

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org

Reconquérir la qualité de l'eau en régions de grandes cultures : agriculture biologique et reconnexion avec l'élevage

J. Anglade^{1,2}, G. Billen², J. Garnier²

Le suivi sur une longue période des flux de nitrates de deux aires d'alimentation de captages, en Brie laitière et dans les Plateaux de Bourgogne, montre que le respect des normes du Comifer ne suffit pas pour préserver la qualité de l'eau souterraine avec les systèmes de production actuels. Quels systèmes de production alternatifs envisager ? Différentes pistes sont explorées.

RÉSUMÉ

Le bilan de surface d'azote permet d'évaluer sur le long terme les pertes environnementales d'azote d'un système de production. Dans les 2 zones étudiées (bassin de l'Orgeval et Plaine du Saulce), les systèmes de production céréaliers, même avec une fertilisation minérale ajustée au plus près des besoins des plantes, conduisent à des pertes d'azote incompatibles avec la pérennité de la qualité de l'eau. Différents systèmes sont ainsi évalués (les systèmes existant dans les années 50, les systèmes actuels intensifs et en agriculture biologique). Les systèmes de polyculture-élevage biologiques (basés sur la fixation d'azote par les légumineuses fourragères) ont des pertes encore inférieures, tout en présentant des performances agronomiques intéressantes. Ils pourraient être mis en place, avec production de Brie ou élevage ovin respectivement dans ces 2 territoires.

SUMMARY

Restoring water quality in cash-crop regions via organic agriculture and renewed links with livestock farming

Long-term monitoring of nitrate fluxes has been carried out in 2 catchment areas, one in the Brie dairy region and the other on the Burgundy plateau. The results show that grain production systems -even those in which mineral fertilisers are carefully adjusted to track plant needs- lead to nitrogen loss and thus compromise continued water quality. Consequently, which alternative production systems should be employed? Using the soil surface balance (SSB) method, it is possible to estimate the long-term environmental loss of nitrogen from given production systems. Here, we thus evaluated pre-industrial systems utilised in the 1950s, intensive and organic farming systems utilised at present. Organic mixed crop-livestock systems lost less nitrogen while maintaining respectable levels of agricultural performance. Such systems could be used to produce cheese (Brie) or sheep (Burgundy).

Les régions de grandes cultures, particulièrement celles du nord de la France, connaissent depuis plusieurs décennies une dégradation importante de la qualité de leurs eaux souterraines et de surface liée de façon prépondérante à la pollution agricole diffuse en nitrate et en pesticides (BILLEN *et al.*, 2013b).

Plus de 400 captages ont ainsi dû être fermés au cours des 10 dernières années dans le bassin de la Seine (DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ, 2012), pour cause de

dépassement des normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, fixées respectivement à 50 mg NO₃/l (11,3 mg N/l) pour les nitrates et à 0,5 µg/l pour la concentration totale en pesticides (directive 98/83/CE). Cette contamination s'explique notamment par l'ouverture des cycles biogéochimiques amenée par la généralisation de l'usage des engrais de synthèse, rompant avec la logique d'équilibre culture - élevage qui a dominé en Europe occidentale depuis au moins le XII^e siècle (MAZOYER et ROUDART, 1997).

AUTEURS

1 : UR055 Aster, INRA, 662, av. Louis Buffet, F-88500 Mirecourt ; juliette.anglade@inra.fr

2 : UMR 7619 METIS, Sorbonne Universités, Université de Paris 06, CNRS, EPHE, 4, place Jussieu, F-75005 Paris

MOTS CLÉS : Agriculture biologique, bilan d'azote, Bourgogne, céréales, environnement, évolution, fertilisation raisonnée, gestion du territoire, Ile de France, intensification, lessivage, luzerne, nitrate, qualité de l'eau, ressources hydrologiques, système de culture, système d'exploitation, système fourrager.

KEY-WORDS : Alfalfa, Burgundy, cereals, change in time, crop system, environment, farming system, forage system, hydrological resources, Ile de France, intensification, land management, leaching, nitrate, nitrogen balance, organic farming, rational fertilisation, water quality.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Anglade J., Billen G., Garnier J. (2017) : «Reconquérir la qualité de l'eau en régions de grandes cultures : agriculture biologique et reconnexion avec l'élevage», *Fourrages*, 231, 257-268.

Les politiques publiques en matière de gestion de la contamination nitrique ont principalement encouragé le raisonnement de la fertilisation azotée (via les préconisations du CORPEN (Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement) et du COMIFER (Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée) et l'usage de CIPAN (cultures intermédiaires pièges à azote). Nous montrerons ici que **la généralisation des pratiques de l'agriculture raisonnée**, devenues réglementaires dans le cadre des nombreux programmes d'action de la directive Nitrates (91/676/CEE), a sans conteste permis des progrès significatifs depuis les années 1980, mais a aujourd'hui atteint ses limites et **ne peut que stabiliser une situation déjà fortement dégradée**.

Une approche plus holistique nous apparaît comme **indispensable pour concilier la poursuite d'une activité agricole performante avec les exigences de la production d'une eau de qualité pour la consommation humaine et la préservation des écosystèmes aquatiques ; elle inclut la reconception des systèmes de production dans leur ancrage territorial** et s'inscrit dans le mode de production biologique qui proscrit l'usage des engrais et des pesticides de synthèse et limite la concentration des animaux. Nous proposons un cadre technique d'analyse, basé sur une description territoriale des flux d'azote, pour servir une compréhension partagée de l'état des lieux et des impacts de différents scénarios de changement. Il s'agira notamment, en s'appuyant sur une évaluation chif-

frée, de lever un certain nombre d'interrogations, voire de controverses, entourant les performances agronomiques et environnementales de l'agriculture biologique.

Notre démonstration sera basée sur l'exemple de deux territoires représentatifs de ces régions jadis occupées par une polyculture - élevage traditionnelle, mais aujourd'hui spécialisées dans une agriculture céréalière spécialisée, d'où le bétail a été progressivement exclu et pour lesquels nous imaginons des scénarios de reconnexion entre cultures et élevage.

1. Description des sites et de leurs enjeux spécifiques

■ La Plaine du Saulce

Laire d'alimentation des captages de la Plaine du Saulce, dans l'Auxerrois (Yonne, figure 1a), sera notre premier exemple. Elle couvre une surface de 86 km² dominée par les activités agricoles (75 exploitations) et les forêts occupent un peu plus d'un quart de la superficie. Mis à part les petites exploitations viticoles (sous l'appellation Coulanges-la-Vineuse) ou arboricoles (cerise de bouche), la majorité des exploitations sont de grandes cultures, avec un assolement principalement composé de colza, blé et orge d'hiver (Co, B, Oh). Les sols dominants sont superficiels et filtrants (petites terres de Bourgogne).

