéral présent dans le sol en

fonction de l'état des couverts, mais aussi des risques de lessivage en fonction des mesures d'azote minéral dans le sol en octobre ou novembre.

4.2 Le tableau de bord comme outil pour la reconception du plan d'action

A Briennon, l'ensemble de ces mesures et observations a été rassemblé dans un tableau de bord au travers de 5 composantes (Figure 2).

Cette figure représentant l'édition 2013-2014 du tableau de bord indique que la réussite des pratiques a été faible pour les repousses spontanées et moyenne pour les couverts semés (moins de 60% des surfaces concernées avaient des repousses denses, homogènes, présentes jusqu'à mi-septembre, et 80% des couverts étaient levés dès début septembre). Malgré cela l'objectif de moins de 60 kg/ha d'azote minéral présent en novembre a été atteint, et il y a eu peu de fuite d'azote sous forme de nitrate, avec moins de 30 kg/ha d'azote perdu par lessivage cette année-là.

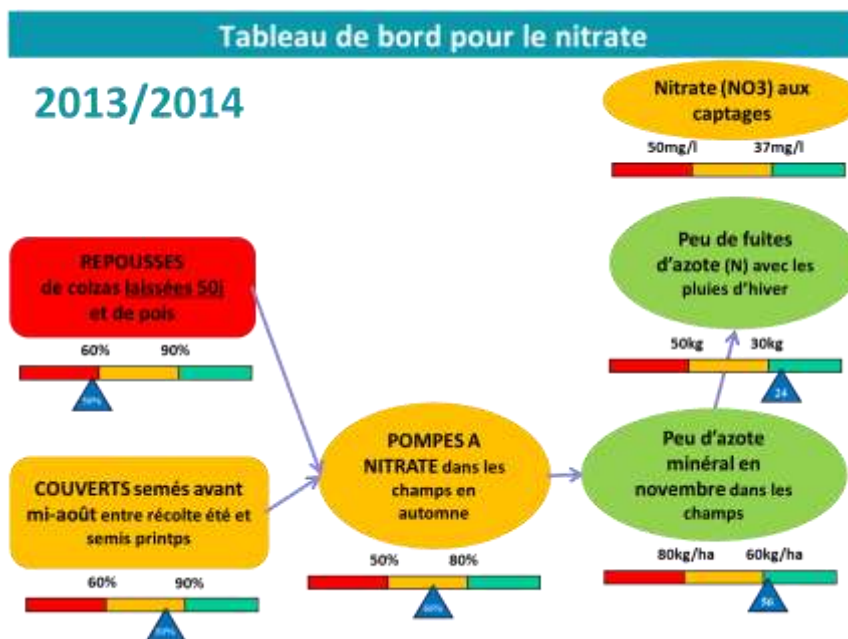


Figure 2 : Tableau de bord de Briennon dans son édition de 2013-14. Pour chacun des 5 indicateurs, 2 seuils ont été choisis, et le triangle bleu positionne le résultat obtenu pour chaque indicateur lors de cette campagne à l'échelle du territoire.

Mais les éditions du tableau de bord des années suivantes ont montré moins de réussites.

En 2015, la surface agricole avec un couvert efficace est passée à 57 % pour les repousses spontanées et 62% pour les couverts semés. Devant le relâchement des céréaliers dans le contexte d'une année sèche après les moissons, des agriculteurs et la REGATE, la collectivité qui gère les captages d'eau potable, ont réagi en proposant à partir de 2016, un contrat d'engagement signé entre la REGATE et chaque agriculteur afin de remobiliser l'ensemble des agriculteurs sur cette pratique centrale de piégeage d'azote en fin d'été et en automne. Ce contrat prévoit notamment un contrôle de la couverture efficace des sols effectué par un agent de la REGATE, traduisant ainsi un engagement supplémentaire du gestionnaire de l'eau comme des agriculteurs de l'AAC.

On a trouvé en moyenne 56, 68, 61 et 67 kg/ha d'azote minéral dans les sols au cours de 4 premières années du plan d'action. Une analyse approfondie a montré que cette moyenne annuelle plus élevée

qu'attendue, provenait de valeurs particulièrement fortes chez les éleveurs et les autres utilisateurs de produits organiques épandus. Malgré des pompes à nitrate assez bien réussies, il restait trop d'azote minéral dans le sol dans leurs champs cultivés.

