

## Polyculture-élevage ou hyper-spécialisation territoriale? Deux scénarios prospectifs du système agro-alimentaire français

Billen G.<sup>1</sup>, Le Noë J.<sup>1</sup>, Anglade J.<sup>1,2</sup>, Garnier J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université – CNRS – EPHE, UMR 7619 Metis, BP 123, Tour 56-55, Etage 4, 4 Place Jussieu, F-75005 Paris

<sup>2</sup> UR 0055 ASTERINRA Mirecourt, 662 avenue Louis Buffet, F-88500 Mirecourt

**Correspondance** : gilles.billen@upmc.fr

### Résumé

Le système agricole français est aujourd'hui caractérisé par une forte spécialisation territoriale, soit vers les grandes cultures déconnectées de l'élevage et basées sur une fertilisation par des engrais de synthèse, soit vers un élevage intensif très dépendant d'importations de fourrage. L'ouverture des cycles de nutriments qui en résulte est cause de nombreux problèmes environnementaux. Nous présentons un scénario radical qui viserait à accroître l'autonomie protéique des territoires, et à reconnecter la production agricole avec une consommation alimentaire moins riche en protéines animales. Ce scénario est comparé à un autre, poursuivant les tendances d'ouverture et de spécialisation à l'œuvre depuis les dernières décennies. Les résultats montrent que le scénario de reconnexion, quoique moins productif, permet de nourrir la population nationale et d'exporter encore des produits agricoles, avec de bien meilleures performances environnementales.

**Mots-clés:** Scénarios prospectifs, Systèmes agro-alimentaires, Polyculture-élevage, Grandes Cultures, Elevage spécialisé, Agriculture biologique, Régime demitarien

**Abstract:** Mixed crop and livestock farming or hyper-specialization of territories? Two prospective scenari of the French agro-food system.

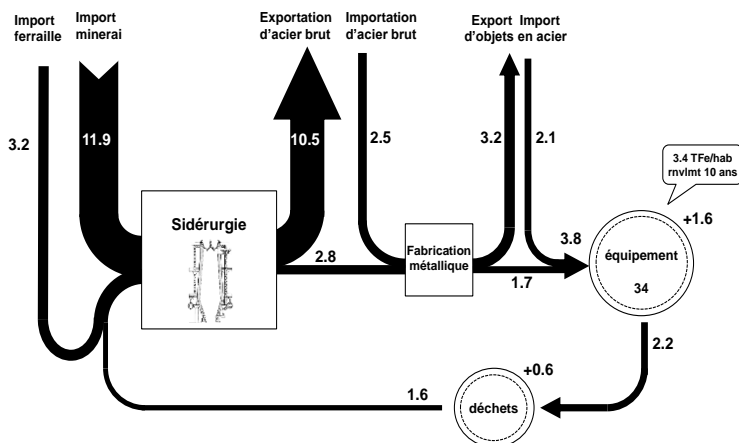
Current French agro-food system is characterized by a high level of territorial specialization, either towards stockless crop farming, or towards specialized animal farming highly dependent on feed imports. The resulting opening of nutrient cycles causes severe environmental concern. Here we present a radical scenario aiming at increasing territorial protein autonomy and reconnecting agricultural production to food consumption with a lower animal protein content. This scenario is compared to another one pursuing the opening and specialization trends observed since the last decades. Results show that the reconnected scenario makes it possible to meet the future national food demand while still exporting significant amounts of cereals to the international market with much better environmental performances.

**Keywords:** Prospective scenarios, Agro-food systems, Mixed crop and livestock farming, Stockless crop farming, Specialized livestock farming, Organic farming, Demitarian diet.

### 1. L'analyse du métabolisme territorial

Le fonctionnement socio-écologique d'un territoire peut être analysé sous l'angle de son métabolisme, c'est-à-dire des flux de matière produits, transformés et consommés en son sein et échangés avec d'autres territoires. Cette démarche d'analyse, celle de la biogéochimie territoriale, s'applique aussi bien

à l'activité industrielle qu'agricole des territoires ; elle permet de mettre en évidence la cohérence des systèmes productifs par rapport aux besoins de la population et aux contraintes environnementales. L'exemple de la sidérurgie belge au moment de son apogée au milieu des années 1970 (Figure 1a), et avant sa chute brutale et son démantèlement une décennie plus tard, offre une métaphore de la fragilité structurelle des systèmes ouverts et déconnectés de la demande intérieure (Billen et al., 1983).

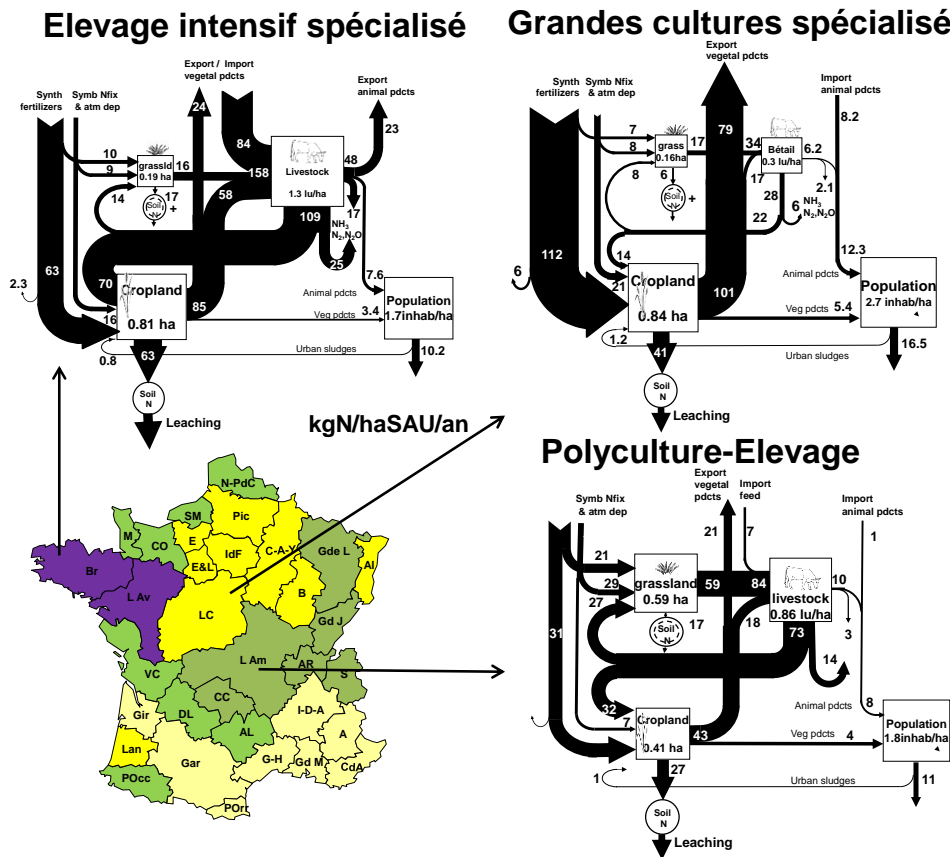


**Figure 1a** : Flux d'acier dans le système industriel belge en 1974 (MtonFe/an). Représentation schématique des flux de fer dans le système industriel belge en 1974 (d'après Billen et al., 1983). La Belgique ne possède pas de ressources en minerai de fer et importait toute la matière première de son industrie sidérurgique de base, pourtant très largement surdimensionnée par rapport aux besoins intérieurs d'acier. Le secteur des fabrications métalliques était très peu développé et largement déconnecté de la sidérurgie de base, important de l'étranger beaucoup d'aciers spéciaux, voire de pièces simplement assemblées dans les usines belges, travaillant elles-aussi, davantage pour l'exportation que pour le marché intérieur. Ouverture du système, et désarticulation entre secteurs potentiellement complémentaires sont les deux traits qui expliquent en grande partie le manque de résilience de la sidérurgie belge à l'époque.