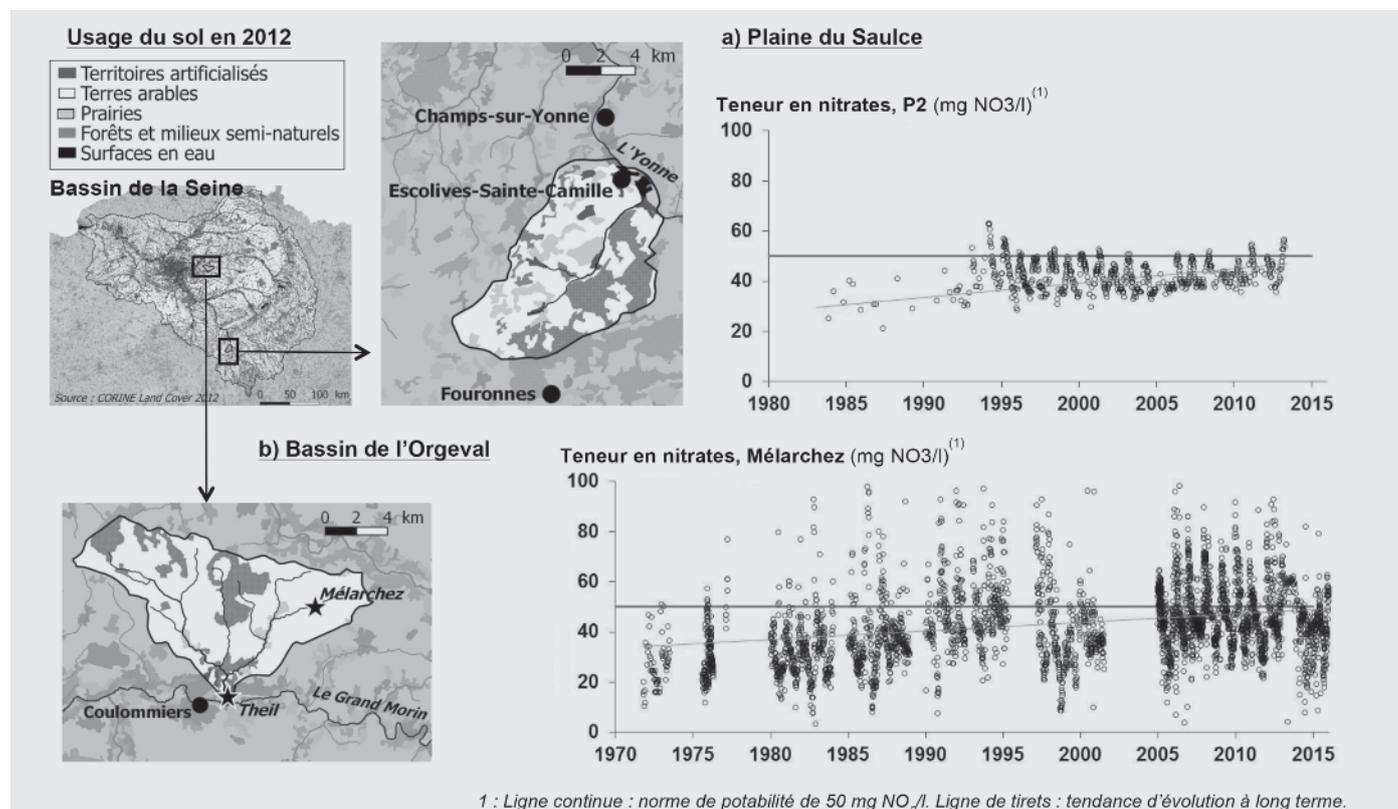


FIGURE 1 : Situation de l'aire d'alimentation des captages de la Plaine du Saulce (a) et du bassin de l'Orgeval (b) et évolution de leurs concentrations en nitrates.

FIGURE 1 : Conditions at the a) Plaine du Saulce catchment area and b) Orgeval Basin catchment area, including changes in nitrate concentrations over time.

Le champ captant qui comprend deux puits sollicite à 20 m de profondeur les calcaires du Séquanien (faciès de Tonnerre), pour alimenter en eau potable les 60 000 habitants de la Communauté de Communes d'Auxerre. Depuis le début des années 90, on observe des hausses des teneurs en nitrates avec des dépassements fréquents de la norme de potabilité de 50 mg NO₃/l (figure 1a). Il existe une périodicité annuelle dans les pics de concentration en nitrates, en lien avec la période de recharge automne-hiver qui mobilise le stock de nitrates disponibles dans la zone non saturée et met en charge des conduits karstiques. On observe également une augmentation régulière de la concentration de base en lien avec le temps de vidange de l'aquifère et l'évolution des pratiques agricoles (ANGLADE, 2015).

Pour faire face à cette dégradation de la qualité de l'eau, les collectivités publiques ont fait le choix, avant-gardiste à l'époque, d'une politique préventive concertée, en créant en 1998 l'Association pour la qualité de l'eau potable de la Plaine du Saulce, qui regroupe élus, représentants du monde agricole et consommateurs. Elle a permis d'initier une dynamique territoriale de concertation et d'échanges, et de porter plusieurs programmes d'actions visant à réduire la contamination nitrique de l'hydrosystème par l'accompagnement des agriculteurs dans l'amélioration de leurs pratiques. Malgré le caractère innovant de certaines de ces actions à l'époque où elles ont été initiées, comme le respect de l'équilibre de fertilisation, la couverture des sols, et un fort taux de contractualisation par les agriculteurs (EPICES, 2014), elles **ne semblent pas se traduire aujourd'hui par une amélioration significative de la qualité de l'eau aux captages** (figure 1a).

Au sein de l'Association, les tensions se cristallisent de plus en plus autour de diagnostics incertains sur les causes de la pollution et le degré de changement à produire. **Les agriculteurs commencent à douter de la pertinence des efforts et les collectivités se tournent progressivement vers un renforcement des mesures réglementaires** (arrêté préfectoral Grenelle juin 2011). Parallèlement, elles mettent en œuvre des mesures palliatives comme la réalisation d'interconnexions avec d'autres captages et la mise en place d'un dispositif de ré-infiltration d'eau de nappe alluviale peu chargée en nitrates dans la nappe des calcaires à partir d'une gravière en connexion hydraulique avec l'Yonne, pour éviter des dépassements ponctuels. Mais ces mesures curatives n'ont pas vocation à résoudre le problème posé par l'accroissement régulier de la contamination nitrique de fond qui concerne tous les captages. **La reconquête de la qualité de l'eau passe donc nécessairement par une modification des pratiques agricoles sur l'ensemble de l'aire d'alimentation des captages.**

■ Le bassin de l'Orgeval

Le second site est celui du bassin de l'Orgeval, en Brie laitière, dans la région de Coulommiers (Seine-et-Marne, figure 1b). Ce bassin de 70 km², essentiellement agricole (82 % des surfaces), est **emblématique de l'agriculture intensive spécialisée du centre du Bassin parisien.**

Les activités d'élevage ont quasiment disparu, avec une densité de cheptel limitée à 0,1 UBG/ha depuis plus de 20 ans. La prairie n'occupe que 5,6 % de l'assolement, largement dominé par la culture du blé (55 %), du maïs (15 %) et de la féverole (15 %). Les sols sont constitués de limons argileux drainés à plus de 80 %.

Le site est instrumenté par IRSTEA depuis 1962 pour des études en hydrologie, et en biogéochimie depuis 1975 (suivi des concentrations en azote minéral ; MARIOTTI *et al.*, 1982) qui se poursuivent dans le cadre du GIS ORACLE (Groupement d'Intérêt Scientifique autour de l'Observatoire, 2005 ; <http://gisoracle.Irstea.fr/>). Le bassin recouvre l'aire d'alimentation de deux captages d'eau potable (Doue et Aulnoy) contaminés en nitrates et en pesticides et désignés comme prioritaires par l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN).

L'aquifère sous-jacent est celui des calcaires de Brie, dont le temps de résidence est de l'ordre d'une dizaine d'années (N. Flipo, comm. pers.). Les pics de concentrations en nitrates mesurés à la résurgence de 2005 à 2013 restent proches de 70 mg/l en période hivernale mais diminuent à partir de 2014.

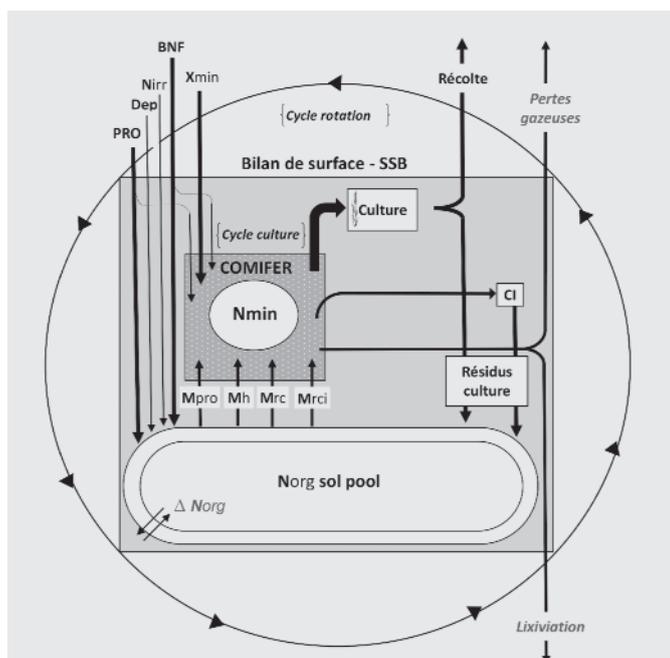
Cet aquifère est lui-même en communication avec celui du Champigny très sollicité par des prélèvements d'eau potable, et dont la qualité pose problème en maints endroits. L'aquifère du Champigny qui alimente près d'un million de Franciliens a en effet subi de fortes dégradations (nitrates et pesticides), conduisant à l'abandon de nombreux captages. Sur les 61 captages du réseau de surveillance « Qualichamp », initié en 1999 par le Département de Seine-et-Marne, en partenariat avec l'AESN, seule la moitié est encore en fonctionnement (Plan départemental de l'eau en Seine-et-Marne, PDE, 2014).