Cette analyse corroborée par plusieurs années de mesures a conduit les éleveurs à reprendre le travail de conception de systèmes démarré en même temps que les céréaliers en 2011 afin de proposer en 2017-2018 des façons de cultiver intégrant davantage leurs spécificités, sachant que la réussite de couverts selon les règles définies au départ ne semble pas suffisante chez certains d'entre eux.

Cette activité pourra conduire à des actions spécifiques des éleveurs, et peut être à compléter le tableau de bord actuel, si le plan d'actions change.

4.2.1 Apprentissage des acteurs : pronostic et diagnostic des pertes

Cinq ans d'observations et de mesures pour alimenter les tours de plaine et le tableau de bord, ont alimenté une base de données permettant de caractériser le ou les régimes d'azote en place dans chaque exploitation. Ces informations ont permis d'estimer à l'échelle pluriannuelle de leurs principales rotations le reliquat d'azote minéral présent sur 90 cm de sol dans chaque exploitation, en liaison avec la quantité d'azote piégé en automne par les parties aériennes des couverts, les repousses et le colza venant d'être semé (Figure 3).

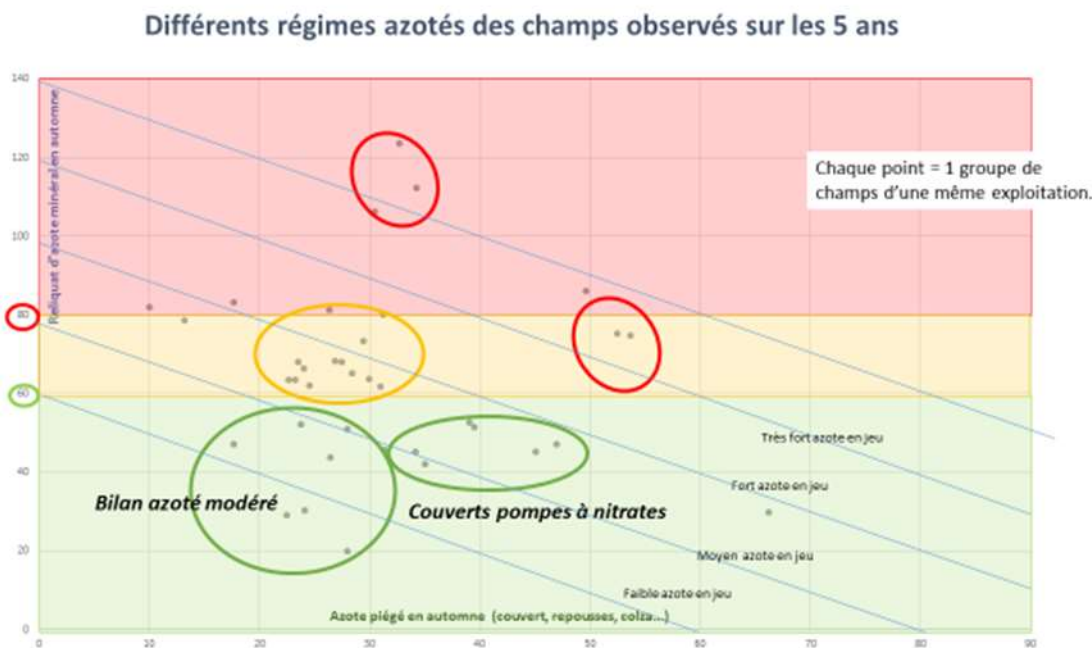


Figure 3 : Reliquat d'azote minéral dans 90cm de sol et quantité d'azote contenue dans les couverts à l'automne, exprimés en kg/ha/an d'azote en moyenne annuelle de la rotation. Les lignes tracées en diagonales correspondent aux droites d'iso-azote en jeu (somme du reliquat et de l'azote contenu dans les couverts). Les valeurs de 60 et 80 kg/ha/an correspondent aux seuils de reliquat d'entrée d'hiver jugé respectivement réussi et acceptable à l'échelle de l'ensemble du territoire.