De la même façon, l'analyse par flux de matière des systèmes agro-alimentaires régionaux français (Le Noë et al., 2017 ; 2018b) révèle que si subsistent dans certaines régions un système de polyculture-élevage caractérisé par la mixité des activités, avec une certaine autonomie vis-à-vis des intrants et une connexion entre culture et élevage sur le plan des sources de fertilisation des terres et d'alimentation animale, une tendance lourde de spécialisation territoriale est à l'œuvre dans beaucoup d'autres régions, avec d'énormes territoires de grande culture quasi dépourvus d'élevage, à côté d'autres où les densités animales, dépendantes de l'importation de protéines fourragères, se sont accrues à des niveaux insoutenables (Figure 1b). Cette spécialisation est la cause d'une grande fragilité des systèmes agricoles face aux fluctuations des marchés et du prix des intrants.

L'ouverture des cycles de matière qui caractérise en outre ces systèmes spécialisés entraîne de graves problèmes environnementaux. Plus de 400 captages d'eau potable ont dû être abandonnés en France entre 1998 et 2008 suite à leur contamination en nitrate et en pesticides (Direction Générale de la Santé, 2012). La contamination nitrique des rivières dépasse également bien souvent les normes de qualité et cause de nombreux problèmes d'eutrophisation en milieu marin côtier (Passy et al., 2016 ; Romero et al., 2013). La pollution atmosphérique par émission d'ammoniac et en particules fines, qui résultent de la rencontre entre cette pollution ammoniacale agricole et la pollution urbaine en oxydes d'azote devient un problème majeur de santé publique. Les retombées atmosphériques d'azote banalisent les peuplements végétaux des milieux naturels et en réduisent la biodiversité (Sutton et al., 2011). Les efforts consentis au niveau du raisonnement de la fertilisation ayant aujourd'hui atteint les objectifs qu'on pouvait en attendre, il semble que seuls des changements structurels plus profonds à l'échelle territoriale pourrait permettre de réduire ces problèmes de manière radicale, en refermant les cycles de nutriments grâce à la reconnexion des cultures et de l'élevage (Garnier et al., 2016 ; Anglade

et al., 2018), mais aussi par une désintensification des productions végétales et animales, ainsi que par une modification du régime alimentaire humain vers moins de protéines animales.



**Figure 1 b** : Caractéristiques structurelles de 3 grands types de systèmes agro-alimentaires régionaux français (Le Noë et al., 2017) : les systèmes de grande culture dépendent essentiellement des engrais de synthèse industriels pour la fertilisation des terres arables, là où les systèmes de polyculture-élevage, qui recyclent au sein du territoire une part importante de la fertilité des terres arables et des prairies, montrent une plus grande autonomie et stabilité, tout en limitant les pertes environnementales de nutriments. En système d'élevage spécialisé, le recours massif à l'importation de fourrage exogène, qui occupe une place prépondérante dans l'alimentation du bétail par rapport à la production végétale locale, conduit à des pertes de nutriments considérables.

## 2. Le récit quantifié de deux futurs possibles

La question centrale que posent la spécialisation et l'ouverture des systèmes agro-alimentaires est celle de savoir s'il est plus intéressant (à quels égards?) de produire la nourriture humaine dans des systèmes polyvalents ou des systèmes spécialisés échangeant entre eux, que ce soit à l'échelle inter-régionale ou internationale. Nous allons aborder cette question par le biais de la prospective, en comparant deux scénarios de ce que pourrait être le futur du système agro-alimentaire français à l'horizon de trois ou quatre décennies. Ces scénarios, volontairement très contrastés, ne doivent en aucun cas être vus comme des scénarios prescriptifs. Leur analyse permet simplement de mesurer les conséquences socio-écologiques et environnementales ultimes d'évolutions en cours poussées à l'extrême.

Le premier scénario ('*Ouvert et Spécialisé*', O/S) serait la poursuite du mouvement de spécialisation et de déconnexion de l'élevage d'avec l'agriculture. Il est dans la droite ligne des objectifs de croissance et de mondialisation affirmés par la plupart des politiques publiques nationales et européennes. Le second ('*Autonome, Reconnecté, Demitarien*' A/R/D) serait un scénario de réorganisation profonde du système

agro-alimentaire français visant à accroître l'autonomie en intrants des exploitations et des territoires, et à reconnecter la production agricole avec une consommation alimentaire moins riche qu'actuellement en protéines animales. C'est un scénario qui s'inspire beaucoup des thèses de l'écologie politique, et prolonge des tendances qui apparaissent à travers nombre de mouvements relevant de l'économie sociale et solidaire et de l'économie circulaire. En matière de production agricole, il suppose la généralisation des pratiques de l'agro-écologie et de l'agriculture biologique. Le détail de ces deux scénarios et de leur construction quantitative à partir d'une situation de référence issue de la méthode GRAFS (Generalized Representation of Agro-Food System, Le Noë et al., 2017) est disponible sous forme de tableaux excel dans Billen et al. (2018).

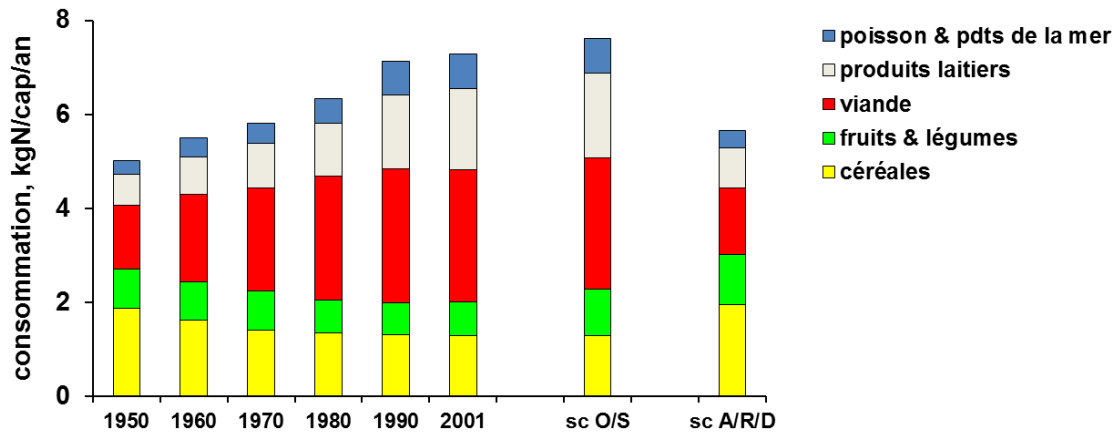
Les dynamiques qui s'opposent entre ces deux scénarios concernent essentiellement trois domaines : (i) La distribution spatiale de la population et sa demande alimentaire ; (ii) Les systèmes de culture et leur mode de fertilisation ; (iii) L'élevage et son degré de connexion avec les systèmes de culture.