Malgré les animations portées par différents acteurs du territoire de Seine-et-Marne (Préfecture, AESN, Chambre d'Agriculture, Eau de Paris, Véolia, AquaBrie...), les MAE contractées en 2005 n'ont été que très partiellement reconduites en 2014, les agriculteurs remettant en cause la faisabilité technico-économique des réductions d'intrants imposées par les contrats. Ce que **nous explorons dans cette étude** n'est pas la faisabilité d'une réduction mais celle d'une **suppression de la dépendance aux intrants par une remise en cause profonde des systèmes de production.**

2. Approche et méthodologie

■ Bilan d'azote minéral et bilan d'azote des sols

Nous avons développé un cadre conceptuel permettant d'évaluer de façon comparative les performances agro-environnementales de divers agrosystèmes passés, présents ou envisagés, par le biais d'une comptabilité biogéochimique des flux d'azote. Il s'agit essentiellement de revisiter le concept de bilan azoté du sol, de pratique courante en agronomie, pour évaluer les performances de



Dans le bilan Comifer (carré foncé), les différentes fournitures de N minéral à la culture se font par l'apport de fertilisants de synthèse (Xmin), la minéralisation nette de l'humus du sol (Mh), la minéralisation des résidus de récoltes (Mrc) et de cultures intermédiaires (Mrci) et la minéralisation des produits résiduels organiques (Mpro). Dans le bilan SSB (grand carré clair), les différentes entrées d'azote réactif total au sol se font par les engrais de synthèse (Xmin), les produits résiduels organiques (PRO), la fixation symbiotique (BNF), les dépôts atmosphériques (Dep) et l'irrigation (Nirr).

FIGURE 2 : Représentation schématique de l'inscription du bilan COMIFER dans le bilan SSB.

FIGURE 2 : Schematic representation of how the COMIFER method fits within the SSB method.

systèmes de cultures en considérant simultanément la question des entrées (apport d'azote au sol) et des sorties d'azote (récolte exportée). Il convient de bien distinguer le bilan prévisionnel d'azote minéral du sol qui est un outil tactique de gestion de la fertilisation en fonction des besoins de la culture dans le cadre d'un objectif de rendement prédéfini, et le bilan de surface d'azote total (*Soil Surface Balance*, SSB) utilisé pour évaluer sur le long terme les pertes environnementales d'azote (OENEMA *et al.*, 2003 ; DE VRIES *et al.*, 2011), notamment à travers le logiciel Nopolu (CGDD, 2012) qui sert le rapportage DCE des Agences de l'Eau en matière de risques de contamination nitrique (figure 2).

Le concept de **bilan prévisionnel de l'N minéral** du sol a été développé par HÉBERT (1969) pour la fumure du blé tendre d'hiver puis complétée par RÉMY et HÉBERT (1974). Aujourd'hui, cette approche est également connue sous la dénomination de « bilan COMIFER », du nom de l'association éponyme créée en 1980 par la communauté scientifique et technique française pour promouvoir et organiser la diffusion des pratiques de l'agriculture raisonnée (www.comifer.asso.fr/). La méthode consiste à **déterminer la dose d'engrais nécessaire et suffisante pour assurer des objectifs de production** en comparant les besoins de la culture en azote minéral avec les différents flux qui alimentent le stock d'azote minéral dans le sol pendant la

période de croissance de la culture : minéralisation nette de l'humus du sol, minéralisation des résidus de récoltes et de cultures intermédiaires et minéralisation des produits résiduels organiques (fumiers, lisiers, vinasses...). Le bilan COMIFER, tel qu'il est utilisé en pratique, se limite à la période de croissance de la culture (le bilan est initialisé par une mesure ou une estimation du Reliquat Sortie Hiver d'azote minéral du sol) : il n'inclut donc pas les périodes principales de lixiviation.

Le **bilan de surface d'azote** (SSB), qu'il s'applique à une parcelle donnée, à l'ensemble des sols d'une exploitation, ou à un territoire, tient compte d'une part du total des apports azotés au sol par les engrais de synthèse, les apports organiques (fumier, lisier, fientes, vinasses, déchets verts...), la fixation symbiotique, les dépôts atmosphériques et, d'autre part, des sorties d'azote par la récolte et le broyage. Intégré sur le temps long, au moins sur un cycle complet de rotation culturale pour prendre en compte les arrière-effets des précédents culturels, le solde de ce bilan **définit un surplus non valorisé par la production, susceptible d'être entraîné vers l'hydrosystème** par le ruissellement ou l'infiltration. Le bilan SSB est un indicateur multi-scalaire qui permet de décrire et de prévoir les pressions exercées sur le milieu par divers systèmes de production, mais aussi d'évaluer les performances agro-environnementales de ces systèmes en examinant chacun des termes du bilan.

■ Relier fertilisation, rendement et surplus

Nous proposons de caractériser les performances agronomiques et environnementales des systèmes de cultures présents ou reconfigurés sur les sites étudiés, à partir des deux termes du bilan d'azote des sols et de leur solde, intégrés sur l'ensemble du cycle de rotation culturale : les apports fertilisant totaux (F, kg N/ha/an), la production totale exportée (Y, kg N/ha/an), et le surplus (S = F - Y, kg N/ha/an). Le rapport entre les apports totaux d'azote au sol et l'exportation, tous deux exprimés en kg N/ha/an, permet d'évaluer de manière intégrative l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE = Y/F) à l'échelle de la rotation culturale.

Il a été montré (BILLEN *et al.*, 2013a ; LASSALETTA *et al.*, 2014 ; ANGLADE *et al.*, 2015a) qu'à l'échelle des systèmes de cultures d'une région pédoclimatique donnée la relation entre le rendement protéinique exporté, intégré sur la rotation (Y), et la somme des apports d'azote au sol (F) est bien rendue par une fonction hyperbolique à un seul paramètre $Y = Y_{max} \times F / (F + Y_{max})$. Le paramètre qui caractérise cette relation est donc aussi un indicateur des capacités productives des systèmes de cultures du territoire. Le niveau effectif de fertilisation azotée (F), dans ce modèle simplifié, détermine à lui seul la production et le niveau des pertes environnementales (S) :

$$S = F - Y \\ = F[1 - Y_{max}/(F + Y_{max})]$$

La **principale difficulté** méthodologique pour estimer ces termes réside dans **l'appréciation de la fixation symbiotique d'azote atmosphérique par les légumineuses**, ces dernières jouant un rôle clé de maintien de la fertilité dans les systèmes alternatifs à bas niveaux d'intrants. Cette

Type d'interculture	Score d'abattement de la lixiviation	Exemples d'intercultures
Sol nu (culture de printemps sans CIPAN)	0	x-Orge printemps, x-Maïs,...
Culture pérenne	0,7	Luzerne-Luzerne, Trèfle-Trèfle,...
Culture d'hiver (courte)	0,6	x-Blé, x-Colza,...
CIPAN courte avant culture hiver	0,7	Blé-*Colza, Maïs-*Blé, Tournesol-*Blé,...
CIPAN avant culture printemps	0,7	Blé-Maïs, Blé-Orge printemps,...
CIPAN avant culture printemps		
- avec récolte d'automne tardive	0,1	Maïs (grain)-*Maïs, Betterave-*Pois,...
- avec récolte d'automne précoce	0,3	Maïs (fourr.)-*Maïs, Tournesol-*Sorgho,...

* : présence d'une culture intermédiaire avant la culture principale

TABLEAU 1 : **Score d'abattement de la lixiviation en fonction du degré de couverture automnale et hivernale des sols pour des couverts de graminées ou crucifères** (ANGLADE, 2015).

TABLE 1 : **Leaching reduction scores associated with different levels of autumn and winter cover crops** (grasses or crucifers; ANGLADE, 2015).

question a été traitée par ANGLADE *et al.* (2015b) sur la base d'une méta-analyse des travaux de la littérature. La quantité d'azote fixée s'exprime alors simplement à partir du rendement de la culture exprimé en azote, de coefficients de régression dépendant de l'espèce cultivée, et d'un facteur multiplicatif correctif (BGN) permettant de tenir compte de l'azote fixé dans les parties souterraines.

■ Du surplus azoté à la lixiviation

Le bilan d'azote du sol définit un surplus d'azote non valorisé par la récolte et susceptible d'alimenter les pertes environnementales d'azote, mais il ne suffit pas à définir la lixiviation, car ce surplus peut aussi être stocké plus ou moins durablement dans la matière organique du sol ou alimenter des émissions gazeuses par dénitrification ou volatilisation.

Les mesures disponibles dans un certain nombre de situations d'une large moitié nord de la France, où ont pu être évalués à la fois le bilan d'azote sur au moins une rotation culturale complète, la concentration en nitrate sous-racinaire (bougies poreuses ou lysimètres) et le flux d'eau infiltré, montrent que (ANGLADE, 2015) :

- sous terres arables laissées nues pendant la saison de drainage hivernale, une part importante du surplus (70-80%) est lixiviée ;

- sous prairies permanentes, une fraction importante des excédents d'azote (jusqu'à environ 120 kg N/ha/an) est retenue et vient accroître le pool organique des sols ;

- l'implantation de cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) permet de limiter considérablement la lixiviation, en immobilisant temporairement l'azote minéral sous forme organique.