Le reliquat d'azote minéral y varie de 20 à plus de 120 Kg/ha/an. Si l'on considère que compte tenu du pédo-climat, la moitié de ce reliquat est lessivé en année médiane, ce sont 10 à plus de 60 unités d'azote qui sont lessivées en moyenne de la rotation dans ces exploitations. Sachant que l'objectif est de limiter les pertes d'azote à moins de 30 kg/ha/an, soit moins de 60 kg/ha de reliquat d'automne, une partie de ces situations (situées dans la zone verte du graphique) atteint cet objectif, la majorité des situations ne s'écarte que d'une dizaine d'unité de cet objectif de reliquat, mais 12 situations le dépassent de 10 à plus de 60 kg/ha.

Les 3 situations les plus élevées en reliquats (situées dans la zone rouge du graphique) correspondent à des piégeages d'azote modérés entre 30 et 40 kg/ha/an. Cependant, 3 autres situations qui correspondent à des piégeages importants de 50 à 60 kg/ha/an, ont, malgré tout, des reliquats élevés compris entre 70 et 90 kg/ha : ici ce fort piégeage n'est pas suffisant pour laisser peu d'azote dans le sol. Tout se passe comme si la quantité d'azote disponible en automne dans le sol, estimée par l'azote en jeu (la somme du reliquat et de l'azote piégé à la même date) y est très importante au point de saturer la capacité de piégeage automnal.

4.3 Identification des nouvelles pratiques : 7 façons de faire de l'eau propre

Cette figure 3 révèle également que certains agriculteurs obtenant un reliquat moyen de moins de 60 kg/ha/an y parviennent avec un piégeage faible alors que d'autres passent par un piégeage important. En effet, des faibles reliquats ont été obtenus avec des piégeages de moins de 25 kg/ha/an comme avec des piégeages de plus de 45 kg/ha/an. Un piégeage de plus 35 kg/ha/an accroît la probabilité de reliquats faibles. Par contre un piégeage aussi élevé n'est pas nécessaire, car on arrive à atteindre l'objectif dans 9 situations ayant piégé moins de 35 kg/ha/an : ce sont des situations où l'azote en jeu est inférieur à 80 kg/ha/an, correspondant à un régime où le bilan azoté est modéré.

L'analyse individuelle de chacune des situations avec de faibles reliquats en entrée d'hiver a permis d'identifier 7 principales façons de cultiver conduisant à de faibles pertes d'azote qui ont été décrites via leurs schémas décisionnels (Reau *et al.*, 2016). Certaines façons de cultiver sont clairement dans la lignée du guide qui a été mis en avant dans le projet (Figure 4). D'autres situations aussi efficaces sont aujourd'hui plus originales car elles se basent plus sur une maîtrise de la fertilisation au printemps et en été, que sur un piégeage d'azote du sol à l'automne.