## 2.1 La population et son régime alimentaire

L'INSEE prévoit en 2040 (hypothèse haute) une population française de 75 millions d'habitants ([www.insee.fr/fr/statistiques/2529884](http://www.insee.fr/fr/statistiques/2529884)). Si les prévisions d'accroissement sont assez élevées pour les régions de l'Ouest et du Sud de la France, elles le sont beaucoup moins pour la partie Nord-Est. Pour la région parisienne, l'INSEE prévoit un accroissement de 1.7 Mhab. Dans le scénario A/R/D, l'hypothèse est celle d'une redistribution de cet accroissement sur les régions périphériques Nord-Est du bassin parisien (Figure 2).

Dans le scénario O/S, l'accroissement démographique s'accompagne d'une urbanisation des terres agricoles avec un taux de surface artificialisé par habitant dépendant de la densité de population. Cette perte de terres agricoles n'est pas prise en compte dans le scénario A/R/D qui fait l'hypothèse d'un accroissement urbain par densification plutôt que par expansion.

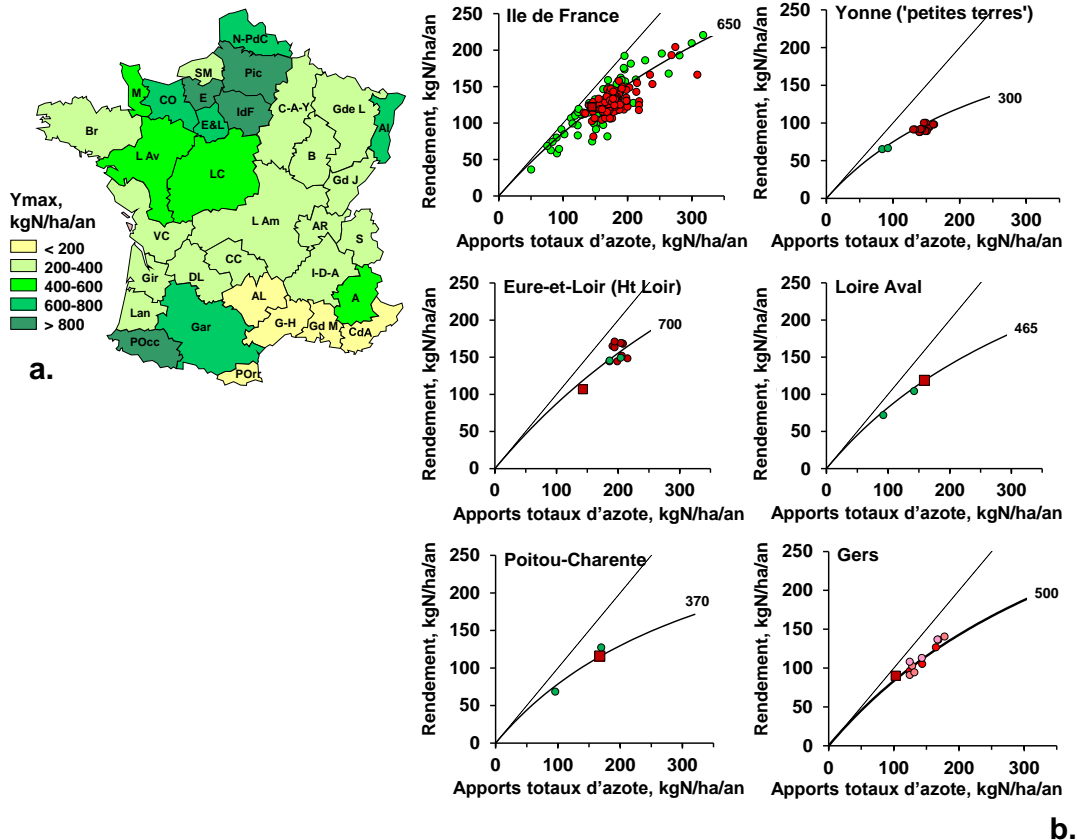
La question du régime alimentaire humain, et en particulier de la place des produits animaux, est centrale dans nos scénarios. Cette question est au centre de vives controverses autour des dimensions éthique, de santé publique et de défense de l'environnement (voir p.ex. le projet ACCEPT, <http://accept.ifip.asso.fr/>). Le mouvement vegan et antispéciste, théorisé par Peter Singer (1975), et relayé par l'activisme d'associations comme L214, s'oppose à toute consommation alimentaire des animaux. Au contraire un auteur comme D. Lestel (2011) dans son *Apologie du Carnivore* assume totalement le carnivorisme qui, dit-il, « nous engage au plus profond de ce que nous sommes en tant qu'êtres humains, (...) des animaux issus de la chair d'autres animaux, (...) pas des extra-terrestres connectés à Google ». Jocelyne Porcher (2011), plus nuancée, cherche à retrouver le sens des relations de travail que l'homme entretient avec les animaux, et donc des pratiques d'élevage, qu'elle oppose au mode de production animale industrielle. Pour des raisons d'impact sur l'environnement, comme de santé publique, un groupe de scientifiques, à travers la déclaration de Barsac ([www.nine-esf.org](http://www.nine-esf.org)), préconise, tout comme l'association Solagro dans son scénario *Afterres 2050*, une réduction de moitié de la consommation de protéines animales (régime demitarien). C'est l'hypothèse reprise par le scénario A/R/D, qui revient à un régime proche de celui qui avait cours en France dans les années 1950 (Figure 2). Dans le scénario O/S, on a retenu le régime prévu par un scénario de croissance économique forte de la Chambre d'Agriculture de Normandie (Le Nechet et al., 2006), prévoyant une poursuite de l'accroissement de la proportion de protéines animales, qui est retenu. Notons que les chiffres montrés ici représentent la consommation apparente de la population et non la quantité effectivement ingérée, qui lui est inférieure en raison des pertes générées à tous les stades de la chaîne de distribution et de consommation domestique. Ce 'gaspillage' alimentaire est actuellement estimé à environ 30% (Grizzetti et al., 2015) mais diffère selon les types d'aliments. Le scénario A/R/D fait l'hypothèse d'une réduction de moitié de ces pertes.



**Figure 2 :** Evolution de la composition du régime alimentaire français depuis 1950 (données de disponibilité alimentaire INSEE, 2010). Régime prospectif dans les scénarios Ouverture et Spécialisation (Chambre d'Agriculture de Normandie, Le Nechet et al., 2006) et Autonome, Reconnecté Demitarien (Afterres 2050).