Nous estimons ici la lixiviation à partir du surplus en calculant un **indice de couverture automnale** (ICA), intégré sur la rotation, à partir de **scores d'abattement de la lixiviation**, établis pour différents types d'intercultures (durée, précédent et espèces semées, tableau 1), sur base de données empiriques et de simulations (JUSTES *et al.*, 2012) :

$$\text{Lixiviation (kg N/ha/an)} = \text{ICA} \times \text{Surplus (kg N/ha/an)}$$

$$\text{ICA} = [1 - \text{moyenne (Scores)}]$$

Enfin, la concentration de lixiviation se calcule à partir du flux de lixiviation, considéré comme dilué dans la lame d'eau moyenne infiltrée, évaluée sur une longue période pour l'ensemble du bassin :

$$\text{Conc. lixiviation (mg N/l)} = \text{Lixiviation (kg N/ha/an)} / \text{Lame d'eau infiltrée (mm/an)} \times 100.$$

3. Performances des rotations conventionnelles dans les deux sites

Deux rotations types concernent l'essentiel des exploitations de grandes cultures des plateaux (sols argilo-calcaires superficiels) de la **Plaine du Saulce** (CHAPOTIN, 2010) : Co-B-Oh et Co-B-B-Oh. Il est possible d'évaluer le surplus auquel donnent lieu ces rotations dites de référence en se reportant aux pratiques réelles enregistrées chez les agriculteurs (rendements et doses d'azote moyennes apportées) entre 2006 et 2010. Les surplus moyens sont de l'ordre de 70 kg N/ha/an ce qui, en l'absence de CIPAN, donne lieu à une lixiviation de 56 kg N/ha/an (ICA = 0,8) soit des concentrations sous-racinaires d'environ 100 mg NO₃/l, deux fois supérieures à la valeur limite de 50 mg NO₃/l pour une lame drainante de 225 mm/an (figures 3a, 3b et 4).

L'application à ces rotations des préconisations d'équilibre de fertilisation du COMIFER, également inscrites dans l'arrêté préfectoral « captage Grenelle » en vigueur depuis 2011, pour les rendements effectivement observés, conduit à un surplus à peine inférieur, autour de 60 kg N/ha/an, montrant que **l'agriculture pratiquée sur la zone est déjà raisonnée, sans que pour autant les flux sous-racinaires ne soient compatibles avec la norme de potabilité**. Notons que l'abaissement des objectifs de rendement à 40 q/ha pour le blé (soit 20 q/ha de moins par rapport aux pratiques réelles) permettrait le respect de la norme de potabilité, sans autre modification dans la rotation, grâce à une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote à bas niveau d'intrants.

Le programme d'actions de l'arrêté préfectoral « captage Grenelle » préconise également l'allongement des rotations culturales à au moins 5 ans, en intégrant au moins 4 cultures différentes, l'une d'entre-elle étant choisie moins exigeante en intrants. Nous évaluons le potentiel d'introduction du

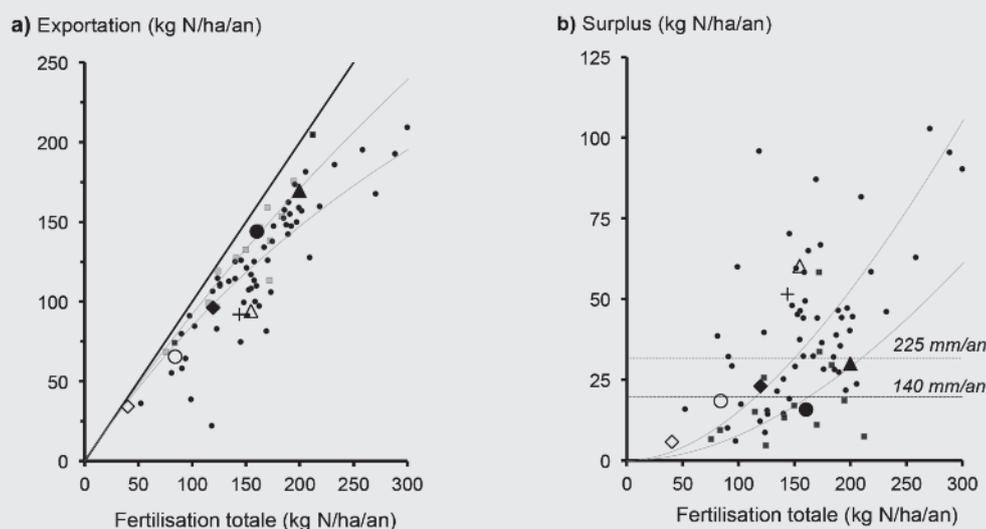


FIGURE 3 : Relations entre la fertilisation totale (engrais + fixation symbiotique + dépôts) sur terres arables et a) la quantité d'azote exporté et b) le surplus azoté pour les rotations principales pratiquées ou préconisées dans les 2 sites d'étude.

FIGURE 3 : Relationship on arable land between total fertilisation (fertiliser + fixation by symbionts + deposits) and a) the amount of exported N and b) the amount of surplus N for the main rotations (in place or planned) in the 2 study regions.

Rotations culturales de référence :
 ▲ Orgeval (Ma-B-Fév) Δ Saulce (Co-B-Oh) + Saulce (5 ans : Co-B-To-B-Oh)
Rotations culturales des années 1955 :
 ◆ Orgeval (Luz-B-C2-Bet) ◇ Yonne (Luz-B-C2)
Rotations culturales d'exploitations en agriculture biologique :
 ● Orgeval Bio (Luz-Luz-B-C2-Fp-B-C2-Lin) ○ Saulce Bio (Luz-Luz-B-Epa-Len-B-Sar)
Rotations culturales des exploitations bio du bassin versant de la Seine :
 ■ en polyculture-élevage ● en grandes cultures

Cultures : Ma : Maïs ; B : Blé ; Fév ; Féverole printemps ; To : Tournesol ; B : Blé ; Oh : Orge hiver ; Co : Colza ; Luz : Luzerne ; C2 : Céréale secondaire ; Lin : Lin textile ; Epa : Epeautre ; Len : Lentilles ; Sar : Sarrasin ; Bet : Betteraves fourragères

Des valeurs plafonds de surplus permettant l'infiltration d'une eau sous-racinaire inférieure à 50 mg NO₃/l sont indiquées pour les deux sites en fonction la hauteur de la lame d'eau infiltrée (225 mm/an pour la Plaine du Saulce, et 140 mm/an pour l'Orgeval), en supposant une fraction lixiviée du surplus de 80 %.

Les deux courbes en gris correspondent à l'ajustement sur les données de systèmes biologiques de grandes cultures (Ymax = 558 kg N/ha/an, r² = 0,75) et de polyculture-élevage (Ymax = 1178, r² = 0,86) (d'après ANGLADE et al., 2015a)

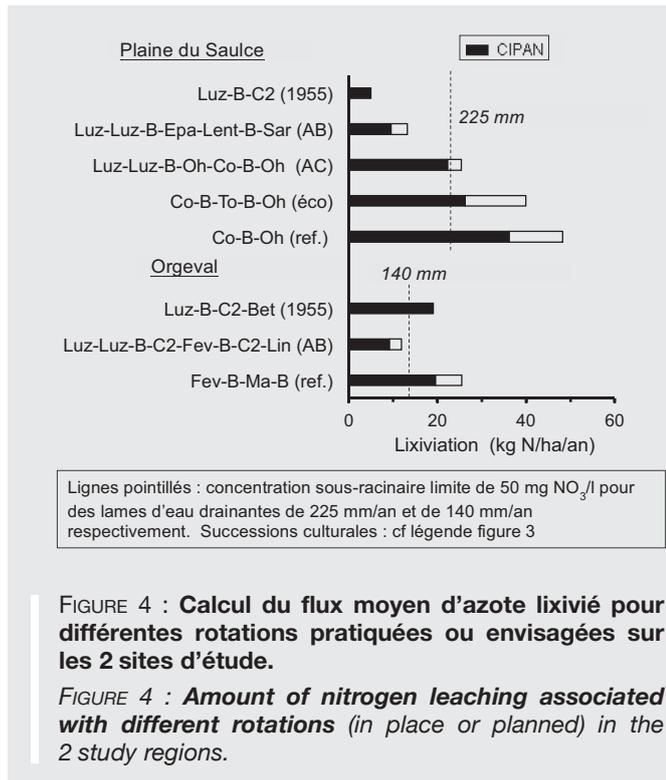
chanvre, du tournesol ou du pois (X) dans une rotation de type Co-B-X-B-Oh, pour réduire la lixiviation, en considérant une fertilisation minérale optimale. Le calcul des surplus de ces rotations avec les rendements de référence ne montre qu'une amélioration à la marge, avec une diminution d'environ 15% par rapport aux rotations dominantes actuellement (figures 3 et 4). Ces résultats sont très proches de ceux obtenus par DUPAS et al. (2015) par simulations à l'aide du modèle biophysique 1-D sol-plante Syst'N (PARNADEAU et al., 2012).