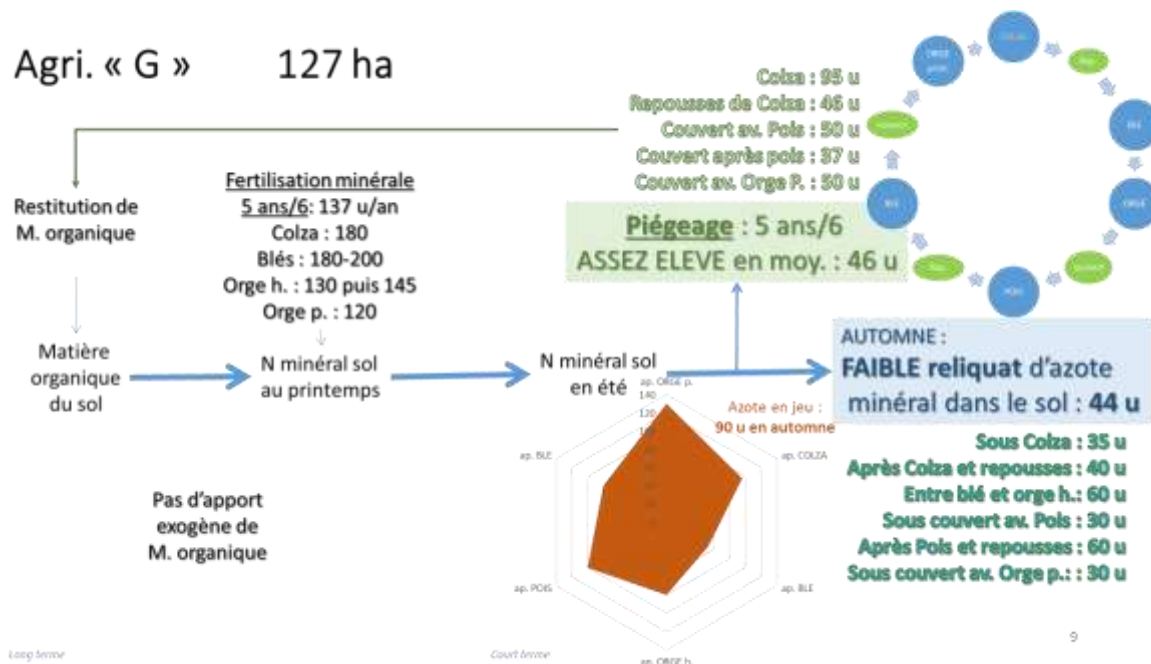


Figure 4 : Exemple d'une façon de cultiver fournissant de l'eau propre de l'exploitation G, précisant les quantités d'azote contenues dans les couverts ainsi que les quantités d'azote minéral mesurés dans le sol au cours de la rotation des cultures.

4.4 Des changements et une évolution rapide des résultats du territoire

Le tableau de bord renseigné durant les 3 premières éditions rend compte de l'évolution des résultats. En 2012/13, les quantités d'azote potentiellement lessivable mesurées en automne s'élevaient à 78 kg par hectare en moyenne sur la surface cultivée du territoire, et les pertes d'azote sous les champs

pendant l'hiver calculées avec le modèle de Burns étaient estimées à 46 kg N/ha. En 2013/14, les résultats en termes d'azote potentiellement lessivable étaient de 56 kg par hectare, et les pertes d'azote estimées étaient de 24 kg par hectare : les deux objectifs essentiels étaient donc atteints. En 2014/15, la couverture des sols était plus réussie qu'en 2013, mais les quantités d'azote potentiellement lessivable s'élevaient à 68 kg par hectare, et les pertes estimées cette année-là se limitaient finalement à 27 kg par hectare (Paravano *et al.*, 2016), grâce à une année peu pluvieuse.

La démarche mise en œuvre dans cette AAC a ainsi permis des changements rapides et importants dans les valeurs des reliquats d'automne et des pertes par lessivage. Mais les résultats obtenus restent fragiles dans le bassin, car le double objectif n'a été atteint qu'une seule fois en 2013/14 depuis le démarrage du projet.

En résumé, l'évaluation qui a été abordée dans ces AAC vise à évaluer non seulement les émissions de nitrate par les champs cultivés, mais aussi celles de l'ensemble des surfaces agricoles puis de l'aire totale délimitée, afin d'estimer la capacité du territoire à produire de l'eau de qualité pour le captage. En *ex ante* (conception initiale et construction du projet), cette évaluation a mobilisé avant tout les pratiques envisagées demain par ou pour agriculteurs et des outils de simulation. En *ex post* (diagnostic territorial initial, tableau de bord), l'évaluation a porté sur les états observés des champs cultivés comme sur les pratiques des agriculteurs.

5. Les usages de l'évaluation dans les AAC et la place des outils prédictifs

5.1 Une évaluation à différentes facettes

Les évaluations des émissions de nitrate présentées ici ont été déclinées suivant deux échelles spatiales du champ et du territoire dans son ensemble. Le diagnostic territorial met en avant deux échelles temporelles importantes : celle de la succession de deux cultures, et celles de la rotation complète des cultures. La première échelle est particulièrement intéressante pour analyser les émissions dans les régions avec des rotations longues, souples et diversifiées, comme en Champagne et en particulier à Saint Memmie. La seconde a été utilisée pour caractériser la diversité des 7 différents systèmes de culture produisant de l'eau propre à Brienon en Bourgogne.

L'évaluation de la mise en œuvre des pratiques promues dans le plan d'action est bien présente dans le tableau de bord de Brienon. Mais cet exemple montre qu'il est important d'éviter d'utiliser ces indicateurs de « pratiques » de façon isolée, sans lien avec des indicateurs d'émissions plus en aval dans le processus de cause à effet. Car ce genre d'évaluation, focalisée sur les pratiques, aurait entraîné à décourager les façons de cultiver mobilisant peu les couverts pompes à nitrate (dits à « bilan azoté modéré » dans la figure 2), alors que les émissions de nitrate y sont faibles. Ce résultat performant est obtenu chez des céréaliers dans des parcelles fertilisées de façon modérée alors que le piégeage d'azote reste faible. Cet exemple renforce l'intérêt de procéder à des évaluations des émissions de nitrate dans les AAC, et montre les limites des diagnostics de conformité des pratiques, comme d'une évaluation se résumant à une analyse de l'évolution des pratiques.