## 2.2 Les systèmes de culture et leur fertilisation

Les statistiques agricoles permettent d'évaluer la production végétale de l'ensemble de l'assolement de chaque région, ainsi que les apports totaux d'azote aux sols arables par fertilisation synthétique, le dépôt atmosphérique, la fixation symbiotique et les déjections animales. Une relation robuste de type hyperbolique existe entre ces apports et le rendement exprimé en azote, avec un seul paramètre,  $Y_{max}$  (Figure 3a), qui caractérise les performances agricoles d'un système pédo-climatique donné (Lassaletta et al., 2014), ainsi que les risques de pertes environnementales d'azote (différence entre les apports et la production exportée). Cette relation vaut pour toutes les rotations, quelle que soit la nature de leur mode d'apport d'N au sol. Ainsi, la même relation rendement-fertilisation totale s'applique pour les rotations conventionnelles comme pour les rotations Bio (Figure 3b). Cette relation permet de calculer la production des terres arables à partir des apports au sol dans les deux scénarios. Dans le scénario O/S, les mêmes rotations conventionnelles qu'actuellement sont considérées ; les apports d'engrais chimiques sont raisonnés pour éviter un surplus supérieur à 50 kgN/ha/an. Dans le scénario d'A/R/D, il n'y a pas de fertilisation chimique (ni de pesticides), et les rotations longues et diversifiées typiques de l'agriculture biologique sont considérées dans chaque région, avec une proportion de légumineuses fourragères allant de 25 à 40 %.



**Figure 3 :** (a) Distribution du paramètre  $Y_{max}$  caractérisant la relation entre rendement et total des apports fertilisant d'azote au sol, calculés à partir des données Agreste pour chaque région agricole. (b) Données relatives à des rotations bio (points verts) et conventionnelles (points rouges) dans diverses régions, montrant qu'un même paramètre  $Y_{max}$  vaut pour les deux systèmes, dans un même contexte pédo-climatique (données issues d'ITAB, 2011 et Anglade et al., 2015 ; 2017).

### 2.3 Les systèmes d'élevage et leur connexion aux systèmes de culture

En ce qui concerne l'élevage, le scénario O/S prolonge à l'extrême la spécialisation actuelle des régions françaises, c'est-à-dire que l'élevage (qu'il s'agisse de ruminants ou de monogastriques) est totalement exclu des régions de grandes cultures du centre du bassin parisien, de l'Alsace, du Nord-Pas de Calais, des Landes et de la Gironde, ainsi que des régions côtières méditerranéennes. Ailleurs, la densité d'animaux est portée au maximum de ce qui est permis par les directives européennes, soit un peu plus de 2 Unités Gros Bétail par hectare de Surface Agricole Utile (UGB/ha), ou 180 kgN/an de déjections à épandre. Dans le scénario A/R/D, au contraire, si le cheptel est fortement réduit en raison de la diminution de demande de viande et de lait par la population locale, il est cependant réparti de manière beaucoup plus homogène sur le territoire : le cheptel est dimensionné dans chaque région en respectant la contrainte d'une alimentation exclusivement locale (sans aucune importation de fourrage ni de soja), dont au moins un tiers soit fourni par le pâturage sur prairie permanente (ou de durée > 6 ans), le reste par une production fourragère locale. La composition du troupeau et l'efficacité des systèmes de production animale est gardée identique à celles observées aujourd'hui dans les régions actuellement en polyculture élevage ; dans les autres régions, elles sont calquées sur celles de la Lorraine et de la région Dordogne-Lot respectivement pour les systèmes du Nord et du Sud de la France. Les surfaces de prairie permanente sont ajustées pour couvrir au moins un tiers de la ration alimentaire du cheptel, sans toutefois réduire leur surface actuelle. La densité de cheptel qui résulte pour les deux scénarios de l'application de ces règles est comparée à la densité actuelle à la Figure 4.

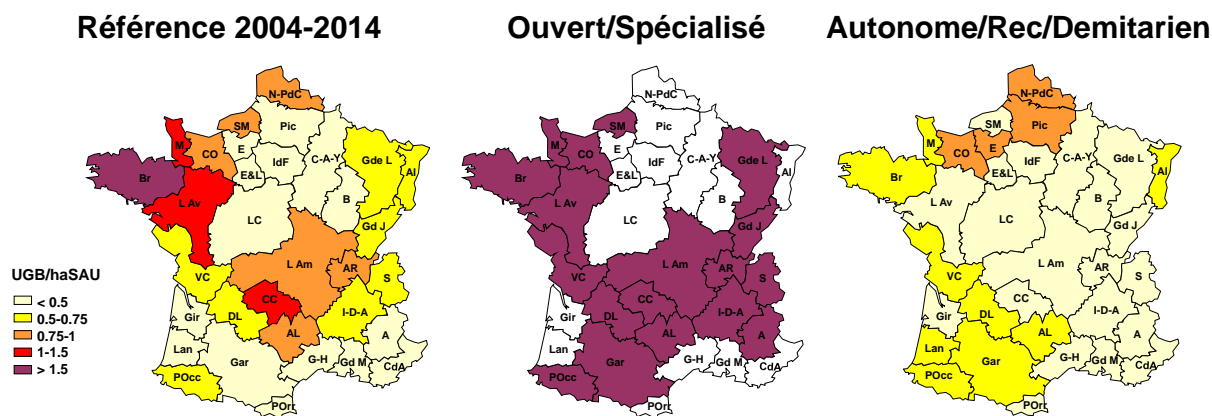


Figure 4 : Distribution de la densité de cheptel (UGB par ha de SAU) pour la situation de référence actuelle et les deux scénarios extrêmes.

### 3. Performances agronomiques des scénarios

#### 3.1 A l'échelle nationale

Les besoins alimentaires et les productions agricoles calculées pour 2040 à l'échelle de la France entière pour les deux scénarios sont comparés avec la situation actuelle dans le Tableau 1 et la Fig.5.

Tableau 1 : Caractéristiques et flux de production du système agro-alimentaire français actuel et dans les deux scénarios à l'horizon 2040.