L'allongement de la rotation à 7 ans avec l'introduction de la luzerne (Luz, exportée) dans une rotation de type Luz-Luz-B-Oh-Co-B-Oh, permet d'abaisser le surplus à 40 kg N/h/an. Bien que les apports par engrais de synthèse soient diminués de plus de 40%, les apports totaux au sol, qui incluent la fixation symbiotique, sont légèrement supérieurs. Les rendements observés montrent une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote (NUE = 75 %) et une diminution de surplus.

L'arrêté préfectoral prévoit également une « gestion adaptée de l'interculture » consistant en l'implantation d'une CIPAN en interculture longue avant l'implantation d'une culture de printemps et en interculture courte après une culture de pois ainsi que des repousses de colza avant l'implantation d'une culture d'automne. **L'application de**

ces règles de couverture des sols ne permet pas une réduction suffisante de la lixiviation avec une infiltration d'une eau sous-racinaire inférieure à la norme de potabilité de 50 mg NO₃/l, dans le cas des rotations de référence, et permet tout juste son atteinte pour les deux rotations allongées avec ou sans luzerne dans le cas d'une implantation optimale (figures 3 et 4).

Dans le bassin de l'Orgeval, la rotation type correspondant à l'assolement observé depuis une dizaine d'années alterne le blé d'hiver avec le maïs grain et la féverole de printemps (B-Mg-B-Fév) (GARNIER et al., 2016). La fertilisation est très majoritairement dominée par les intrants de synthèse (74 %) ; la fixation symbiotique liée à la présence de féverole ne représente que 13 % des apports totaux d'azote au sol. La fertilité des sols dans la région se traduit par des rendements azotés près de deux fois supérieurs à ceux observés en Bourgogne, avec une **haute efficacité d'utilisation de l'azote** (NUE = 85 %), produisant un **surplus de l'ordre de 30 kg N/ha/an** (figures 3a et b). Bien que ce surplus soit inférieur à ceux calculés sur les petites terres de Bourgogne, la lame d'eau d'infiltration étant plus faible pour ce site (110-175 mm/an), les concentrations sous-racinaires sont du même ordre de grandeur, excédant largement la norme de potabilité, avec 61 à 97 mg NO₃/l sans CIPAN et 47 à 74 mg NO₃/l avec implantation de CIPAN avant les cultures de printemps et d'été telles que la féverole et le maïs



grain (figure 4). Ces valeurs sont en cohérence avec les mesures au champ par bougies poreuses obtenues par BENOIT *et al.* (2014, 2015 et 2016, figure 4).

Ici encore, les préconisations de l'agriculture raisonnée sont pourtant parfaitement appliquées. Ce qui nous permet d'insister sur le fait qu'**une fertilisation optimale ne signifie pas un surplus nul**, même dans l'hypothèse de réalisation des objectifs de rendement.

Cette analyse montre que, dans les deux sites d'étude, aucune des pratiques réelles (prises comme référence) ou préconisées ne permet d'assurer la production d'une eau sous-racinaire satisfaisant aux exigences de potabilité en termes de contamination nitrique.

4. Analyse de systèmes de cultures en agriculture biologique

L'agriculture biologique, en interdisant l'usage des engrais et des pesticides de synthèse, apparaît comme un modèle alternatif crédible pour rétablir la qualité des eaux. Afin d'évaluer ses performances agronomiques et environnementales une vingtaine de fermes biologiques ont été suivies et instrumentées (bougies poreuses) dans le cadre d'un réseau participatif ABAC (<http://www.eauetbio.org/experiences-locales/umpc-cnrs-ephe-abac/>; BENOIT *et al.*, 2014) couvrant le Bassin parisien. Les données recueillies dans ce réseau, qui inclut le bassin de l'Orgeval, ont été complétées par des **enquêtes menées pour 68 systèmes de cultures dans 53 exploitations biologiques** situées dans une large moitié nord de la France (ANGLADE *et al.*, 2015a), principalement dans le bassin de la Seine pour les productions végétales et dans le Grand Ouest, le Nord et l'Est pour les productions animales.

Typiquement, les systèmes de cultures pratiqués en agriculture biologique impliquent **des rotations longues** (6 à 12 ans) commençant par deux à trois années d'une culture légumineuse fourragère (luzerne ou trèfle) qui assure le nettoyage de la parcelle et son approvisionnement en azote par fixation symbiotique. Un blé destiné à la panification (taux de protéines élevé) est mis en place ensuite. Il est suivi par une céréale secondaire (épeautre ou triticale), puis une légumineuse graine (lentilles) joue le rôle de relais azoté pour un second blé. En fin de rotation, si le niveau de salissement de la parcelle le permet, on retrouve une dernière culture de printemps, peu nitrophile et nettoyante comme le tournesol ou le sarrasin. La luzerne est alors semée sous couvert, ce qui permet de limiter le passage d'outils de travail du sol et d'avoir une bonne implantation de la luzerne dès la moisson.

Les données recueillies sur les pratiques ont été utilisées pour évaluer les bilans azotés des terres arables de ces exploitations (figures 3 et 4).

Il apparaît tout d'abord que, **à fertilisation égale, les systèmes de production biologique sont tout aussi productifs** (en termes de quantité totale d'azote exporté à l'échelle de la rotation) que les systèmes conventionnels. Si la comparaison des rendements céréaliers est à l'avantage des systèmes conventionnels (+ 40 % en moyenne), l'intégration des légumineuses fourragères riches en protéines dans les rotations bio donne l'avantage à l'agriculture biologique : leur part dans l'export azoté total s'élève à 52 % (valeur médiane).

Ensuite, on distingue une **plus grande efficacité de l'utilisation de l'azote dans les exploitations biologiques** par rapport aux références conventionnelles de la zone d'étude. En conséquence, en agriculture biologique, le surplus non valorisé par la production est réduit, et la contamination nitrique des flux sous-racinaires semble à même de répondre aux objectifs de potabilité de l'eau dans la plupart des cas. Il existe néanmoins une gamme de surplus très étendue avec des valeurs considérables (de l'ordre de 100 kg N/ha/an), qui peuvent s'expliquer par des pratiques intensives de fertilisation par des engrais organiques exogènes (fientes, vinasses) qui se surimposent aux apports symbiotiques pour atteindre des objectifs de rendement très élevés, ou encore par le broyage de légumineuses fourragères en l'absence de débouchés pour ces productions dans les régions spécialisées de grandes cultures.

Enfin, ces résultats mettent clairement en évidence, malgré le nombre plus réduit d'exploitations enquêtées, de **meilleures performances pour les systèmes de cultures des exploitations conduites en polyculture-élevage**, tant en termes d'efficacité d'utilisation de l'azote (80%-90%) et de capacité d'export des parcelles, que de réduction du lessivage d'azote sous-racinaire. Il s'agit d'une agriculture qui cherche à optimiser son fonctionnement dans une logique de minimisation des intrants exogènes. Elle s'appuie sur la capacité de fixation d'azote atmosphérique des prairies et des cultures de légumineuses fourragères, l'azote étant ensuite recyclé par le bétail et transféré en partie vers les terres labourables.

5. Proposition de scénarios à l'échelle micro régionale

La **place centrale occupée par les légumineuses fourragères dans les systèmes de production biologique en grandes cultures** (maintien de la fertilité azotée, lutte contre les adventices, structuration du sol) pose le problème de leur débouché dans des régions où l'absence de cheptel rend difficile leur valorisation locale. Il est frappant en effet de voir que les exploitations biologiques montrent la même spécialisation régionale que l'agriculture conventionnelle, l'élevage bio étant aussi peu représenté dans le centre du Bassin parisien que ne l'est l'élevage conventionnel, tandis qu'il se concentre dans l'Ouest (ANGLADE *et al.*, 2015a). L'agriculture biologique s'inscrit en écho à la spécialisation conventionnelle des territoires et à l'organisation des filières qui lui sont associées.

La viabilité des exploitations de grandes cultures biologiques est conditionnée à la reconnexion avec l'élevage. Si en agriculture conventionnelle la spécialisation agricole des territoires est associée à un recours massif aux intrants de synthèse, en agriculture biologique, le risque de la rupture entre culture et élevage se situe au niveau d'un recours massif à des sources d'azote organique exogènes et d'un défaut de débouchés pour les légumineuses fourragères, pouvant conduire à des surplus azotés considérables si ces productions sont broyées et laissées sur place en l'absence de valorisation.

C'est ainsi qu'il est assez habituel, en grandes cultures biologique dans l'Yonne (SEDARB, 2015), de broyer et d'enfourer la dernière des trois coupes de luzerne ou de trèfle (les deux autres étant récoltées en foin et vendues à des éleveurs ou déshydratées). Toutefois, certains agriculteurs broient entièrement la luzerne et la laissent en place. Sur les petites terres, les apports d'engrais exogènes sont très rarement employés, principalement en raison de leur coût par rapport au faible potentiel agronomique.