L'évaluation des émissions de nitrate dans les AAC alterne des analyses des résultats des pratiques actuelles (*ex post*) lors du diagnostic territorial initial et lors des diagnostics intermédiaires, avec des évaluations de prototypes ou de projet (*ex ante*) au moment de la construction du projet initial pour valider les éventuelles nouvelles façons de cultiver proposées (conception de systèmes avec des agriculteurs) ou encore pour reconcevoir des systèmes de culture et/ou le plan d'action tant qu'ils ne sont pas réussis.

5.2 Focus sur l'évaluation *ex post* des résultats des champs cultivés et de l'AAC

En ce qui concerne l'évaluation *ex post* des émissions, compte tenu de l'incertitude dans les calculs des émissions avec les modèles mobilisant avant tout des pratiques agricoles en entrée, les exemples présentés ci-dessus soulèvent l'importance de pouvoir mobiliser des observations et des mesures dans les champs cultivés pour évaluer les émissions de nitrate. Ces informations sont essentielles soit pour évaluer simplement les risques de pertes de nitrate à partir de la connaissance de l'azote minéral dans le sol au début du drainage (avec le modèle de Burns pour les sols nus par exemple), soit pour caler des modèles plus complexes qui explicitent les états intermédiaires qui font l'objet de mesures et ou d'observations (comme Syst'N).

Le tableau de bord rassemble les observations et les mesures réalisées dans les champs cultivés, les intègre à l'échelle du territoire de l'AAC, en rendant explicite l'écart entre ce qui a été obtenu et ce qui était attendu pour les pratiques et les états intermédiaires mesurables : les pratiques agricoles, les états des cultures et l'azote minéral dans le sol notamment (Jean-Baptiste *et al.*, 2016). De plus, il comprend des variables calculées à partir d'observations ou de mesures réalisées en aval comme les émissions de nitrate. L'exemple de Briennon a montré comment cette analyse d'ensemble chaque année a permis de détecter et de répondre à un défaut de mobilisation de céréalières dans la pratique du piégeage de nitrate, de ne pas crier « victoire » une année où les pertes de nitrate et les émissions étaient faibles, grâce à une année climatique extrêmement favorable, alors que la quantité d'azote minéral dans le sol restait assez élevée. Le tableau de bord a été utilisé dans cette AAC comme un moyen de quantifier l'écart entre les émissions de nitrates obtenues et les émissions attendues, en se donnant les moyens de comprendre et d'expliquer comment ce niveau d'émissions a été obtenu en termes de pression et de pratiques. Aussi ne faut-il pas confondre ce type de tableau de bord initié par Girardin *et al.* (2005) avec de simples tableaux de chiffres alignant des critères calculés à partir des caractéristiques des sols et du climat, basés uniquement sur des pratiques déclarées par les agriculteurs sans observation aux champs, et sans référence à un résultat attendu.

5.3 Retour sur les outils d'estimation des émissions de nitrate

Trois différents outils d'estimation des émissions de nitrates ont été utilisés ci-dessus : le modèle de Burns, Indigo et Syst'N.

Leur rôle a consisté à : i) trier parmi les façons de cultiver existantes, celles à encourager comme celles à décourager dans le diagnostic initial, ii) valider les nouvelles façons de cultiver proposées par les agriculteurs, iii) identifier un scénario prometteur pour l'ensemble du territoire de l'AAC, iv) définir les résultats attendus de ce scénario non seulement en terme d'émissions mais aussi en terme d'états des champs cultivés (pression d'azote minéral dans le sol en automne, biomasse et azote assimilé par les cultures...) pour proposer des indicateurs comprenant deux seuils de réussite, v) réaliser un pronostic des pertes de nitrate au champ après la mesure de l'azote minéral dans le sol, vi) calculer les résultats obtenus chaque année par certains indicateurs du tableau de bord qui ne sont pas directement mesurés ou observés : le risque d'émission de nitrate *a priori*, et le niveau d'émission de nitrate *a posteriori*.