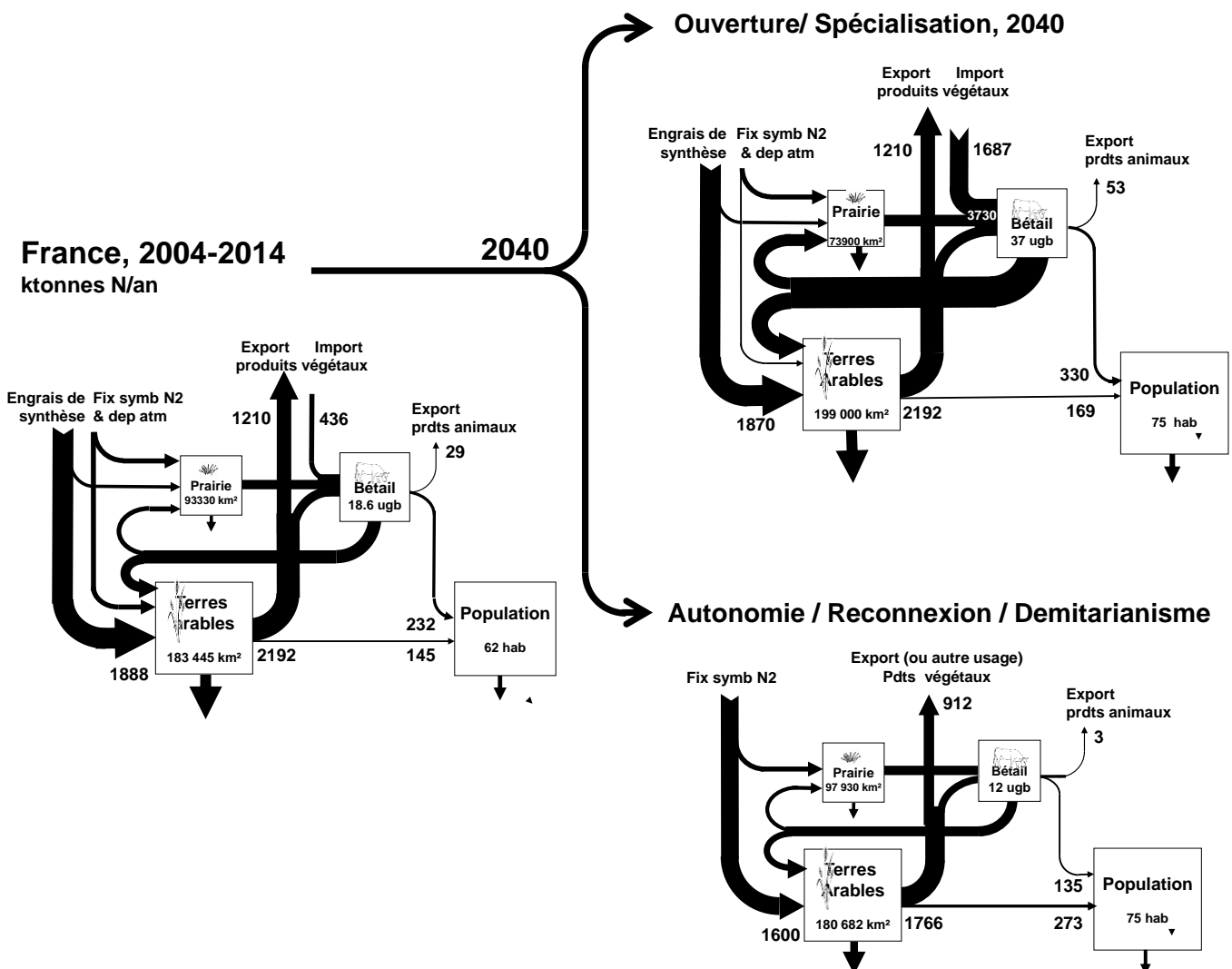
		2004–2014 Référence	2040 Ouverture Spécialisation	2040 Autonomie Reconnexion Régime demitarian
<b>Population</b>	M hab	62	75	75
Consommation protéines végétales	ktN/an	145	169	273
Consommation protéines animales <sup>1</sup>	ktN/an	232	330	135
<b>Surface agricole utile</b>	M ha	28	27	28
% prairies permanentes	%	34	29	36
Utilisation d'engrais azotés	ktN/an	1955	1942	0
<b>Production prairies permanentes</b>	ktN/an	829	1093	633
<b>Production terres arables</b>	ktN/an	2192	2508	1770
Production de céréales	ktN/an	1218	1412	440
Production de fourrages <sup>3</sup>	ktN/an	831	837	1180
Import (+) / export (-) de céréales	ktN/an	-540	-1089	-222
<b>Cheptel</b>	M ugb <sup>2</sup>	19	37	12
Production de viande et lait	ktN/an	261	383	138
Import (+)/ export (-) viande et lait	ktN/an	-29	-53	-3
Ingestion du bétail	ktN/an	1955	3731	1224
Pâturage sur prairies	%	42	29	45
Ingestion cultures locales	%	35	26	55
Ingestion de fourrage importé	%	23	45	0
<b>Import (+) / export (-) de fourrage</b>	ktN/an	+438	+1687	0

<sup>1</sup> hors poisons et produits de la mer ; <sup>2</sup> ugb : unité gros bétail, ruminants et monogastriques ; <sup>3</sup> cultures fourragères et prairies temporaires.

Dans le scénario O/S, conformément à la logique de ses objectifs, la production agricole végétale s'accroît de 15%, rendant possible un doublement des exportations de céréales. L'accroissement du

cheptel permet aussi un accroissement très significatif des exportations de produits animaux, mais la part d'herbe et de production fourragères locales dans l'alimentation du bétail diminue très fortement, au profit des aliments importés ce qui conduit à des importations de soja quatre fois plus élevées qu'actuellement. La France passe ainsi du statut d'exportatrice nette (-100 ktN/an) à celui d'importatrice nette (+600 ktN/an) de produits agricoles.

Dans le scénario A/R/D, malgré l'abandon du recours aux engrais de synthèse et aux pesticides, la production protéique des terres arables ne diminue que de 20%, à peine. Le cheptel, réduit de moitié, suffit à couvrir les besoins en viande et lait de la population de 75 millions d'habitants demitariens. La France n'exporte plus de poudre de lait, mais peut encore fournir le marché international en fromages AOC. L'alimentation animale est basée sur 45% d'herbe et 55% de production fourragère locale; aucune importation de protéagineux n'est nécessaire. Chaque région n'est pourtant pas autosuffisante en protéines animales, pas plus que dans la situation actuelle et celle du scénario O/S; en particulier l'île de France, les régions lyonnaises et marseillaises doivent faire appel à une importation intra-nationale de viande et de lait. Mais ces circulations de produits agricoles entre régions restent infiniment plus limitées que ceux qui ont lieu actuellement, ou qui auraient lieu dans le scénario O/S.



**Figure 5 :** Représentation synthétique des flux d'azote dans le système agro-alimentaire français pour la situation de référence actuelle et les deux scénarios prospectifs à l'horizon 2040.