Pour une rotation de 7 ans (Luz-Luz-B-Tri-Len-B-Sar) sans apports exogènes, lorsque deux coupes sur trois sont exportées, la fertilisation totale reste faible (84 kg N/ha/an) et l'efficacité d'utilisation de l'azote est élevée (77%) de sorte que le surplus d'azote est très faible, 18 kg N/ha/an, donnant lieu à une lixiviation estimée à 10-13 kg N/ha/an, avec ou sans CIPAN (soit 70% inférieure à la rotation de référence sur le territoire, Co-B-Oh) et à une concentration sous-racinaire moyenne très en dessous de 35 mg NO₃/l (figures 3 et 4).

Dans le cas où la luzerne est entièrement broyée faute de débouchés, l'augmentation des rendements céréaliers qui résulte de ce surcroît d'azote enfoui ne suffit pas à éviter un surplus azoté quasiment aussi élevé que pour la rotation de référence conventionnelle (57 kg N/ha/an).

Le problème de la **cohérence agronomique de la spécialisation agricole** renvoie donc à l'impérieuse nécessité de repenser l'organisation des territoires ruraux pour **rebâtir un territoire de polyculture-élevage, avec une véritable complémentarité des ateliers pour équilibrer les flux** compte tenu de la plus faible efficacité azotée des animaux par rapport aux cultures (GODINOT *et al.*, 2015).

L'analyse de l'organisation géographique de l'agriculture biologique en région Bourgogne ou en Brie nous renseigne sur la faisabilité de l'établissement de liens entre des productions complémentaires, afin de redessiner une ou des échelles pertinentes pour équilibrer les flux d'azote.

Sur la **Plaine du Saulce**, une piste consisterait à renverser les tendances actuelles de spécialisation géographique pour réintroduire du cheptel au cœur de l'aire d'alimentation des captages. On pourrait ainsi imaginer un plan de reconquête de l'élevage ovin, qui ferait sens par rapport à l'historique du territoire ; ces derniers valorisent bien la luzerne (alors que le risque de météorisation est élevé chez les bovins) et s'adaptent mieux aux conditions séchantes des petites terres. Les élevages ovins bio dans la région sont majoritairement des élevages allaitants fondés sur la valorisation des prairies pour produire des agneaux à l'herbe. Outre la valorisation des légumineuses fourragères, la réintroduction de l'élevage permettrait de favoriser et de maintenir l'enherbement des zones les plus vulnérables avec de l'élevage extensif. L'élevage ovin peut se concevoir autant comme une activité principale que comme une activité de complément en synergie avec la production de grandes cultures bio et offrant aux céréaliers une opportunité de diversification des revenus. De plus, il s'agit d'une activité favorable à l'installation de jeunes agriculteurs puisqu'elle ne requiert que de faibles investissements (par rapport à l'élevage bovin) et que les agneaux peuvent être rapidement valorisés permettant un retour sur investissement rapide.

Pour amener des éléments de réflexion tangibles aux agriculteurs de l'Association en termes de dimensionnement, nous avons considéré **un scénario de réintroduction d'une troupe ovine bio** qui pâture sur une vingtaine d'hectares de prairies permanentes pendant 7,5 mois dans une exploitation bio de 180 ha. Le troupeau se compose de 250 brebis de race charmoise, 50 agnelles de renouvellement et 8 béliers. Les brebis sont conduites en un seul lot. Les mises-bas ont lieu en avril et les agneaux sont mis à l'herbe avec leur mère à l'âge de 2 à 3 semaines. Sont commercialisées chaque année 41 brebis de réforme, 2 béliers et 187 agneaux. On fait l'hypothèse d'excrétions de 85 kg N/UGB/an, avec une production hivernale de fumier de 110 t, en comptant 110 kg de paille/femelle/hiver. Le fumier permet de fertiliser 23 ha à hauteur de 32 uN/ha, que l'on applique sur les seconds blés dans la rotation (conformément aux pratiques régionales sur petites terres, pour lesquelles des références sont disponibles sur les rendements de blés avec apports organiques). La volatilisation en bâtiment pendant les 105 j d'hivernage en bergerie (22% des émissions totales annuelles) est déduite des émissions totales théoriques en retranchant la part de fumier produit et d'excrétions sur prairies. Les surfaces en fourrage destinées au troupeau sont déterminées en fonction des besoins (équilibre des rations entre foin de prairie permanente, foin de luzerne et triticale) et de la productivité des parcelles. Les animaux reçoivent ainsi un affouragement de luzerne supplémentaire qui permet de compléter la ration en protéines et d'assurer un débouché pour une partie (env. 20%) de la luzerne produite dans la rotation de grandes cultures de vente.

Les fuites minimales, à la fois sous prairies permanentes et sous terres arables, permettent d'aboutir à un résultat des plus probants sur la qualité de l'eau, avec une infiltration sous-racinaire moyenne à l'échelle de l'exploitation inférieure à 15 mg NO₃/l (figure 5c).

Notons que ce scénario a été dimensionné en cohérence avec les élevages ovins bio existant dans la région ; cependant, une part substantielle de luzerne produite nécessiterait encore de trouver un débouché. Une seconde piste complémentaire consisterait donc à se saisir de l'opportunité de la

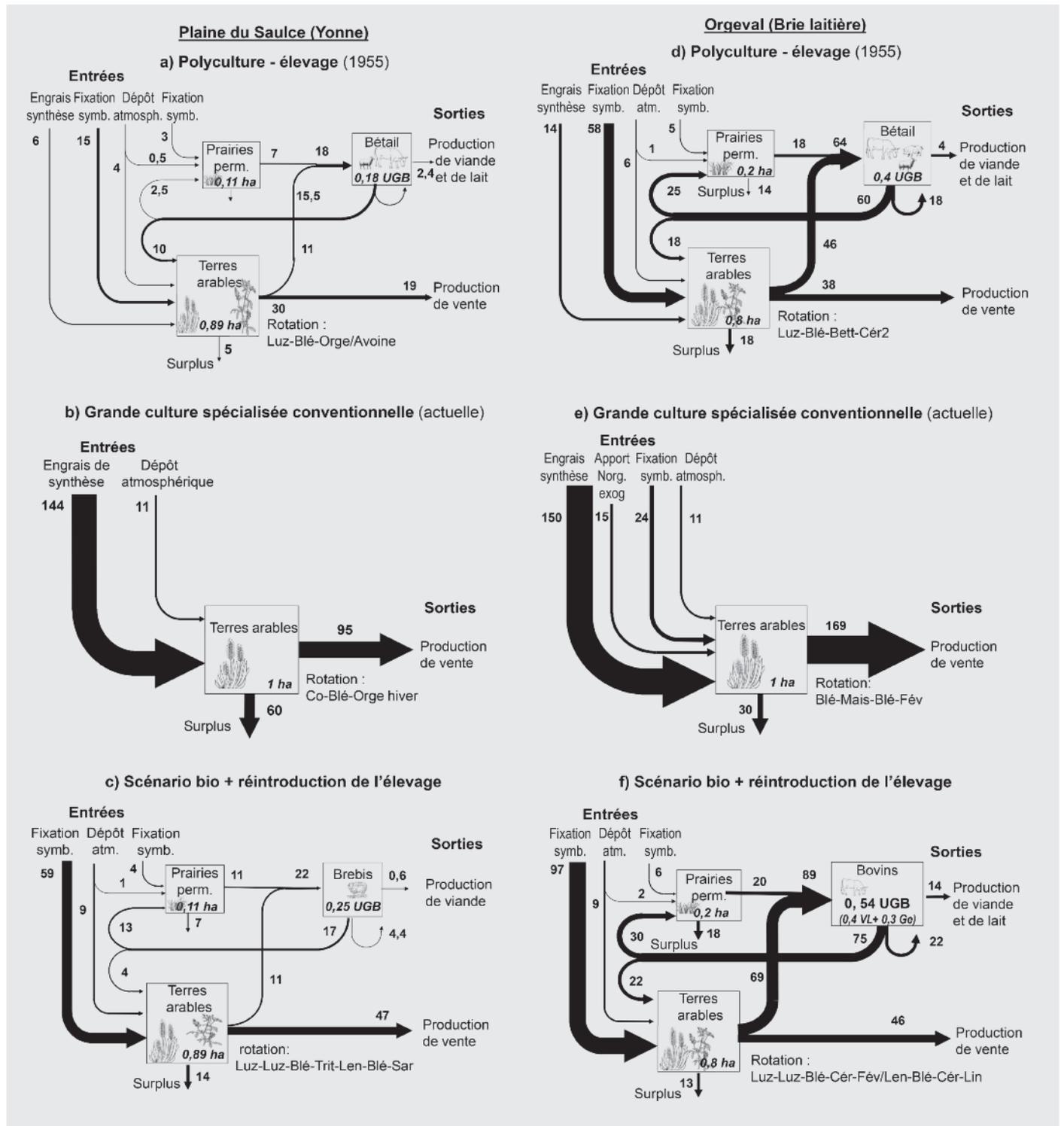


FIGURE 5 : Comparaison des flux d'azote (/ha SAU) pour 3 situations (systèmes préindustriels en 1955, situation actuelle et scénarios de polyculture-élevage en agriculture biologique) sur les 2 sites : a, b, c) Plaine du Saulce (Yonne) et d, e, f) Orgeval (Brie laitière) (en kg N/ha/an pour 1 ha de surface agricole ; Brie (1955) : d'après GARNIER et al., 2016).

FIGURE 5 : Nitrogen fluxes per ha of usable farm area for 3 sets of circumstances (pre-industrial systems in 1955, current systems, and potential organic mixed crop-livestock systems) in the 2 study regions: Plaine de Saulce (Yonne) (a,b,c) and Orgeval Basin (Brie dairy production) (d, e, f) (in kg N/year/ha of agricultural land; Brie (1955) : after GARNIER et al., 2016).

proximité du grand bassin d'élevage que constitue le sud de la région Bourgogne, avec notamment l'élevage charolais, pour mettre en place une filière directe de débouchés pour le fourrage produit sur l'aire d'alimentation des captages. Il s'agirait ainsi de contribuer à relever le grand défi de l'autonomie protéique des élevages, y compris biologiques. La viabilité économique de ce scénario ainsi que l'existence sur le territoire des filières de valorisation des productions ovines ont été établies (ROSSI *et al.*, 2015).

En Brie, traditionnellement laitière, l'opportunité qu'offre la proximité du bassin de consommation alimentaire de l'agglomération parisienne et la forte identité historique de région laitière et fromagère, rend tout à fait pertinent le retour d'une activité locale de production de fromage de Brie. L'image du paysage traditionnel de la région justifie en effet d'explorer un scénario de retour de l'élevage laitier, avec réimplantation de prairies permanentes à hauteur de 20% de la SAU. Tout en suivant le cahier des charges de l'agriculture biologique, **l'élevage bovin laitier combinant les atouts de la valorisation de la luzerne et de la réaffirmation d'une identité territoriale, via la production locale du fromage, pourrait constituer un projet de développement territorial parfaitement légitime**. Actuellement en effet, l'AOC Brie n'impose pas l'utilisation du lait produit localement, mais permet l'importation de lait de Meuse ou de Haute-Marne qui constitue l'essentiel de la production de ce fromage régional.

Ce scénario a été développé par GARNIER *et al.* (2016) (figure 5). L'hypothèse première de la reconception de ce système se base sur la consommation locale par le cheptel de toute la production fourragère. Le dimensionnement de la densité du bétail (0,4 UGB/ha pour les VL et 0,3 UGB/ha de renouvellement) s'est donc fait sur cette base de consommation de la luzerne et d'un peu de concentré céréalier autoproduit, en supposant un niveau de production de 6500 kg/an/VL. Le scénario considère un troupeau pâturant 7 mois dans l'année sur prairies permanentes. La rotation culturale bio caractéristique du bassin est une rotation de 8 ans, de type Luz-Luz-Blé-2^{nde} Céréale-Féverole-Blé-2^{nde} Céréale-Lin. Les rendements des cultures et la fertilisation sont renseignés sur la base d'enquêtes chez les exploitants du bassin. La quantité d'azote produite par les terres arables est diminuée de 20% par rapport à la production conventionnelle, et la récolte est constituée pour moitié de luzerne.

Les apports d'azote sur terres arables sont largement dominés par la fixation symbiotique (76%), le fumier ne représentant que 17%. Cette rotation montre un surplus très faible (16 kg N/ha/an), compatible avec la production d'une eau d'infiltration d'excellente qualité (36 ou 27 mg NO₃/l, avec ou sans CIPAN) (figures 4 et 5f). Ces résultats sont très cohérents avec les résultats de la mesure directe des concentrations sous-racinaires obtenues par bougies poreuses dans un réseau de parcelle bio du territoire (BENOIT *et al.*, 2014, 2015, 2016).

En recevant 40% des déjections animales produites, les prairies permanentes concentrent un surplus de 90 kg N/ha/an. Cette valeur bien qu'élevée reste inférieure à

la valeur limite de 100 kg N/ha/an à partir de laquelle des pertes par lixiviation ont pu également être observées sous prairies (ANGLADE, 2015 ; BILLEN *et al.*, 2013b). Dans ces conditions, la modélisation montre que **le niveau de concentration en nitrates, tant de l'aquifère des calcaires de Brie que des eaux de surface de la région, redescendrait à des niveaux inférieurs de moitié à ceux observés actuellement** (GARNIER *et al.*, 2014 et 2016).

6. Un retour innovant ou un retour en arrière ?

Ces propositions de reconnexion culture-élevage ne constituent pas une forme de retour en arrière, faisant fi des connaissances agronomiques modernes. Il ne s'agit pas de reproduire à l'identique une situation passée, mais de tirer leçon d'un passé agricole fondé sur le respect des équilibres naturels pour réinventer les systèmes agricoles de demain. Les systèmes agraires traditionnels qui se sont développés dans l'Europe occidentale à partir du X^e siècle étaient fondés sur une étroite complémentarité entre culture et élevage, permettant d'exploiter au mieux les capacités productives des territoires limités par la disponibilité de l'azote réactif (formes nitriques, ammoniacales et organiques). Pendant près de 1 000 ans, c'est le bétail qui a assuré la fertilité des terres cultivées en transférant, *via* ses déjections, les éléments minéraux extraits des espaces forestiers, des pâturages semi-naturels et des prairies de fauche riches en légumineuses. Les terres labourables exploitées en rotation biennale ou triennale avec une période de jachère permettant de maîtriser les adventices, étaient enrichies par l'épandage du fumier récolté l'hiver dans les étables et par les déjections des animaux parqués dans les jachères les nuits d'été (DUBY, 1954). Au XIX^e siècle, le remplacement de la jachère par une sole de cultures fourragères de légumineuses (luzerne, trèfle) a permis d'améliorer grandement la fertilité des sols, à la fois par la minéralisation des résidus de récolte et des parties souterraines des cultures fixatrices d'azote, et par l'augmentation du chargement animal.

Au XIX^e siècle, le système agricole dominant des plateaux de Bourgogne était celui d'une céréaliculture très extensive associée à l'élevage ovin (mérinos). Une part importante du territoire était constituée de communaux et de friches. Mais la viticulture, qui assurait des revenus plus importants, mobilisait une part significative des ressources en fumier pour le vignoble. La crise du phylloxera (1886-1891) changea la donne, après la disparition de 85% du vignoble (PIERRE, 2012). La reprise dans l'entre-deux-guerres s'est faite alors vers le développement d'exploitations de grandes cultures avec un agrandissement rapide des exploitations rendu possible par le dépeuplement, une certaine diversification avec le développement de la cerise, et le développement de l'élevage laitier.

La figure 5a présente de façon schématique les flux d'azote dans les systèmes de production typiques de cette époque (1955), avant qu'ils ne se spécialisent en grandes

cultures avec recours massif aux intrants de synthèse. L'élevage d'alors n'est plus dominé par le mouton puisque l'élevage bovin laitier s'est développé, sur un mode cependant très extensif avec une densité d'à peine 0,18 UGB/ha SAU. Les prairies permanentes occupent à peine plus de 10% des surfaces agricoles ; le reste de l'assolement est dominé par des cultures fourragères (prairies temporaires à base de luzerne, chou fourrager), du blé et des céréales secondaires (orge et avoine). Les flux d'azote dans ce système sont faibles et équilibrés, garantissant un surplus minime de 5 kg N/ha/an (figures 4 et 5).

Une reconstruction similaire du fonctionnement biogéochimique du système agricole de la Brie laitière a été réalisée à la figure 5d (GARNIER *et al.*, 2016), et montre un système sensiblement plus intensif, en raison de sols limoneux plus fertiles : la densité du bétail atteignait 0,4 UGB/ha et les prairies permanentes occupaient environ 20% du territoire agricole. Là aussi, les surplus restaient à des valeurs faibles compatibles avec une eau d'infiltration de teneur en nitrates acceptable pour sa potabilisation.

Dans chacun de ces deux sites d'étude, on voit bien que **la proposition de scénario de réintroduction de l'élevage bio ne consiste pas dans un simple retour aux années d'après-guerre, mais constitue au contraire un système innovant beaucoup plus productif** en termes de capacité d'exportation, bénéficiant des progrès de l'agronomie et de l'agroécologie, et qui offre, par rapport au système conventionnel spécialisé dominant actuellement, un beaucoup plus grand degré d'**autonomie de l'exploitation vis-à-vis des intrants**.

Conclusion

« *L'eau est le miroir de notre avenir* » disait Gaston Bachelard. Notre avenir ne peut se réduire à un dilemme scolastique célèbre, celui de l'âne de Buridan, se laissant mourir de faim faute d'avoir pu choisir entre un sceau d'avoine et un sceau d'eau. Le choix est-il si exclusif entre une agriculture productive et la production par le territoire d'une eau de qualité ? Cette fable exhorte notre humanité au libre-arbitre, à échapper à tout déterminisme, fut-ce celui du puissant verrouillage de l'industrie agro-alimentaire qui empêche le développement d'alternatives au modèle dominant vers des systèmes agro-alimentaires autonomes et durables.

Dans les régions de grandes cultures, l'absence structurelle de débouchés pour les légumineuses fourragères constitue un frein environnemental et économique majeur à l'extension de ces alternatives. La transition de ces régions vers de nouvelles formes de polyculture-élevage semble donc la voie la plus prometteuse pour retrouver les conditions d'une agriculture économiquement viable et soucieuse de la santé de l'environnement et des humains.

Accepté pour publication,
le 30 juin 2017

Remerciements : Nous tenons à remercier les partenaires du réseau ABAC (AESN, Eau de Paris, Région Ile-de-France), tous les agriculteurs enquêtés et ceux du réseau ABAC qui ont permis l'instrumentation de leurs parcelles. Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du Comité scientifique de l'Association de la Plaine du Saulce et en particulier à son initiateur, Denis Roycourt, pour les discussions fructueuses destinées à réévaluer la pertinence des actions menées sur ce territoire.

Les projets de l'ANR-Escapade et du PIREN-Seine ont constitué un environnement scientifique favorable à nos réflexions nous permettant d'oser tester les scénarios de changements radicaux proposés dans cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANGLADE J. (2015) : *Agriculture et qualité des ressources en eau dans le bassin de la Seine. Caractérisation des pratiques et applications territorialisées*, Ph-D Univ. Paris 6 (UPMC), ED Géosciences et Ressources Naturelles, 286 p + annexes.
- ANGLADE J., BILLEN G., GARNIER J., MAKRIDIS T., PUECH T., TITTEL C. (2015a) : «Agro-environmental performance of organic compared to conventional cash crop farming in the Seine watershed», *Agricultural Systems*, 139, 82-92.
- ANGLADE J., BILLEN G., GARNIER J. (2015b) : «Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe», *Ecosphere*, 6, art 37, 1-24.
- BENOIT M., GARNIER J., ANGLADE J., BILLEN G. (2014) : «Nitrate leaching from organic and conventional arable crop farms in the Seine Basin (France)», *Nutrient Cycling in Agrosystems*, 100(3), 285-299.
- BENOIT M., GARNIER J., BILLEN G., TOURNEBIZE J., GRÉHAN E., MARY B. (2015) : «Nitrous oxide emissions and nitrate leaching in an organic and a conventional cropping system (Seine basin, France)», *Agric. Ecosyst. Environ.*, 213, 131-141.
- BENOIT M., GARNIER J., BEAUDOIN N., BILLEN G. (2016) : «A network of organic and conventional crop farms in the Seine Basin (France) for evaluating environmental performance: yield and nitrate leaching», *Agricultural Systems*, 148, 105-113.
- BILLEN G., GARNIER J., LASSALETTE L. (2013a) : «Modelling the nitrogen cascade from watershed soils to the sea: from regional to global scales», *Phil. Trans. R. Soc. B*, 2013 368, 2013 0123.
- BILLEN G., GARNIER J., BENOIT M., ANGLADE J. (2013b) : «La cascade de l'azote dans les territoires de grandes cultures du Nord de la France», *Cahiers Agric.*, 22, 272-281.
- CGDD (2012) : «L'analyse spatiale des pressions agricoles: surplus d'azote et gaz à effet de serre», *Le point sur*, 113.
- CHAPOTIN E. (2010) : *Intérêts des systèmes de production intégrés dans la préservation de la qualité de l'eau? : simulation en grandes cultures sur un bassin d'alimentation de captage*, Rapport de stage, Agrocampus-Ouest-INHP.
- DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ (2012) : *Abandons de captages utilisés pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Bilan Février 2012*, Secrétariat d'Etat chargé de la Santé.
- DUBY G. (1954) : «La Révolution agricole médiévale», *Revue de géographie de Lyon*, 29, 361-366.
- DUPAS R., PARNAUDEAU V., REAU R., JEUFRROY M.H., DURAND P., GASCUEL-ODOUX C. (2015) : «Integrating local knowledge and biophysical modeling to assess nitrate losses from cropping systems in drinking water protection areas», *Environmental Modelling & Software*, 69, 101-110.
- EPICES (2014) : *Etude d'évaluation du contrat global pour la protection des captages de la Plaine du Saulce, de la Plaine des Isles, des Boisseaux et d'Irancy 2009-2013*.

- GARNIER J., BILLEN G., VILAIN G., BENOIT M., PASSY P., TALLEC G., TOURNEBIZE J., ANGLADE J., BILLY C., MERCIER B., ANSART P., SEBILO M., KAO C. (2014) : «Curative vs. preventive management of nitrogen transfers in rural areas: lessons from the case of the Orgeval watershed (Seine River basin, France)», *J. Environmental Management*, 144, 125-134.
- GARNIER J., ANGLADE J., BENOIT M., BILLEN G., PUECH T., RAMARSON A., PASSY P., SILVESTRE M., LASSALETTA L., TROMMENSCHLAGER J.-M., SCHOTT C., TALLEC G. (2016) : «Reconnecting crop and cattle farming to reduce nitrogen losses in river water of an intensive agricultural catchment (Seine basin, France)», *Env. Sci. and Policy*, 63, 76-90.
- GODINOT O., LETERME P., VERTÈS F., FAVERDIN P., CAROF M. (2015) : «Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop-livestock farming systems», *Agron. Sustain. Dev.*, 35,857-868.
- HÉBERT (1969) : «La fumure azotée du blé tendre en hiver», *Bull. Tech. Inf.*, 755-766.
- JUSTES E., BEAUDOIN N., BERTUZZI P., CHARLES R., CONSTANTIN J., DURR C., HERMON C., JOANNON A., LE BAS C., MARY B., MIGNOLET C., MONTFORT F., RUIZ L., SARTHOU J.P., SOUCHÈRE V., TOURNEBIZE J., SAVINI I., RECHAUCHÈRE O. (2012) : *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires: conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Expertise collective INRA*, France, 60 p.
- LASSALETTA L., BILLEN G., GRIZZETTI B., ANGLADE J., GARNIER J. (2014) : «50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland», *Environ. Res. Lett.*, 9, 105011.
- MARIOTTI A. (1982) : *Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote*, thèse, Université Pierre et Marie Curie.
- MAZOYER M., ROUDART L. (1997) : *Histoire des agricultures du monde*, éd. du Seuil, Point, 705 p.
- OENEMA O., KROS H., DE VRIES W. (2003) : «Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies», *Europ. J. of Agronomy*, 20, 3-16.
- PARNAUDEAU V., PEYRAUD J.L., RÉCHAUCHÈRE O., ROCHETTE P., VERTÈS F., VEYSSET P. (2012) : *Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres*, Expertise scientifique collective, rapport, Inra (France), 527 p.
- PDE (2014) : *2^e Plan départemental de l'eau en Seine-et-Marne 2012-2016. Bilan 2014*, 85 p. ; <http://eau.seine-et-marne.fr/library/bilan-PDE-2014>
- PIERRE G. (2012) : «Sur les plateaux du sud-est du Bassin parisien», *Histoire & Sociétés Rurales*, 38 (2), 119-152.
- RÉMY J., HÉBERT J. (1973) : «Le devenir des engrais azotés dans le sol», *Comptes rendus des séances de l'Académie d'Agriculture de France*, 11, 700-714.
- ROSSI A., HANUS A., DROUILLAT M. (2015) : *Diagnostic socio-économique agricole sur les aires d'alimentation des captages de la Plaine du Saulce, des Boisseaux et de la Plaine des Isles de la Communauté de l'Auxerrois*, Rapport d'étude, ACTEON.
- SEDARB (2015) : «Etat des lieux de l'agriculture biologique dans l'Yonne au 31 décembre 2013», *Conférence agriculture biologique dans l'Yonne*, Chambre d'agriculture Yonne, 4 juin ; <http://www.yonne.chambagri.fr/produire-durablement/lagriculture-biologique.html>.
- DE VRIES W., LEIP A., REINDS G.J., KROS J., LESSCHEN J.P., BOUWMAN A.F. (2011) : «Comparison of land nitrogen budgets for European agriculture by various modeling approaches», *Env. Pollution*, 159 (11), 3254-68.