Si le modèle de Burns a été utilisé avant tout pour les deux derniers points, seuls les deux autres outils l'ont été pour les autres points précédents. Ces outils ont été manipulés par les chargés d'études ou les animateurs d'AAC pour produire des ressources à destination des agriculteurs et des autres partenaires. Parfois, les sorties de certaines interfaces de Syst'N ont été présentées et utilisées directement ; en effet la présentation des dynamiques d'évolution des émissions de nitrates au cours des cycles culturaux et des rotations des cultures présente un intérêt didactique certain (Hannebert, 2015).

Cependant, ces deux outils manquent encore de fiabilité pour reproduire l'absorption des cultures en fin d'été. Indigo parce qu'il travaille à un pas de temps long en considérant que l'azote du sol est d'abord absorbé, puis que le lessivage n'intervient qu'une fois l'absorption d'automne terminée ; ce qui ne correspond pas à la réalité de certaines années climatiques avec un lessivage précoce de fin d'été ou de début d'automne comme l'a observé dans les dispositifs expérimentaux du Magneraud (Bouthier, communication personnelle). Quant à Syst'N, bien qu'il travaille à un pas de temps journalier, il a du mal à rendre compte de l'aléa des dates de levée en fin d'été, ce qui le rend insuffisant pour rendre compte de l'absorption d'azote des cultures semées en été. Compte tenu de ces limites, ses utilisateurs sont encouragés à caler les simulations à partir des biomasses et des dates de levées observées. A terme ses concepteurs envisagent la possibilité d'intégrer par exemple les dates de levée dans l'interface d'entrée au lieu des dates de semis.

Enfin les limites de ces trois outils restent qu'ils travaillent à l'échelle de l'espace du champ cultivé. Ils ne permettent ni de travailler directement à l'échelle de l'ensemble des parcelles (agricoles ou pas) du territoire, ni d'intégrer le transfert et la transformation du nitrate hors de ces parcelles jusqu'au point de captage de l'eau potable.

Conclusion

Les évaluations des émissions de nitrates issus des champs agricoles sont parfois utilisées au cours des études préalables comme dans la construction initiale et la gestion des plans d'actions des AAC.

L'analyse de leur utilisation montre qu'elles sont mobilisées à différents moments des projets pour contribuer à réaliser des diagnostics de l'existant comme pour la conception du projet de territoire : identifier les façons de cultiver à encourager, faire le diagnostic des problèmes posés par les façons de cultiver à décourager, concevoir de nouvelles façons de cultiver, concevoir un projet pour le territoire, contribuer à l'analyse *in itinere* des résultats du projet pour sa re-conception pas à pas. Ces évaluations développent les connaissances des acteurs sur le fonctionnement des territoires et contribuent ainsi à leur apprentissage (Reau *et al.*, 2013 ; Chantre, 2011).

Les mesures d'azote minéral dans le sol et les observations des biomasses et des quantités d'azote qu'elles contiennent restent les outils les plus pertinents pour estimer les émissions de nitrates et la dynamique de l'azote dans ces champs cultivés, comme pour servir d'outil d'apprentissage, d'aide à la décision et de médiation.

Les outils de simulation ont un rôle complémentaire pour extrapoler les émissions au-delà de l'échantillon des champs qui fait l'objet de mesures afin de caractériser l'ensemble du territoire, pour estimer la quantité d'azote lessivé, et la qualité de l'eau à attendre ; et enfin pour évaluer les résultats à attendre de nouvelles façon de cultiver, ou d'un nouveau scénario pour le territoire.

L'outil Syst'N présente un certain nombre d'avantages pour réaliser ces dernières évaluations. Il a cependant besoin d'être utilisable pour une plus grande diversité de cultures, et demain de pouvoir être renseigné en entrée pas seulement par des pratiques culturelles mais aussi par des états intermédiaires comme la date de levée, et les quantités de biomasses et d'azote contenus dans les cultures et dans le sol.

Références bibliographiques

Bedu M., Gratecap J-B., Pucel F., Parnaudeau V., Reau R., 2016. Développer le diagnostic des pertes de nitrate dans les AAC en utilisant l'outil de modélisation Syst'N. Synthèse de l'application sur 9 territoires contrastés. Rapport ONEMA et INRA, Action 2013-2015 : Diagnostic pression – impact N et P à l'échelle nationale et des territoires, 33 p.