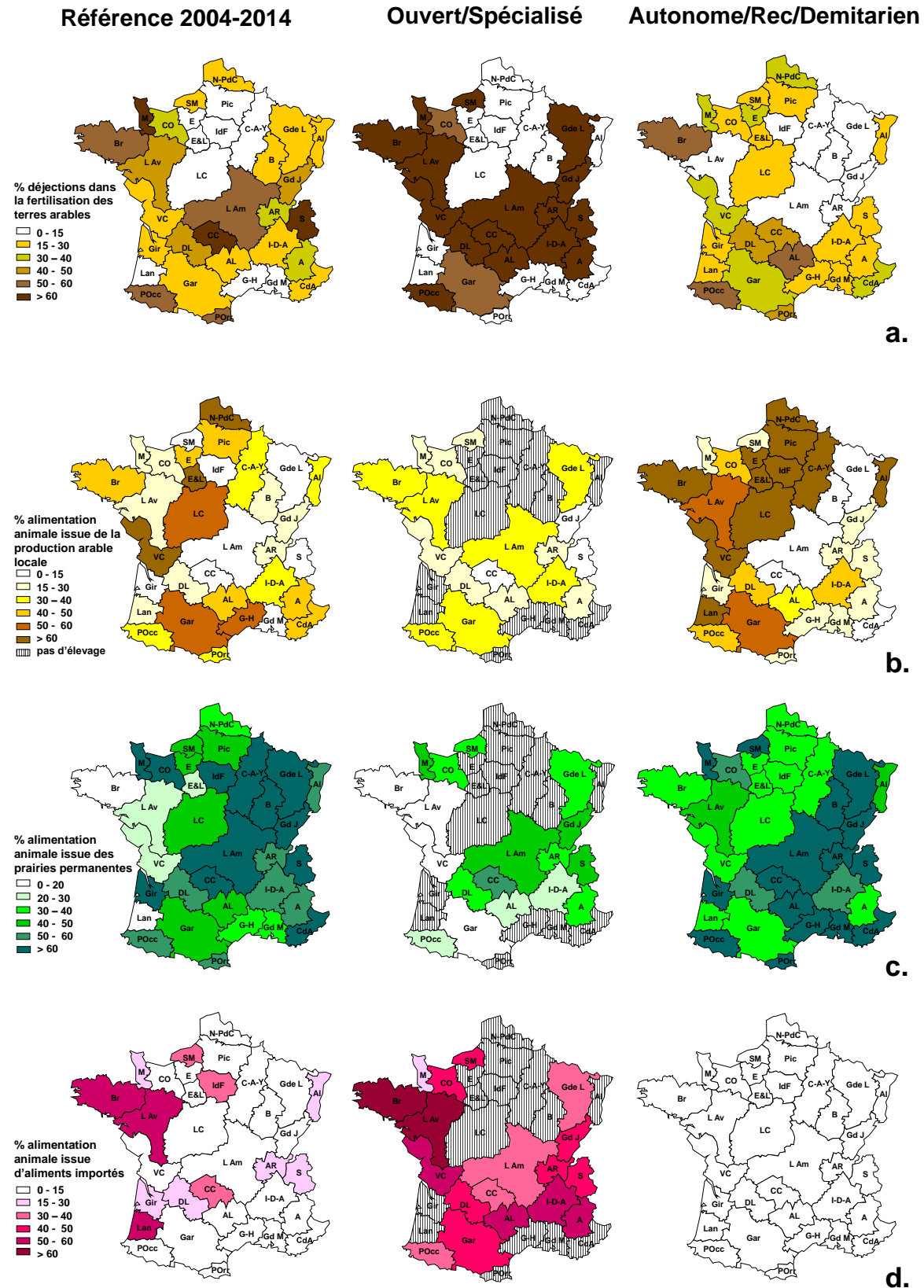


### 3.2 La connexion culture-élevage

Une typologie des systèmes agricoles selon leur degré de spécialisation et de connexion entre culture et élevage a été proposée par Le Noë et al. (2017 ; 2018b). Elle est résumée dans la Figure 1b. Elle est basée notamment sur des indicateurs relatifs à deux aspects des interactions entre culture et élevage à l'échelle régionale : (1) la contribution des déjections animales à la fertilisation des terres arables, (2) la fraction de l'alimentation animale assurée par la production des terres arables locales, par rapport aux autres sources d'aliments que sont les prairies permanentes et les importations extra-régionales de fourrage. La Figure 6 montre la distribution régionale de ces indicateurs en termes d'azote.

Dans le scénario O/S, les déjections animales constituent, dans les régions où l'élevage est concentré, une part dominante de la fertilisation des terres arables. La contrainte du respect d'un plafond de surplus azoté des terres arables, le plus souvent déjà atteint par l'épandage des déjections animales, conduit dans ces zones à un recours très réduit à la fertilisation minérale. Dans les zones de grandes cultures spécialisées, la fertilisation repose au contraire entièrement sur les engrais minéraux synthétiques. Dans le scénario A/R/C, la réduction de la densité de cheptel conduit, par rapport à la situation actuelle, à une diminution de la part des déjections animales dans les apports fertilisants azotés au sol, la fixation symbiotique devenant la source principale (et en dernier recours exclusive) d'azote au sol, même si le recyclage urbain joue un rôle non négligeable.

Mais l'origine de l'alimentation du bétail est davantage révélatrice de la nature des connexions entre culture et élevage et de leurs différences entre scénarios. Actuellement, l'importation extra-régionale de fourrage ou d'aliments pour bétail ne constitue une source prédominante dans l'alimentation animale qu'en Bretagne et dans la Loire aval. Dans le scénario O/S, c'est de loin la source majeure dans la plupart des régions d'élevage, alors qu'au contraire, ces importations sont, par construction, exclues dans le scénario A/R/C. Dans ce dernier, les prairies permanentes assurent, comme actuellement, la plus grande part des besoins alimentaires du cheptel dans tout l'Est de la France, tandis que la production arable locale joue le rôle principal dans les régions Ouest. Bien que l'importance de l'élevage soit fortement réduite par une demande moindre en produits animaux, ce scénario d'autonomie révèle, un élevage très connecté au territoire local, soit par son ancrage dans une production herbagère, soit par son recours à une production de cultures fourragères valorisées localement. Notons d'ailleurs que ces productions fourragères intégrées dans les rotations des terres arables y jouent un rôle essentiel de structuration du sol et de maîtrise des pressions adventices, maladies et ravageurs, en jouant sur la diversité et l'alternance des variétés et espèces cultivées.

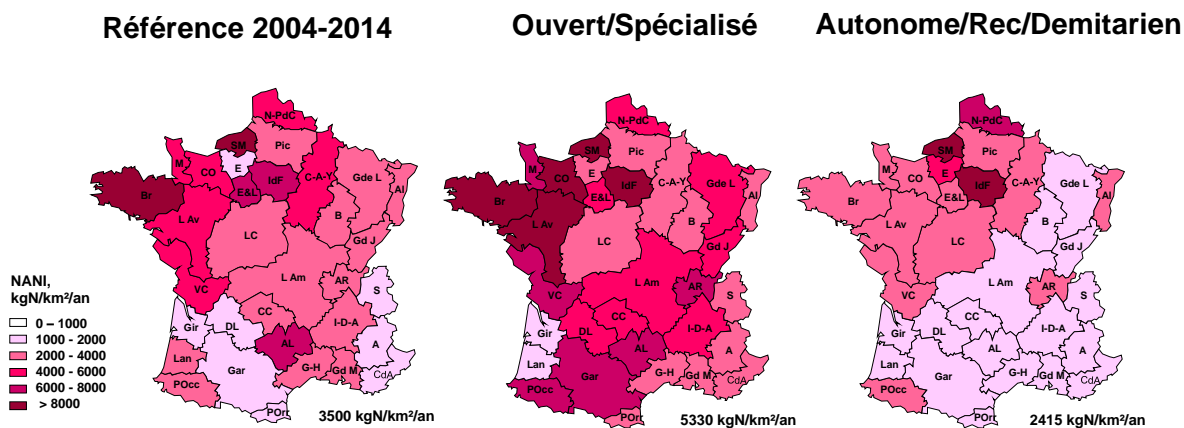


**Figure 6 :** Distribution spatiale des caractéristiques de connexion entre culture et élevage pour la situation actuelle et celle des deux scénarios prospectifs. (a) Part des déjections animales dans le total des apports fertilisants d'azote au sol. (b) Part de la production des prairies permanentes dans l'alimentation du bétail. (c) Part de la production arable locale dans l'alimentation du bétail. (d) Part des importations extra-régionales de fourrage dans l'alimentation du bétail.

### 3.3 Performances environnementales

Un premier aspect des performances environnementales des scénarios agricoles réside dans leur besoin en intrants industriels. En ce qui concerne les engrais azotés, ces besoins sont actuellement de 1955 ktN/an à l'échelle nationale. Ils restent sensiblement identiques (1940 ktN/an) dans le scénario O/S en raison d'un raisonnement rigoureux de la fertilisation; ils sont nuls par hypothèse dans le scénario d'autonomie, comme l'est l'usage des pesticides. Il est plus difficile d'évaluer les besoins en engrais phosphatés. Aujourd'hui, leur consommation s'élève à 90 ktP/an, mais ce chiffre ne correspond pas à un bilan des sols, à cause de l'existence d'un considérable stock de P accumulé dans les sols en raison des sur-fertilisations qui caractérisaient les années 1960-1980 (Le Noë et al., 2018a). Dans le scénario O/S, l'équilibre de la balance phosphorée du sol impliquerait un apport de 170 kton P/an, tandis que les régions d'élevage auraient une balance excédentaire, même sans apport de phosphore minéral. Dans le scénario A/R/D, un apport de 55 kton P/an suffirait à assurer l'équilibre du bilan en P des sols.

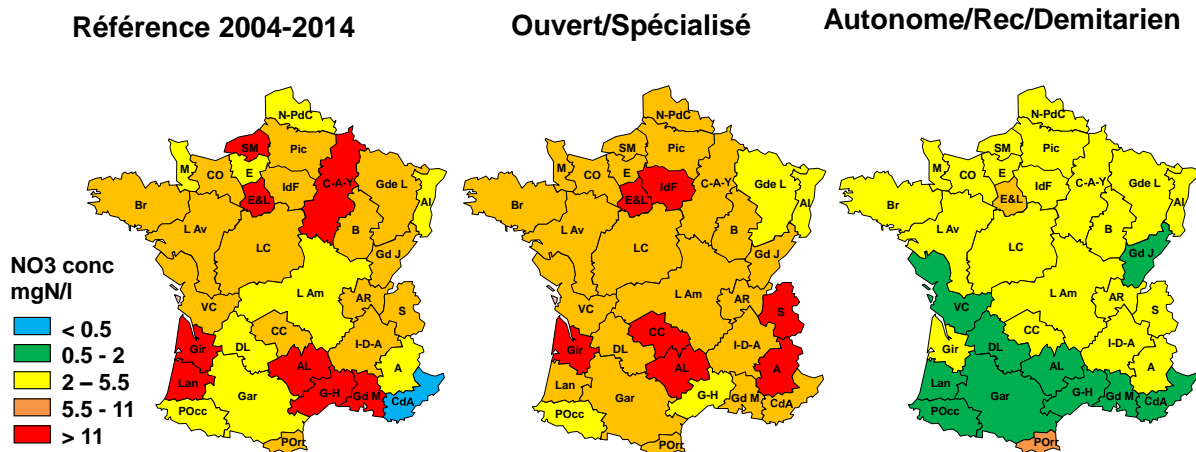
Les performances environnementales des deux scénarios doivent aussi s'apprécier par leurs effets sur l'hydrosystème et sur l'atmosphère. En ce qui concerne la contamination azotée, un indicateur général est fourni par le décompte des apports anthropogéniques net d'azote réactif (NANI, pour net anthropogenic nitrogen inputs (Howarth et al., 1996)) à chaque territoire. Cet indicateur représente en quelque sorte une mesure de l'intensité en azote d'un territoire, et se définit comme par la somme des apports de fertilisants synthétiques, de la fixation symbiotique d'azote par les légumineuses, du dépôt atmosphérique et des importations nettes de produits agricoles, exprimés par km<sup>2</sup> de territoire (Figure 7). A l'échelle de la France entière, ces apports augmentent de 3500 kgN/km<sup>2</sup>/an dans la situation de référence actuelle à 5330 kgN/km<sup>2</sup>/an dans le scénario O/S et diminuent à 2415 kgN/km<sup>2</sup>/an dans le scénario A/R/D.



**Figure 7** : Distribution spatiale des apports anthropogéniques nets d'azote (NANI) aux territoires agricoles dans la situation actuelle et celle des deux scénarios prospectifs.

La contamination des eaux d'infiltration vers les aquifères est très corrélée au NANI. L'approche GRAFS permet de calculer la composition des eaux sous la profondeur d'exploration racinaire des terres arables (qui constitue la concentration de recharge des aquifères, et caractérise les apports diffus aux cours d'eau) à partir de la valeur du bilan d'azote des sols, de la couverture automnale des sols en lien avec la fréquence des cultures de printemps, et de la valeur annuelle moyenne de la lame d'eau infiltrée (Anglade et al., 2015 ; 2017) (Figure 8). Dans le scénario O/S, bien qu'il inclue une condition de respect des normes réglementaires actuellement en cours en matière de raisonnement de la fertilisation minérale, la contamination nitrique se dégrade sensiblement par rapport à la situation actuelle en raison de l'accroissement des rendements et des pertes d'azote qui en découlent mécaniquement. Le scénario A/R/D montre au contraire une amélioration générale sur terres arables. En outre, la plus large

proportion de surfaces en prairies permanentes dans ce scénario permet d'accroître davantage les résultats estimés en termes de qualité des eaux.



**Figure 8** : Distribution spatiale de la concentration en nitrates des eaux d'infiltration sous terres arables dans la situation actuelle et dans les deux scénarios prospectifs à l'horizon 2040.

Les émissions territoriales d'oxyde nitreux, majoritairement d'origine agricole, peuvent aussi être corrélées au NANI. Plusieurs études (Garnier et al., 2009 ; Leip et al., 2011) suggèrent qu'ils représentent 4% du NANI, ce qui conduit à estimer les émissions de  $N_2O$  françaises actuelles à 76 ktN- $N_2O$ /an, soit 37 Mteq $CO_2$ /an, en accord avec l'estimation officielle des émissions directes de l'agriculture de 38 Mteq $CO_2$ /an (<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>). Dans les scénarios O/S, ils seraient de 88 ktN/an, et diminueraient à 52 ktN/an dans le scénario A/R/D, suggérant que des changements radicaux de la structure de l'agriculture sont mieux à même de permettre l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre que des mesures d'amélioration de l'efficacité d'utilisation des intrants.

Les émissions de méthane, peuvent être évaluées à partir de la composition du cheptel en utilisant les coefficients d'émissions compilés par Garnier et al. (2013, suppl mat). Ils passent de 2085 kt $CH_4$ /an dans la situation actuelle à 3830 kt $CH_4$ /an dans le scénario O/S et 1170 kton  $CH_4$ /an dans le scénario A/R/D. Au total, les émissions de gaz à effet de serre du système agro-alimentaire s'élèveraient à 81 Mteq $CO_2$ /an pour la situation actuelle, à 137 Mteq $CO_2$ /an dans le scénario O/S et 50 Mteq $CO_2$ /an dans le scénario A/R/D.

## Conclusion

Les deux scénarios extrêmes présentés ici et évalués quant à leur capacité à subvenir aux besoins alimentaires nationaux et à répondre à des objectifs de préservation des ressources environnementales, n'ont aucune prétention prédictive ou normative. L'objectif est de susciter la réflexion, et une meilleure appréhension des tendances évolutives antagonistes actuellement constatées dans le territoire.

Ainsi le scénario d'ouverture et de spécialisation exacerbe les tendances lourdes qui ont caractérisé l'évolution du système agro-alimentaire français depuis l'après-guerre, avec une première phase de planification étatique volontariste, suivie d'une période plus libérale avec cependant des réglementations environnementales plus contraignantes (Le Noë et al., 2018b) qui n'empêche pas la poursuite de l'accroissement des rendements et la spécialisation des exploitations et des territoires.

Le scénario d'Autonomie et de Reconnexion exacerbe pour sa part des tendances plus récentes mais non moins profondes. Il se base sur une diversification des productions, avec moins de production animale mais mieux couplée aux productions végétales à l'échelle régionale. Ce scénario converge remarquablement avec le scénario Aferres2050 proposé par l'association Solagro (Couturier et al., 2017) pourtant bâti à partir d'une toute autre démarche.

Les deux scénarios répondent à la nécessité de nourrir la population française, mais l'un et l'autre de manière très différente. Si le scénario d'ouverture exporte une fraction beaucoup plus importante de sa production céréalière sur les marchés internationaux, il est en revanche très dépendant d'importations massives de protéines pour l'alimentation animale, au point de faire de la France un importateur net de produits agricoles. Le scénario d'Autonomie ne nécessite pas l'importation d'aliments pour bétail, mais est néanmoins capable d'exporter des céréales à hauteur de 40% du niveau actuel.

Enfin du point de vue environnemental, le scénario d'Autonomie et de Reconnexion est de toute évidence le moins impactant : il est le seul à permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture, et à concilier dans tous les territoires l'agriculture et la production d'une eau potable de qualité (Benoit et al., 2015). Si un tel scénario d'autonomie se révèle possible sur le plan biotechnique, sa mise en œuvre impliquerait une réorganisation majeure des activités amont et aval des filières agricoles et des activités de conseil.

### Références bibliographiques

- Anglade J., Billen G., Makridis T., Garnier J., Puech T., Tittel C., 2015. Nitrogen soil surface balance of organic vs conventional cash crop farming in the Seine watershed. *Agricultural Systems* 139:82-92.
- Anglade J., Billen G., Garnier J., 2017. Reconquérir la qualité de l'eau en régions de grande culture : agriculture biologique et reconnexion avec l'élevage. *Fourrages*, 231, 257-268
- 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. doi:10.1016/j.agee.2015.07.030
- Billen G., Toussaint F., Peters P., Sapir M., Steenhout A., Vanderborght J.P., 1983. L'écosystème Belgique. *Essai d'écologie industrielle*, CRISP, Bruxelles, 163 pp.
- Billen G., Le Noë J., Garnier J., 2018. Two contrasted future scenario for the French agro-food system. *Sci Tot. Environ.* 637-638: 695-705. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.043
- Couturier C., Charru M., Doublet S., Pointereau P., 2017. Le scénario Aferres 2050. Solagro. [www.aferres2050.solagro.org](http://www.aferres2050.solagro.org)
- 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.
- Garnier J., Billen G., Martinez A., Mounier E., Silvestre M., Vilain G., Toche F., 2009. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) in the Seine river and basin: observations and budgets *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 133: 223-233
- 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). *Environmental Science and Policy*. 63: 76–90
- Garnier J., Vilain G., Silvestre M., Billen G., Jehanno S., Poirier D., Martinez A., Decuq C., Cellier P., Abril G., 2013. Budget of methane emissions from soils, livestock and the river network at the regional scale of the Seine basin (France). *Biogeochemistry* 116:199–214 DOI 10.1007/s10533-013-9845-1
- Grizzetti B., Pretabo U., Lassaletta L., Billen G., Garnier J., 2013. The contribution of food waste to global and European nitrogen pollution. *Environm. Sci. & Policy* 33: 186-195

Howarth R.W., Billen G., Swaney D., Townsend A., Jaworski N., Lajtha K., Downing J.A., Elmgren R., Caraco N., Jordan T., Berendse F., Freney J., Kudeyarov V., Murdoch P., Zhao-liang Z., 1996. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic ocean: natural and human influences. *Biogeochemistry* 35: 75-139.

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. DOI:10.1088/1748-9326/9/10/105011

Leip A., 2011. Integrating nitrogen fluxes at the European scale. In Sutton M., Howard C., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H. Grizzetti B. (Eds). *The European Nitrogen Assessment: sources, effects and policy perspectives*. Chapter 16. pp 345-376. Cambridge University Press.

Le Nechet R., Michaud M., Legrain P., Hirschler J., Pas N., Chauvin S., Lafont M., 2006. 2020 : Que mangerons-nous ? Enjeux pour les productions agricoles Normandes. Chambre d'Agriculture de Normandie. [www.normandie.chambagri.fr](http://www.normandie.chambagri.fr)

Singer P., 1975. *Animal Liberation*. Harper Collins 311pp.

Le Noë J., Billen G., Garnier J., 2017. How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: the Generalized Representation of Agro-Food System applied at the regional scale in France. *Science of the Total Environment* 586: 42–55.

Le Noë J., Billen G., Garnier J., 2018a. Phosphorus management in cropping systems of the Paris Basin : from farm to regional scale. *J. Environ. Management* 205: 18-28.

Le Noë J., Billen G., Esculier F., Garnier J., 2018b. Long-term socioecological trajectories of agro-food systems revealed by N and P flows in French regions from 1852 to 2014. *Agr Ecosyst Env.* 265: 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.039>

Lestel D., 2017. *Apologie du Carnivore*. Fayard. Paris.

Passy P., Le Gendre R., Garnier J., Cugier P., Callens J., Paris F., Billen G., Riou P., Romero E., 2016. Eutrophication modelling chain for improved management strategies to prevent algal blooms in the Seine Bight. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* doi: <http://dx.doi.org/10.3354/meps11533>.

Porcher J., 2011. *Vivre avec les animaux*. La Découverte. Paris.

Romero E., Garnier J., Lassaletta L., Billen G., Le Gendre R., Riou P., Cugier P., 2013. Large-scale patterns of river inputs in SW Europe: seasonal and interannual variations and potential eutrophication effects at the coastal zone. *Biogeochemistry* 113, 481-505. DOI 10.1007/s10533-012-9778-0.

Sutton M., Howard C., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B. (Eds), 2011. *The European Nitrogen Assessment: sources, effects and policy perspectives*. Cambridge University Press. 601 pp.

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 ou DOI).