Bockstaller C., Gaillard G., Baumgartner D., Freiermuth Knuchel R., Reinsch M., Brauner R., Unterseher E., 2006. Méthodes d'évaluation agri-environnementale des exploitations agricoles : Comparaison des méthodes INDIGO, KUL/USL, RE-PRO et SALCA. Rapport final programme III, projet 4, Colmar, ITADA, 112 p.

Burns I.G., 1974. A model for predicting the redistribution of salts applied to fallow soils after excess rainfall or evaporation. *Journal of Soil Science* 25, 165-178.

Chantre E., 2011. Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d'intrants en grandes cultures: Cas de la Champagne Berrichonne de l'Indre dans les années 1985-2010. Thesis (PhD), AgroParisTech, Paris Institute for Life, Food and Environmental Sciences, 397 p.

Corpen, 2006. Des indicateurs Azote pour gérer des actions de maîtrise des pollutions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire, 113 p.

Dupas R., Parnaudeau V., Reau R., Jeuffroy M.H., Durand P., Gascuel-Oudou C., 2015. Integrating local knowledge and biophysical modeling to assess nitrate losses from cropping. *Environmental modelling & software* 69, 101-110.

Girardin P., Guichard L., Bockstaller C., 2005. Indicateurs et tableaux de bord: guide pratique pour l'évaluation environ-nementale. Lavoisier Tec & Doc, 40 p.

Gratecap J-B., Pucel F., Bedu M., Parnaudeau V., Reau R., 2016. Diagnostic des émissions de nitrate dans l'aire d'alimentation de captage de Saint Memmie. Rapport INRA ONEMA, 65 p.

Hannebert B., 2015. Développement de l'outil Syst'N pour le diagnostic des pertes d'azote. Analyse des usages et modélisation des cultures associées. Mémoire d'ingénieur de l'ISARA-Lyon, 77 p.

Jean-Baptiste S., Guichard L., Reau R., 2016. Guide d'aide à la réalisation du diagnostic des pressions et des émissions agricoles (DTPEA). Version test. INRA, ONEMA, 101 p.

Jean-Baptiste J.B., Guichard L., Reau R., 2017. Co-construction d'un guide pour le diagnostic territorial des pressions et émissions agricoles. *Innovations Agronomiques*, à paraître.

Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J-M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science* 50, 549-566.

Meynard J.-M., Dedieu B., Bos A.P. (Bram), 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: I. Darnhofer, D. Gibbon, and B. Dedieu (Eds), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer Netherlands, p 405-429.

Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche et Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2013. « Guide méthodologique : Protection d'aire d'alimentation de captage en eau potable », 103 p.

Paravano L., Duchenes V., Prost L., Reau R., 2010. Améliorer le diagnostic territorial des captages "Grenelle" par une analyse pluriannuelle des pressions agricoles. Diagnostic territorial des pressions agricoles des captages de la Croix Rouge et Lauduchy (département 89). Communication et Poster au colloque du GIS HP2E, Paris.

Paravano L., Prost L., Reau R., 2016. Brienon-sur-Armançon : pilotage dynamique des actions d'un territoire à enjeu nitrate, à l'aide d'un observatoire et d'un tableau de bord. *Agronomie, environnement et sociétés* 6, 1(15), 127-133.

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. <http://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2012/Volume-21-Septembre-2012>.

Ravier C., Prost L., Jeuffroy M.H., Wezel A., Paravano L., Reau R., 2015. Multi-criteria and multi-stakeholder assessment of cropping systems for result-oriented water quality action program. *Land Use Policy* 42:131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.07.006>.

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* 20, 5-33. <http://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2012/Volume-20-Juillet-2012>.

Reau R., Guichard L., Chantre E., 2013. Evaluation agri-environnementale pour les apprentissages des acteurs des aires d'alimentation de captage. *Innovations Agronomiques* 31, 91-110. <http://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2013/Volume-31-Octobre-2013>.

Reau R., Cros C., Leprun B., Mérot E., Omon B., Paravano L., 2016. La construction des schémas décisionnels et leurs mobilisations dans le changement des systèmes de culture. *Agronomie, environnement et sociétés* 6, 2(14).

Walters C.J., 2007. Is Adaptive Management Helping to Solve Fisheries Problems? *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36(4), 304-307.

<http://www.inra.fr/Grand-public/Agriculture-durable/Tous-les-magazines/Cultiver-de-l-eau-propre>

<https://www6.rennes.inra.fr/umrsas/Outils-et-dispositifs/Outils/Syst-N>

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL)