

Scénarios prospectifs du système agro-alimentaire du bassin de la Seine à l'horizon 2040

Gilles Billen^{1*}, Josette Garnier^{1*}, Antsiva Ramarson¹, Estela Romero¹, Vincent Thieu¹, Julia Le Noë¹, Marie Silvestre², Sylvain Théry², Sabine Barles³, Sabine Bognon³, Jérôme Castaing⁴, Romain Legendre⁴, Philippe Riou⁴, Nicolas Bacq⁵, Cédric Fisson⁵.

¹ Université P&M Curie/CNRS, UMR Metis 7619, Paris

² Université P&M Curie/CNRS, Fédération FIRE, Paris

³ Université Paris I, UMR Géo-Cités, Paris

⁴ IFREMER, LERN, Port en Bessin

⁵ GIP Seine Aval, Rouen

* gilles.billen@upmc.fr; josette.garnier@upmc.fr

Résumé

Le système agro-alimentaire du bassin de la Seine est aujourd'hui caractérisé par une extrême spécialisation en grandes cultures céréalières de sa partie centrale, l'élevage étant repoussé vers sa frange orientale où domine la polyculture-élevage, et celle occidentale dont les systèmes se rapprochent du modèle d'élevage intensif du Grand Ouest. Cette spécialisation s'inscrit dans le mouvement historique de «modernisation» de l'agriculture qui s'affirme au milieu du XXe siècle, et est accentué en ce début de XXIe siècle par les politiques publiques et privées qui visent à renforcer la concentration de population le long de l'axe Paris-Le Havre («Le Grand Paris») au détriment des zones amont du bassin, et à accroître la place de la France comme exportatrice de céréales, tout en essayant de contenir les dommages environnementaux par des mesures d'agriculture raisonnée ou de précision.

Parallèlement, la nécessité d'une transition écologique est de plus en plus affirmée et se traduit par un foisonnement d'initiatives citoyennes locales, souvent relayées par les pouvoirs publics régionaux, visant à relocaliser l'approvisionnement en repensant le régime alimentaire, à refermer les cycles de matière et à reconnecter la production agricole et la consommation urbaine, l'agriculture et l'élevage.

En poussant jusqu'à l'extrême ces deux tendances antagonistes, on peut construire deux récits opposés de ce que pourrait être le bassin de la Seine à l'horizon 2040 : « Le futur radieux du Grand Paris et l'hyper-spécialisation des territoires agricoles » et « Un futur bio-autonome-demitarien, sobre et écologiquement vertueux ». Il est possible que le conflit entre ces deux tendances irréconciliables aboutisse à un compromis sous la forme d'un partage du territoire, donnant lieu à un troisième récit : « L'Agriculture Duale ». Enfin, on peut aussi imaginer « Le Retour aux années 80 », le récit de l'abandon de toutes les mesures environnementales mises en œuvre depuis 40 ans.

Dans le cadre du projet RESET (Seine-Aval), ces quatre récits ont été scénarisés de manière quantitative sous la forme d'une image GRAFS du système agro-alimentaire du bassin, permettant de définir les conditions d'entrées au modèle RIVERSTRAHLER du réseau hydrographique, lui-même connecté au modèle ECOMARS-3D de l'Estuaire et de la Baie de Seine. Il est ainsi possible de comparer de manière précise les conséquences de ces scénarios sur la qualité des eaux souterraines et de surface et sur le fonctionnement écologique des milieux aquatiques.

Introduction

Dans le cadre du projet RESET (Seine-Aval) ont été jetées les bases d'une approche d'écologie territoriale permettant de replacer le fonctionnement du territoire de l'Estuaire de Seine vu sous l'angle des flux de nutriments qui le traversent et de l'organisation de sa chaîne agro-alimentaire, dans le cadre plus vaste de celui du bassin de la Seine, voire d'un grand quart Nord-Ouest de la France.

Le projet s'est attaché à décrire l'évolution historique (depuis les années 1950) du fonctionnement du territoire, de l'évolution de l'agriculture et de l'élevage, des industries agro-alimentaires, des activités portuaires, de la consommation alimentaire et de la qualité de l'eau.

En résumé, ce travail a permis de distinguer 3 périodes:

- 1950-1980 : période marquée par l'intensification et la spécialisation du système agro-alimentaire, le renouvellement de la structure commerciale et la dégradation de la qualité de l'eau. **Le régime** de cette période **post 2ème guerre mondiale** est caractérisé par une agriculture encore peu industrialisée et spécialisée, une chaîne agro-alimentaire peu internationalisée, une qualité de l'eau affectée surtout par les rejets urbains ponctuels. La transition vers **le régime actuel** (1960-2000) voit l'internationalisation de la chaîne agro-alimentaire et développement des échanges commerciaux longue distance, la spécialisation de l'agriculture, un développement urbain très polarisé, et la généralisation du traitement 'end of pipe' des eaux usées urbaines.
- 1980-2010 : période marquée par le succès de la grande distribution, la prise de conscience de la dégradation de la qualité environnementale entraînant l'implémentation des directives (1991, nitrate ; 2000 : DCE état écologique) dont les effets sont visibles au début des années 2000, grâce aux efforts sur l'assainissement et le raisonnement des pratiques agricoles dans un contexte de poursuite de la spécialisation et de l'intensification.
- 2010-2013 : période marquée par l'amélioration de la qualité de l'eau, sauf pour la contamination nitrique, mais aussi par l'apparition de signaux faibles en direction d'une désintensification de l'agriculture et d'une relocalisation de l'approvisionnement agro-alimentaire. Alors que le programme de mise aux normes des stations d'épuration s'achève, un certain nombre de mesures relevant de l'agriculture raisonnée (raisonnement de la fertilisation, CIPAN,...) s'impose à tous les agriculteurs, mais sans impliquer aucune modification structurelle de la chaîne agro-alimentaire.

Un second volet du projet a consisté à élaborer divers scénarios d'évolution à plus long terme (horizon 2050) du système agro-alimentaire et d'en modéliser les conséquences en termes de fonctionnement biogéochimique et de qualité de l'eau de l'estuaire. C'est de ce travail de construction des scénarios et d'évaluation de leurs conséquences environnementales que rend compte le présent rapport.

Appliqué à l'estuaire dans le cadre de Seine-Aval, ces scénarios impliquent nécessairement la prise en compte de l'ensemble du bassin, l'estuaire étant le réceptacle de l'ensemble des pollutions générées sur le bassin. La co-construction de ces scénarios a été effectuée avec les membres du PIREN-Seine.

Outre les travaux de prospectives effectués dans le cadre du PIREN-Seine, l'élaboration des scénarios a donc fait l'objet d'un travail collectif impliquant à la fois les membres du consortium RESET et les acteurs de la gestion du territoire (AESN, Métropole de Rouen, Port de Rouen, DREAL Normandie, Union des industries chimiques), interviewés lors d'une enquête réalisée à l'occasion d'un travail d'étudiants sur le système agro-alimentaire Normand, et réunis pour un atelier de discussion le 13 juin 2016.

Les scénarios retenus s'inspirent en outre des documents de prospective élaborés par diverses instances (Poux et al., 2005; Attali, 2010 ; Duszinski, 2013 ; Benhalima, . 2015 ; CA Normandie (2006); DREAL, 2014; HAROPA, 2015 ; Solagro, 2014 ; Poux et al., 2005).

Une fois élaborés, les récits correspondants à ces scénarios ont dû être traduits quantitativement en fichiers de contraintes pour alimenter les modèles permettant d'en calculer les conséquences environnementales.

Une chaîne de modélisation couplant le modèle du système agro-alimentaire territorial (GRAFS), le modèle de transfert des nutriments dans le réseau hydrographique (RIVERSTRAHLER) et le modèle de fonctionnement écologique de l'estuaire et de la Baie de Seine (ECO-MARS-3D) a été mise au point, validée sur la description de la situation actuelle (référence) et appliquée aux scénarios prospectifs.

1 Les visions prospectives du système agro-alimentaire du bassin de la Seine

Quatre scénarios contrastés, plausibles mais provocateurs ont élaborés. L'objectif de ces visions n'est pas de définir le futur probable ou souhaité du territoire, mais de susciter la réflexion, et une meilleure compréhension des tendances, parfois antagonistes, visibles actuellement dans le territoire. Comme l'écrit Découflé (1980), « *un bon scénario est par définition inacceptable. Il est là pour provoquer celui à qui on le présente, pour le forcer à remettre en question les hypothèses choisies. Un scénario est fait pour être récusé et, une fois rejeté, en nourrir un autre de ses propres dépouilles* ». Il s'agit donc d'explorer les conséquences de certaines trajectoires qui pourraient être suivies par le territoire si certaines tendances, parfois contradictoires, mais déjà perceptibles dans les dynamiques actuellement à l'œuvre, étaient poussées jusqu'au bout de leur logique.

Dans tous ces scénarios, le climat et le régime hydrologique correspondent à la situation actuelle. Ils ne prennent donc pas en compte le changement climatique qui pourrait être attendu à l'horizon 2050.

1.1 Le futur radieux du Grand Paris et l'hyper-spécialisation des territoires agricoles

Narratif. Le développement volontariste du Grand Paris se fait le long de l'Axe Seine, avec un accroissement sensible de population dans ce secteur (au détriment des villes plus amont du bassin). Les technologies les plus pointues de l'épuration urbaine centralisée sont mises en œuvre.

Les ports de Seine portent un projet ambitieux de développement autour du Seine Gateway® qui fait notamment « de la filière céréale un moteur de l'industrie Normande ». Une industrie agro-alimentaire et agro-chimique exportatrice se développe.

Un vaste hinterland portuaire est rendu accessible par de nouvelles infrastructures de transport; le chenal de la Seine du Havre à Rouen est approfondi, le Canal Seine Nord Europe est mis en eau. La liaison ferroviaire Orléans-Chartres-Rouen est établie.

Les régions de grandes cultures intensifient dès lors leur spécialisation et leur production de céréales et d'oléo-protéagineux selon les techniques les plus rigoureuses de l'agriculture chimique raisonnée (Chimie verte, agro-carburants). L'élevage est exclu des zones de grande culture, mais s'intensifie, en mode industriel, dans les régions du Grand Ouest, y compris la Manche.

Ce scénario est très présent dans les discours officiels, et s'accompagne d'une profonde ouverture structurelle de la chaîne agro-alimentaire. Il s'accompagne de l'accroissement de la spécialisation territoriale, de la poursuite de l'intensification agricole, de la concentration de la population le long de l'axe Seine au détriment du bassin amont.

1.2 Un futur bio-autonome-démocratique, sobre et écologiquement vertueux

Narratif. La transition écologique prend corps avec des actions volontariste de l'Etat en matière de développement des énergies renouvelables et une politique foncière visant à limiter l'extension urbaine, qui se poursuit autour des petites et moyennes agglomérations existantes, y compris à l'amont du bassin. Le système eau-énergie-aliments (water-energy-food nexus) fait l'objet de politiques locales, interterritoriales et intersectorielles.

Les pratiques d'assainissement urbain sortent du paradigme de l'épuration centralisée 'end of pipe' et les filières de valorisation des urines collectées à la source se développent, ainsi que la méthanisation des déchets et excréments solides.

Suite à des crises alimentaires et sanitaires répétées, des mouvements citoyens de plus en plus nombreux visent à reprendre en main leur alimentation, à la fois à travers une recherche de qualité diététique et un désir

de renouer des liens sociaux avec les producteurs locaux. L’approvisionnement local est de plus en plus privilégié, ainsi que les produits biologiques. La consommation de viande et de produits laitiers diminue de moitié au profit des protéines végétales. Des campagnes spectaculaires de sensibilisation réduisent considérablement le gaspillage alimentaire.

Les pratiques de l’agriculture biologique se généralisent, les exploitants agricoles visent à s’affranchir des fluctuations des prix de l’énergie et des matières premières agricoles en recherchant plus d’autonomie vis-à-vis des intrants. En matière d’azote, la généralisation du recours aux légumineuses permet de s’affranchir des engrais chimiques et des pesticides, et s’accompagne d’une reconnexion avec l’élevage qui est réintroduit dans les régions de grandes cultures. Tandis que la densité de cheptel diminue dans les régions actuellement spécialisées en élevage, les exploitants se tournent également vers un système avec plus d’autonomie fourragère, et un recours accru à l’herbe.

Ce scénario radical implique à moyen et long terme une profonde modification structurelle de la chaîne agro-alimentaire.

1.3 Une agriculture duale

Narratif. Les deux tendances antagonistes à l’œuvre respectivement dans les scénarios 2.1 et 2.2, s’affrontent violemment au sein d’une société polarisée à l’extrême entre un courant libéral privilégiant la croissance et la compétitivité dans la mondialisation, et un courant de sensibilité écologiste prônant la défense de l’environnement et l’autonomie circulaire locale. Leur affrontement aboutit à un compromis consistant dans un partage du territoire entre espaces de développement économique spécialisé et espaces de protection, dans lesquels sont expérimentés à des échelles territoriales divers modes alternatifs de produire et de consommer. Les démarches des distributeurs d’eau et Agences de l’Eau pour protéger les aires d’alimentation de captage font de ces territoires des zones particulièrement pertinentes pour ces expérimentations. Les Parcs Naturels Régionaux sont également des territoires propices à la mise en œuvre de pratiques innovantes en matière de transition écologique (Gorgeu, 2017). Ensemble, les aires d’alimentation de captage d’eau potable, et les Parcs Naturels Régionaux (Figure 1) concernent plus d’un tiers du territoire du bassin de la Seine, ce qui rend l’impact des pratiques qui y sont développées non négligeable sur le fonctionnement de l’ensemble du bassin. Si dans les espaces banaux prédomine une agriculture très spécialisée, semblable à celle du scénario 1, dans les espaces réservés prennent place des exploitations agricoles autonomes, biologiques et tournées vers un marché de consommation local.

Ce scénario peut être vu aussi bien comme un compromis qui organise la coexistence, dans des espaces distincts, de deux modèles d’agriculture aux développements diamétralement opposés, ou comme une étape de transition vers un changement radical qui concernerait à terme l’ensemble du bassin.

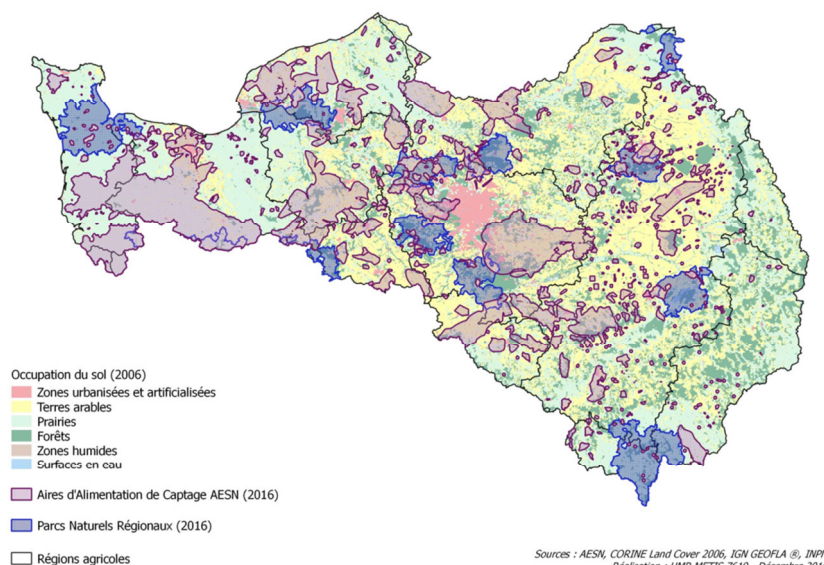


Figure 1. Occupation du sol du bassin de la Seine avec délimitation des Aires d’Alimentation de Captage (AAC) et des Parcs Naturels Régionaux (PNR). Avec une surface respective de 22% (AAC) et 10 % (PNR), les territoires concernés totalisent 32 % de la surface du Bassin Seine Normandie.

1.4 Et si rien n'avait été fait en matière de réglementation depuis 40 ans ?

Narratif. Un tel scénario vise à reconstituer les bassins dans l'hypothèse où aucune politique publique n'aurait été mise en œuvre depuis 30 ans, ni dans le domaine de l'épuration des eaux usées, ni dans celui des pratiques agricoles.

La population est celle que l'on dénombre actuellement, mais les rejets urbains sont traités comme ceux des années 1980 (traitement biologique par boues activées pour les agglomérations de plus de 2000 habitants, les autres étant laissées sans traitement). Les pratiques agricoles ne sont pas soucieuses d'équilibre de fertilisation, et n'ont pas recours aux CIPAN. On retrouve les niveaux de surplus azotés des années 1980, associés à une fertilisation très excédentaire.

Ce scénario permet de mesurer les effets sur l'environnement obtenus grâce à l'application des directives nationales et européennes. Il met en garde contre tout désengagement d'une nation ou d'une Europe en crise, ne pouvant plus investir dans de nouvelles infrastructures ou ayant peine à maintenir l'existant. Les réglementations environnementales seraient mal appliquées, ou feraient l'objet de nombreuses dérogations. C'est le scénario du pire qui permet d'apprécier *a posteriori* les effets des politiques environnementales mises en œuvre depuis 40 ans.

1.5 L'état Pristine

Il ne s'agit pas ici d'un scénario proprement dit, mais plutôt d'une reconstitution abstraite de ce que serait le système actuel (à climat présent) en l'absence de toute action humaine. L'hydrologie est celle d'un réseau hydrographique sans barrages réservoirs ni chenalisation. Le bassin versant est supposé entièrement couvert de forêts, les apports de nutriments et de matière organique se limitant au lessivage des sols forestiers et aux apports de litière par les arbres bordant les cours d'eau.

Ce scénario est destiné à fournir une estimation du niveau de base de la qualité de l'eau dans le fonctionnement naturel du système.

2 Méthodes pour la modélisation des scénarios

2.1 La suite GRAFS-RIVERSTRALER-ECOMARS3D

L'approche GRAFS est basée sur un bilan détaillé des flux d'azote, de phosphore et de carbone impliqués dans la production, la transformation et la consommation de produits animaux et végétaux dans un territoire, ainsi que des fuites d'azote associées vers l'environnement (Figure 2). En formalisant les relations entre ces flux, elle permet d'établir un lien direct entre différents aspects du système hydro-agro-alimentaire, comme par exemple, le lien entre élevage, surfaces prairiales et cultures fourragères ; le lien entre régime alimentaire de la population, structure productive du territoire et échanges commerciaux ; le lien entre fertilisation des terres arables et des prairies et les pertes environnementales de nutriment. GRAFS permet donc de formaliser et synthétiser les entrées et les sorties des éléments (l'azote ici) qui circulent à l'échelle d'un territoire (mais aussi de l'exploitation agricole à l'échelle globale). Il diffère d'un modèle agronomique prenant en compte les interactions eau-sol-plante à l'échelle saisonnière des successions de cultures, mais est basé sur les statistiques agricoles à l'échelle annuelle (à l'échelle départementale, nationale (Agreste) ou internationale (FAO)).

Complété des connaissances acquises sur la relation surplus lessivage, ce modèle peut être directement couplé au modèle Riverstrahler qui permet alors le calcul des transferts d'azote à travers l'hydrosystème et de la qualité des ressources hydriques (Figure 2). *Stricto sensu*, Riverstrahler ne décrit en effet que le fonctionnement biogéochimique du réseau hydrographique, et non celui du bassin versant. Il permet le calcul des flux et des concentrations de nutriments en tout point du réseau hydrographique à partir des contraintes constituées par la morphologie et l'hydrologie du réseau de rivières, des apports ponctuels liés aux rejets urbains et des apports diffus résultant des pratiques agricoles. Les entrées au modèle Riverstrahler sont donc

celles d'apports directs vers les cours d'eau (apports ponctuels et diffus), (Figure 2). Le modèle complet de bassin versant, reliant l'activité humaine (notamment agricole) à la qualité de l'eau et aux exports de nutriments vers la mer est le résultat du couplage entre GRAFS et le modèle Senèque/Riverstrahler du fonctionnement biogéochimique du réseau hydrographique. GRAFS fournit à RIVERSTRALER des concentrations d'apports diffus (N) en moyenne annuelle, mais qui sont ensuite modulées par la distribution des débits superficiels et phréatiques, ainsi que par un module de rétention riparienne nouvellement développé, représentant l'élimination du nitrate par la dénitrification (Figure 2).

Les flux de nutriments à l'exutoire des fleuves côtiers calculés par RIVERSTRALER sont alors utilisés par le modèle ECOMARS-3D développé à l'Ifremer et élargi à la zone estuarienne de Poses à Honfleur.

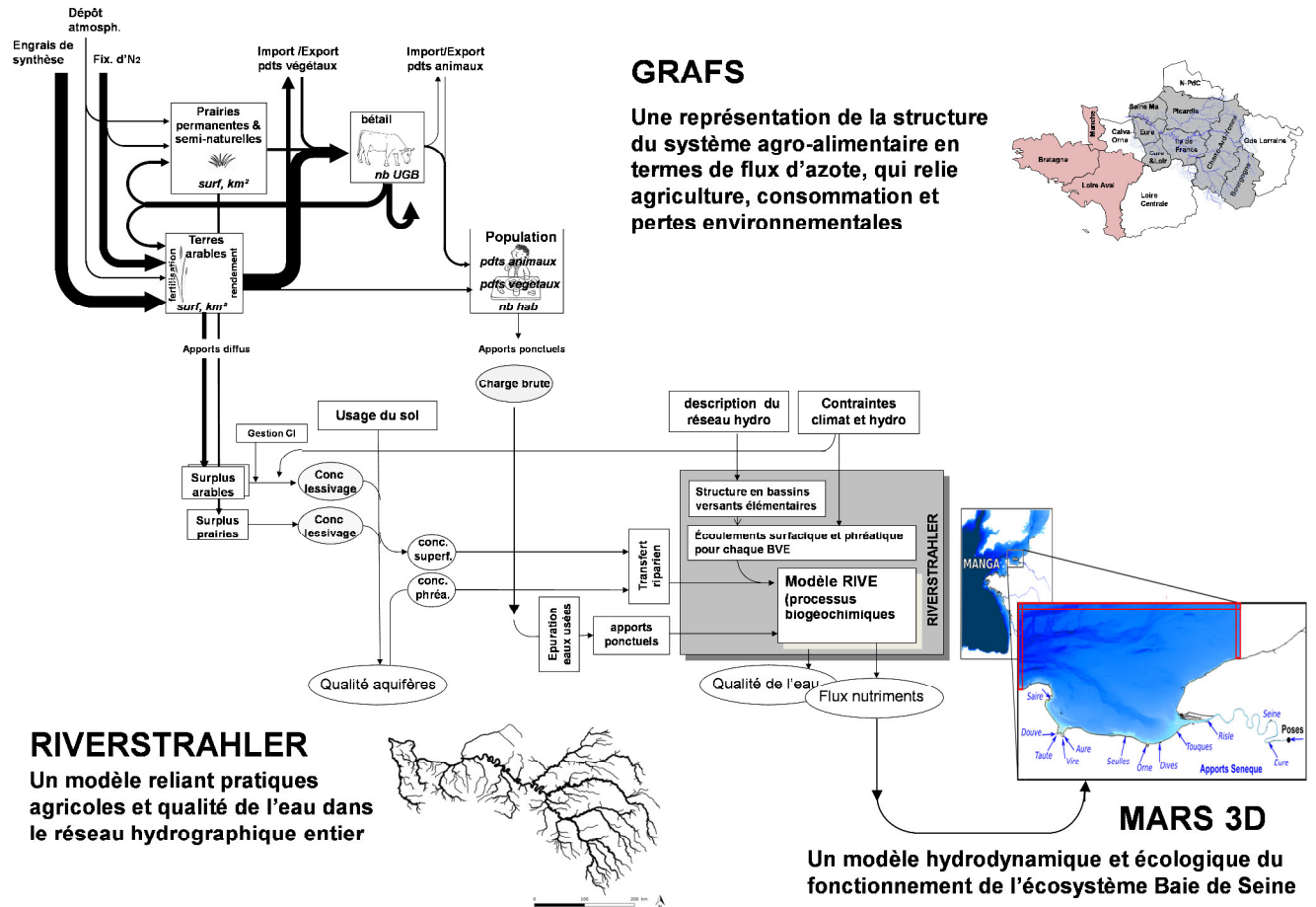


Figure 2: Architecture générale de la suite GRAFS-SENEQUE/RIVERSTRALER-ECOMARS3D.

Cette chaîne de modélisation permet de traiter indifféremment une situation de référence, renseignée par des données sur la situation actuelle de l'agriculture et de l'épuration des eaux, et validée par des observations de l'état de l'hydrosystème, ou des scénarios construits à partir d'un récit. Dans ce dernier cas, le modèle GRAFS est utilisé pour définir un nouveau système agro-alimentaire cohérent à partir des changements de pratiques agricole, de taille du cheptel ou d'usage des sols, et ainsi en déduire les pertes environnementales correspondant aux nouvelles conditions à explorer. Un algorithme, adjoint au modèle GRAFS, a été développé pour définir les nouvelles caractéristiques du système agro-alimentaire en fonction des contraintes imposées par le scénario.

2.2 Définition de la situation de référence

La situation de référence concerne la période de 2002 à 2014, représentatives des années de mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (EU-WFD, 2001). Ces années englobent des années contrastées, de bas et

haut débits, et des apports ponctuels évolutifs en fonction de l'implémentation des traitements en stations d'épuration (STEP) et des apports diffus correspondant à l'année 2006, tant en ce qui concerne l'usage des sols que les pratiques agricoles (Tableau 1).

Le tableau 1 résume les contraintes prises en compte pour les simulations couvrant la période 2002-2014.

Tableau 1. Contraintes prises en compte par Seneque/Riverstrahler pour le calcul des flux de nutriments aux exutoires de la Seine et des affluents.

	sources
Jeu de données	Seine-Normandie (AESN)
hydrologie	Ecoulements spécifiques reconstitués à partir de la Banque Hydro
Apports ponctuels	Step et industries renseignées par l'AESN ou l'AEAP
Apports diffus	
Usage du sol	Corine Land Cover
Concentrations associées	Pour les nitrates calculées à partir des surplus GRAFS par région agricole
Rétention riparienne	Zones humides définies par la couche nationale des zones humides potentielles (INRA Infosol - AgroCampus Ouest, 2010) et son croisement avec l'usage du sol
	Dénitrification potentielle fixée à 0.1 mmol/m3/h

Les rejets ponctuels urbains sont issus des bases de données des Agences de l'Eau. Les apports diffus de nitrates sont calculés à partir des surplus issus de l'analyse GRAFS de la chaîne agro-alimentaire réalisée pour l'année 2006 à partir des données Agreste, croisés avec les écoulements spécifiques moyens sur la période 2002-2014 (Figure 3), compte tenu d'un flux de lessivage dépendant de la couverture hivernale des sols.

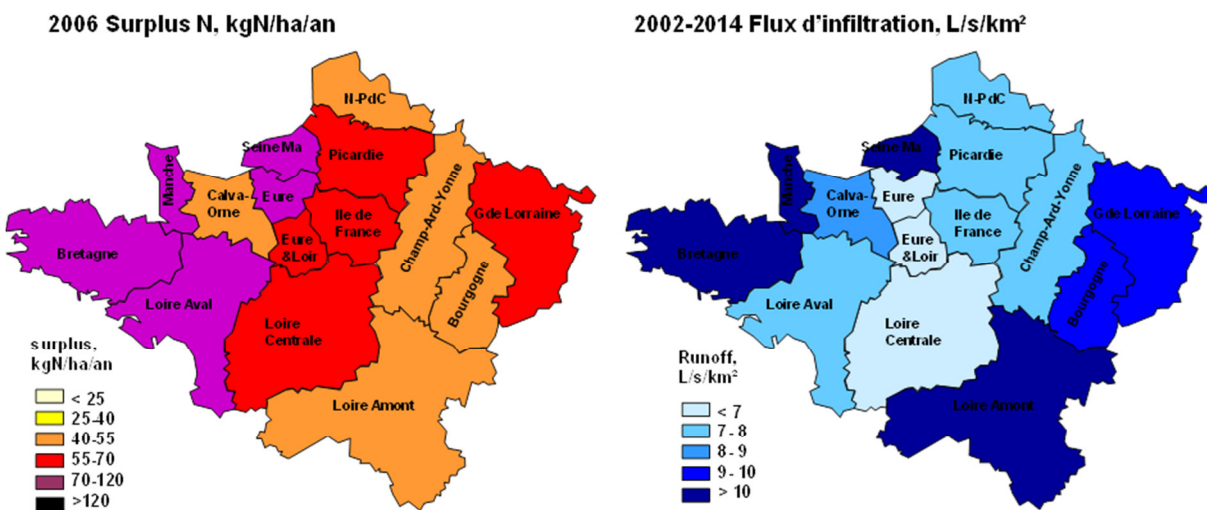


Figure 3. Surplus azotés des sols arables du Nord de la France, issus de l'analyse GRAFS du système agro-alimentaire en 2006 et flux moyen annuel d'infiltration sur la période 2002-2014.

Les variables sont calculées par le modèle Riverstrahler (et son environnement Seneque, Ruelland et al., 2007) avec une résolution temporelle de 10 jours (décade). Les processus écologiques qui dépendent du cycle journalier sont calculés à un pas de temps horaire, moyennés par 24h puis par décade.

Les valeurs des flux de nutriments à l'entrée de l'estuaire à Poses et aux exutoires des fleuves côtiers sont calculées selon les équations suivantes, qui incluent toutes les formes de N, P et Si, y compris les formes organiques :

FlxN Le flux d'azote total par décade, en kgN/dec, est calculé comme le produit du débit et des concentrations de la décade correspondante selon la relation :

$$\text{FlxN} = Q \times 3600 \times 24 \times 10 \times [(\text{NO}_3 + \text{NH}_4 + \text{NO}_2) \times 14 / 1000 + (\text{DIA} + \text{GRA} + \text{CYA} + \text{HD}_{1,2,3} + \text{HP}_{1,2,3}) / 7] / 1000$$

FlxP Le flux de phosphore total par décade, en kgP/dec, est calculé comme le produit du débit et des concentrations de la décade correspondante selon la relation :

$$\text{FlxP} = Q \times 3600 \times 24 \times 10 \times [(\text{PIT}) \times 31 / 1000 + (\text{DIA} + \text{GRA} + \text{CYA} + \text{HD}_{1,2,3} + \text{HP}_{1,2,3}) / 40] / 1000$$

FlxSi Le flux de silice biogénique totale par décade, en kgSi/dec, est calculé comme le produit du débit et des concentrations de la décade correspondante selon la relation :

$$\text{FlxSi} = Q \times 3600 \times 24 \times 10 \times [(\text{SIO} + \text{SIB}) \times 28 / 1000 + (\text{DIA}) / 12 \times 0.4 \times 28] / 1000$$

Ce sont ces valeurs de flux qui sont fournies en entrée du modèle ECO-MARS 3D qui couvre l'ensemble de la Baie de Seine, et la partie estuarienne de la Seine, de Poses à Honfleur.

3 Simulations des deux scénarios de base avec le modèle GRAFS

Les scénarios diffèrent essentiellement par 3 aspects : (i) la population, sa répartition spatiale, son régime alimentaire et les techniques d'assainissement mises en oeuvre ; (ii) les systèmes de cultures et les modes de fertilisation associés ; (iii) l'élevage et son degré de connexion avec les cultures.

Une fois définies ces caractéristiques pour chacun des scénarios, le modèle GRAFS, appliqué à l'ensemble du territoire français, calcule les performances du système à cette échelle pour s'assurer de sa cohérence en termes de capacité à nourrir la population française et à exporter sur les marchés internationaux.

3.1 Démographie et régime alimentaire

L'INSEE a réalisé une projection de l'évolution de la population française à l'horizon 2040, à l'échelle des départements. Ces projections sont basées sur différentes hypothèses d'accroissement de la population par rapport à 2013: une hypothèse basse, haute et centrale. Nous avons choisi de considérer l'hypothèse haute (Figure 4).

En ce qui concerne le scénario « Grand Paris », la projection INSEE prévoit un accroissement de la population de l'agglomération parisienne de 1.7 M d'habitants. Les quantités d'eau usées traitées par les usines actuellement en place ont été supposées accrues en proportion, avec le niveau de traitement imposé par la DCE.

Dans le scénario « Bio-Autonome et Demitarien », l'accroissement démographique de l'agglomération parisienne est réduit d'un million de personnes, au bénéfice des régions de l'Est du bassin, grâce à une politique volontariste de redynamisation des petites agglomérations rurales.

Dans le scénario « Agriculture Duale », c'est la population du scénario « Grand Paris » qui est considérée. Pour le scénario « Retour aux années 1980 », nous avons par contre conservé la population actuelle (2010).

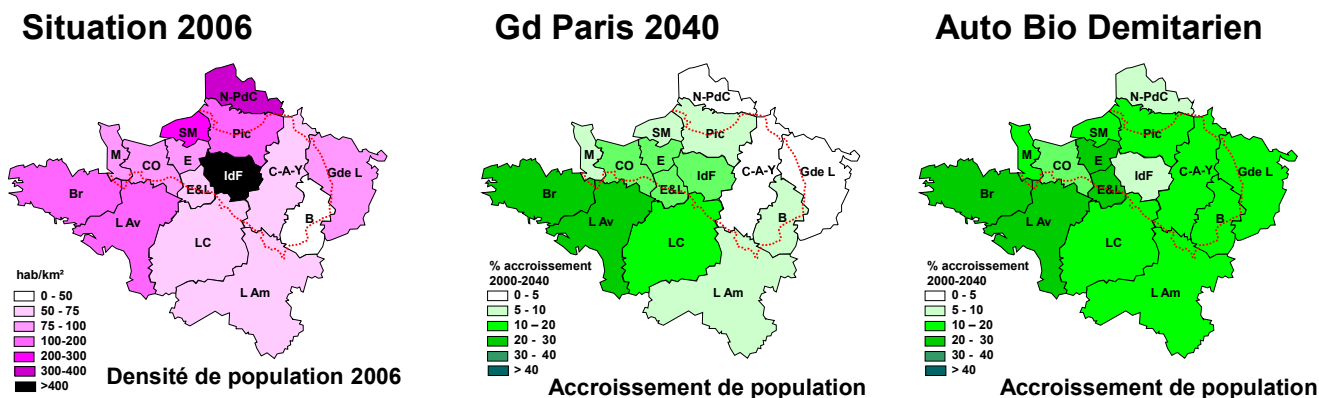


Figure 4. Densité de population en 2006 dans le bassin Seine Normandie et le Grand Ouest et accroissement prévu à l'horizon 2040 selon l'hypothèse haute de l'INSEE (Grand Paris 2040), et selon l'hypothèse de redistribution d'une partie de la population de l'agglomération parisienne (scénario Auto-Bio-Demitarien)

Dans le scénario Grand Paris, l'accroissement de population s'accompagne d'une **artificialisation des terres agricoles**, proportionnelle au nombre d'habitants supplémentaires, mais dépendant de la densité de population (Figure 5). Cette réduction n'est pas prise en compte dans le scénario Bio-Autonome qui fait l'hypothèse d'une densification des villes au rythme de leur accroissement.

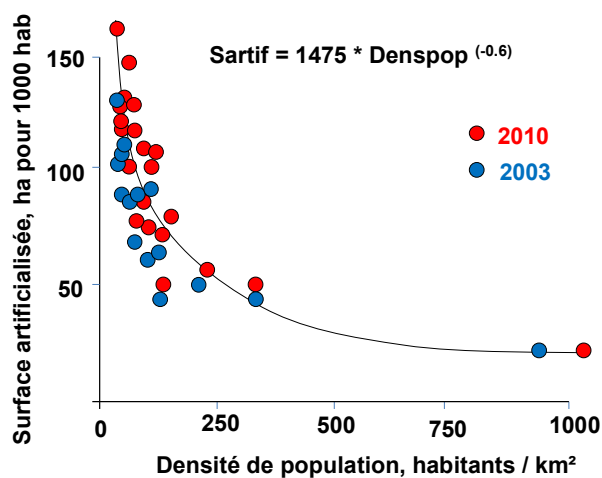


Figure 5. Taux de surfaces artificialisées par habitant en fonction de la densité de population. Données Terruti, compilées par Solagro (2016)

La question du **régime alimentaire** et en particulier de la place qui occupent les produits animaux, est centrale dans les scénarios. Cette question est au centre de vives controverses entre éthique, santé publique et défense de l'environnement. Le mouvement vegan et antispéciste, théorisé par des auteurs comme Peter Singer (1971), et relayé par l'activisme d'associations comme L214, s'oppose à toute consommation alimentaire des animaux.

Au contraire, un auteur comme Dominique Lestel (2011), dans son ouvrage « Apologie du Carnivore » assume totalement la consommation de viande qui, dit-il, « ... nous engage au plus profond de ce que nous sommes en tant qu'humains, (...) et nous rappelle constamment que nous sommes nous-mêmes des animaux issus de la chair d'autres animaux, (...) pas des extra-terrestres connectés à Google » ! Jocelyne Porcher (2010), plus nuancée, cherche à retrouver le sens des relations de travail que l'homme entretient avec les animaux notamment dans la pratique de l'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 (<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, soit un régime proche du régime méditerranéen, reconnu par les diététiciens comme particulièrement sain.

La part des protéines animales dans notre alimentation est passée de 30% à 65% de l'ingestion totale de protéines en 50 ans (Figure 6a). Revenir à 35% n'est donc pas impossible et c'est l'hypothèse retenue pour le scénario Bio-Autonome et donc... -Demitarrien (Figure 6c). Certains pourtant, comme la Chambre d'Agriculture de Normandie (2006) dans son étude prospective sur l'alimentation, continuent d'indexer la consommation de viande sur le développement économique : c'est l'hypothèse que nous avons retenue pour le scénario d'Ouverture et de Spécialisation (Figure 6b).

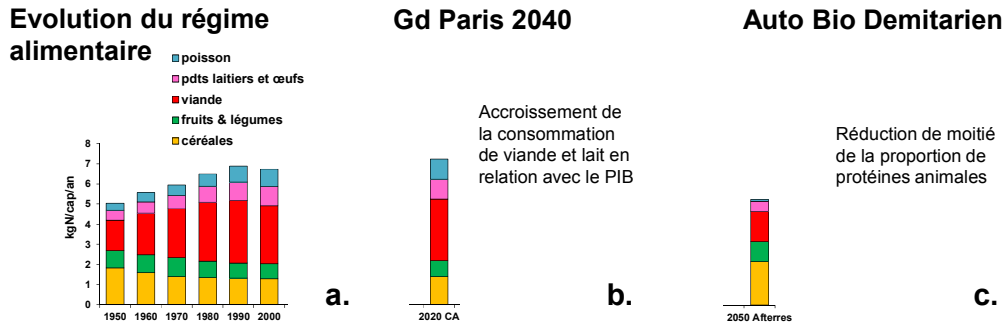


Figure 6. Régime alimentaire de la population française (a.) de 1950 à 2000 ; (b) à l'horizon 2040 selon le scénario de la Chambre d'Agriculture de Normandie (2006) ; (c) selon les prescriptions de la Déclaration de Barsac et du scénario Afterres2050 de Solagro (2017).

3.2 Systèmes de culture et mode de fertilisation

Indépendamment du détail des rotations et des itinéraires techniques mis en œuvre, il existe, dans un contexte pédo-climatique et technique donné, une relation robuste entre le rendement exprimé en azote et les apports totaux d'azote au sol. Cette relation peut se représenter par une hyperbole à un seul paramètre Y_{max} qui caractérise les performances agricoles du système. Cette relation vaut pour toutes les rotations, quelle que soit la nature de leur fertilisation. Ainsi, la même relation rendement - fertilisation totale vaut pour les rotations conventionnelles, généralement courtes et dominées par la fertilisation synthétique, comme pour les rotations biologiques, généralement longues et diversifiées et où les légumineuses comme la luzerne, le trèfle ou le sainfoin assurent, par fixation symbiotique, l'essentiel des apports d'azote (Figure 7).

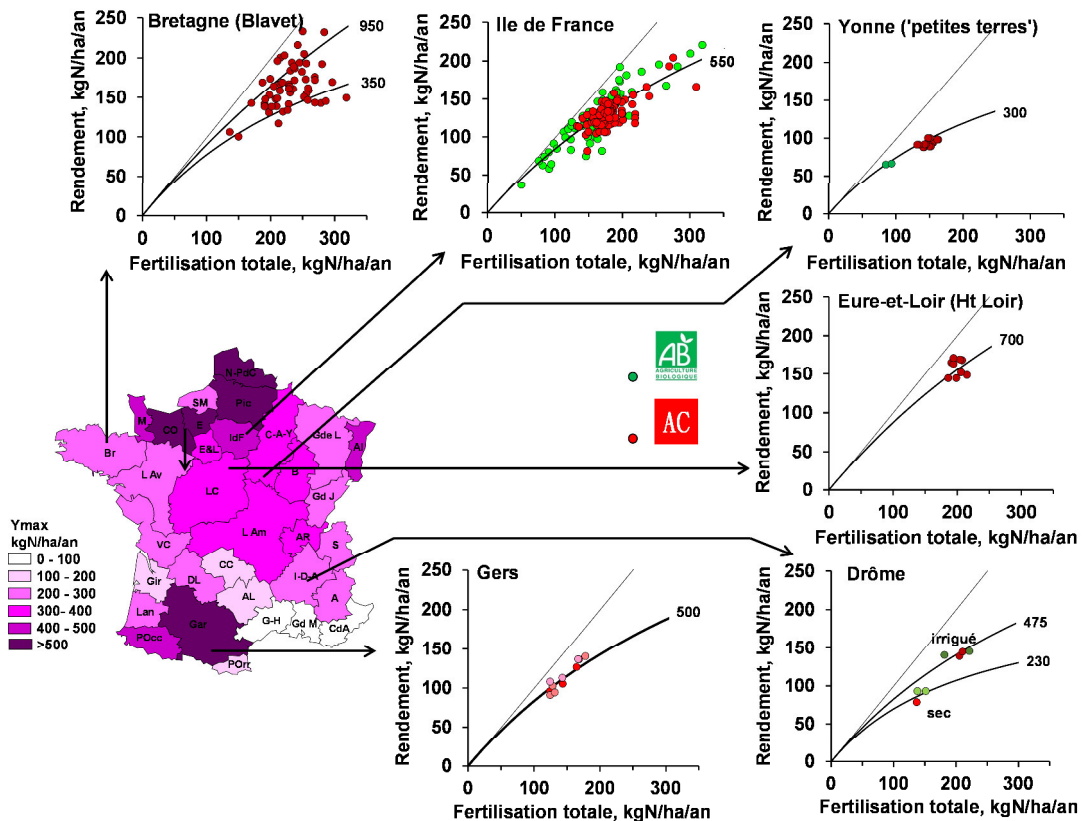


Figure 7. Relation rendement-fertilisation observée dans diverses régions agricoles françaises pour une série de rotations culturales ayant fait l'objet d'enquêtes détaillées, tant en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle. Globalement, à niveau d'intensification égale, l'agriculture biologique n'est pas moins productive que l'agriculture conventionnelle. (Sources : Anglade et al, 2015, 2017 pour l'Ile de France et l'Yonne; Projet ANR Escapade pour la Bretagne, l'Eure et Loir et le Gers, Brice Lemaire (pers comm) pour la Drôme)

La relation rendement-fertilisation totale observée aujourd’hui dans chaque région agricole est supposée valable à l’horizon 2040. Elle permet de calculer la production agricole totale en fonction des apports de fertilisants. Le scénario d’ouverture est caractérisé par des rotations conventionnelles (celles qui dominent aujourd’hui), avec cependant la généralisation des pratiques de l’agriculture raisonnée, limitant les surplus d’azote des terres arables à une valeur de 50 kgN/ha/an. Dans le scénario d’Autonomie, on généralise les rotations longues et diversifiées de l’AB, sans aucun recours aux engrais de synthèse.

3.3 L’élevage et sa connexion aux systèmes de cultures

En ce qui concerne l’élevage, le scénario Grand Paris pousse à l’extrême la spécialisation actuelle des régions françaises, c’est-à-dire que l’élevage et les prairies permanentes sont totalement exclus des régions de grandes cultures du centre du bassin parisien. Ailleurs, la densité d’animaux est poussée au maximum de ce qui est permis par les directives européennes, soit un peu plus de 2 ugb/ha SAU, ou 180 kgN/ha de déjections à épandre (Figure 8).

Dans le scénario d’Autonomie, 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, avec la contrainte d’une alimentation exclusivement locale (pas de foin ni de soja importés !) avec au moins 33% d’herbe issue de prairies permanentes dont la surface est réajustée en conséquence (Figure 8).

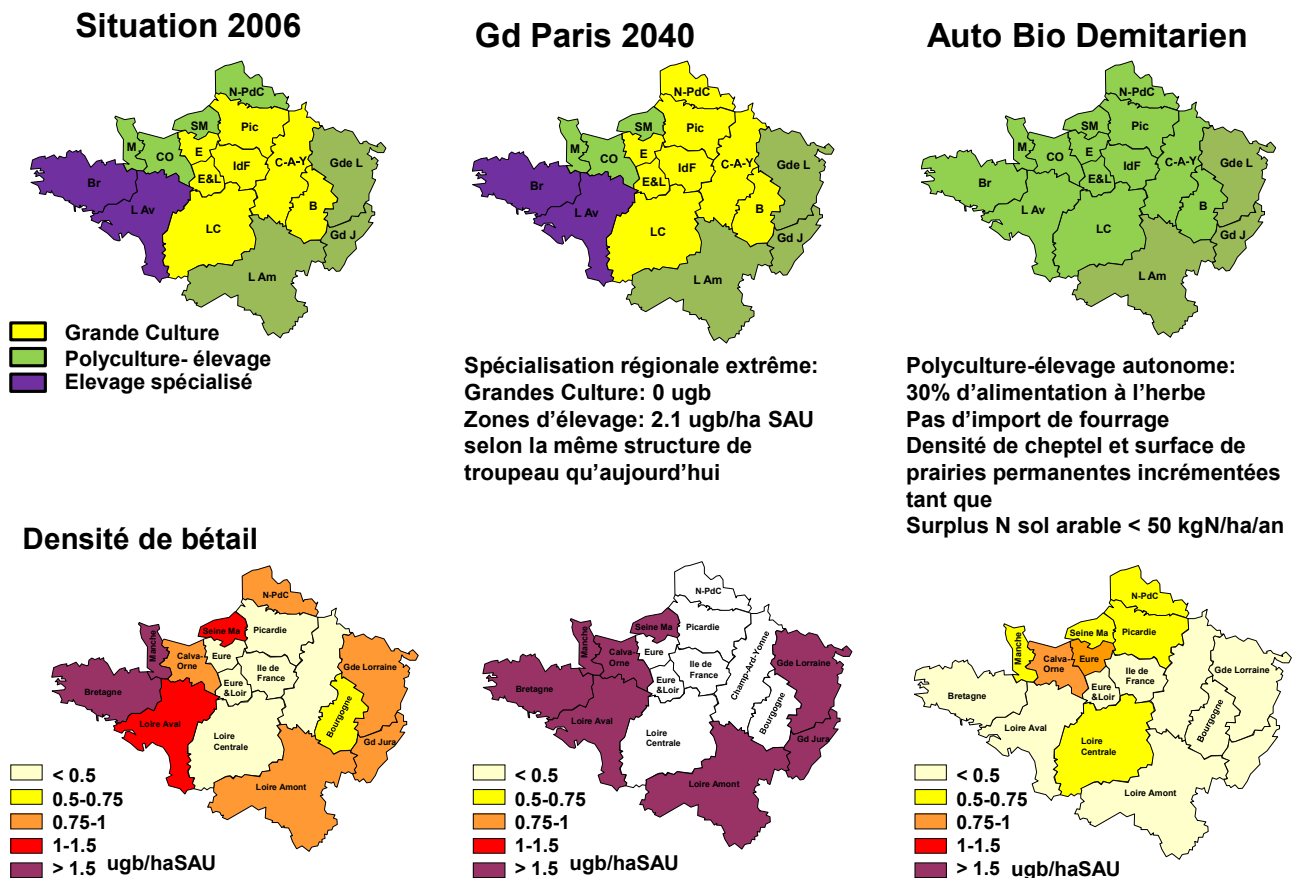


Figure 8. Spécialisation des territoires agricoles et densité d’élevage dans les régions du bassin Seine Normandie et Grand Ouest dans la situation actuelle et dans les deux scénarios Grand Paris et Autonome.

3.4 Le fonctionnement du système agro-alimentaire français

Le Tableau 2 rassemble les indicateurs généraux qui permettent d'évaluer la capacité du système Agro-alimentaire français à rencontrer les besoins alimentaires de la population nationale dans les deux scénarios.

Sans surprise, et presque par construction, le **scénario Grand Paris** produit davantage et peut exporter plus de céréales que le système dans son fonctionnement actuel. Les effectifs du bétail ont presque doublé, ce qui permet d'alimenter une population de 75 Mhab carnivores, et d'exporter en masse de la viande industrielle et de la poudre de lait. Ceci ne peut cependant se faire qu'au prix d'un accroissement d'un facteur de plus de 6 des importations de soja.

Le **scénario Bio-Autonome-Demitarrien** au contraire voit une réduction presque de moitié du cheptel. La production de viande et de lait suffit cependant à assurer la consommation de la population de 75 millions d'habitants demitariens sans qu'aucune importation de soja ne soit nécessaire. Pour autant, chaque région n'est pas autosuffisante en protéines animales, en particulier l'Ile de France, les régions lyonnaises et Marseillaise doivent faire appel à une importation intra-nationale de viande et de lait. Mais ces mouvements restent infiniment plus limités que ceux qui ont lieu actuellement entre régions. On n'exporte plus de poudre de lait. La production végétale quant à elle a diminué de 10%, mais reste suffisante pour assurer des exportations de céréales du même ordre qu'actuellement.

Tableau 2. Indicateurs généraux du fonctionnement du système agro-alimentaire français dans le système actuel (2006) et les deux scénarios Grand Paris et Bio-Autonome-demitarrien.

		2006 Référence	2040 Ouvert Spécialisé	2040 Autonome Biologique Demitarrien
Population	Mhab	64	75	75
Surface agricole	Mha	28	25	28
% prairies permanentes	%	34	25	37
Production terres arables	ktN/an	2013	2122	1802
Import (+) / Export(-) céréales	ktN/an	-336	-432	-309
Effectif bétail	Mugb	20	36	13
Production viande et lait	ktN/an	279	398	144
Import (+)/ Export (-) viande et lait	ktN/an	-37	-52	0
Ingestion par le bétail	ktN/an	2107	3749	1326
Ingestion herbe prairies perm	%	41	22	44
Ingestion production arable locale	%	38	26	56
Ingestion sur fourrage importé	%	21	52	0
Import(+)/Export (-) aliment bétail (soja)	ktN/an	+284	+1950	0

4 Simulation de l'état des hydrosystèmes dans les 5 scénarios

La suite GRAFS-RIVERSTRAHLER-ECOMARS permet de poursuivre l'évaluation des 5 scénarios jusqu'au calcul des concentrations et des flux de nutriments dans le réseau hydrographique, et du niveau d'eutrophisation qui en résulte dans les eaux marines côtières, en comparaison avec la situation de référence actuelle modélisée de la même façon. La situation des années 2010 à 2012 a été choisie pour cette comparaison.

4.1 Etat des eaux de surface du réseau hydrographique

La distribution des concentrations moyennes en nitrates et en phosphate est présentée dans les figures 9 et 10. Les variations saisonnières des concentrations en nitrates sont à l'exutoire de la Seine fluviale (à Poses), de l'Eure et de la Risle, ainsi qu'en trois stations de l'estuaire, sont montrées à la figure 11.

Il apparaît clairement que le retour aux années 1980 serait la pire des situations par rapport à la référence actuelle, alors que le scénario de changement radical du système agro-alimentaire (Bio-Autonomie-Demitarrien) serait le meilleur en termes de contamination nitrique. Il est intéressant de remarquer que le scénario du Grand Paris diminue la concentration en nitrate à des valeurs au-dessous de celles de la référence pour la Seine à Poses (Figures 9 et 11) en raison d'un meilleur niveau d'épuration des eaux usées parisiennes, l'option mixte 'duale' diminuant les teneurs en nitrate à un niveau un peu au-dessous de la vision Grand Paris. En revanche, pour l'Eure comme pour la Risle, la situation du Grand Paris détériore la qualité de l'eau en nitrates.

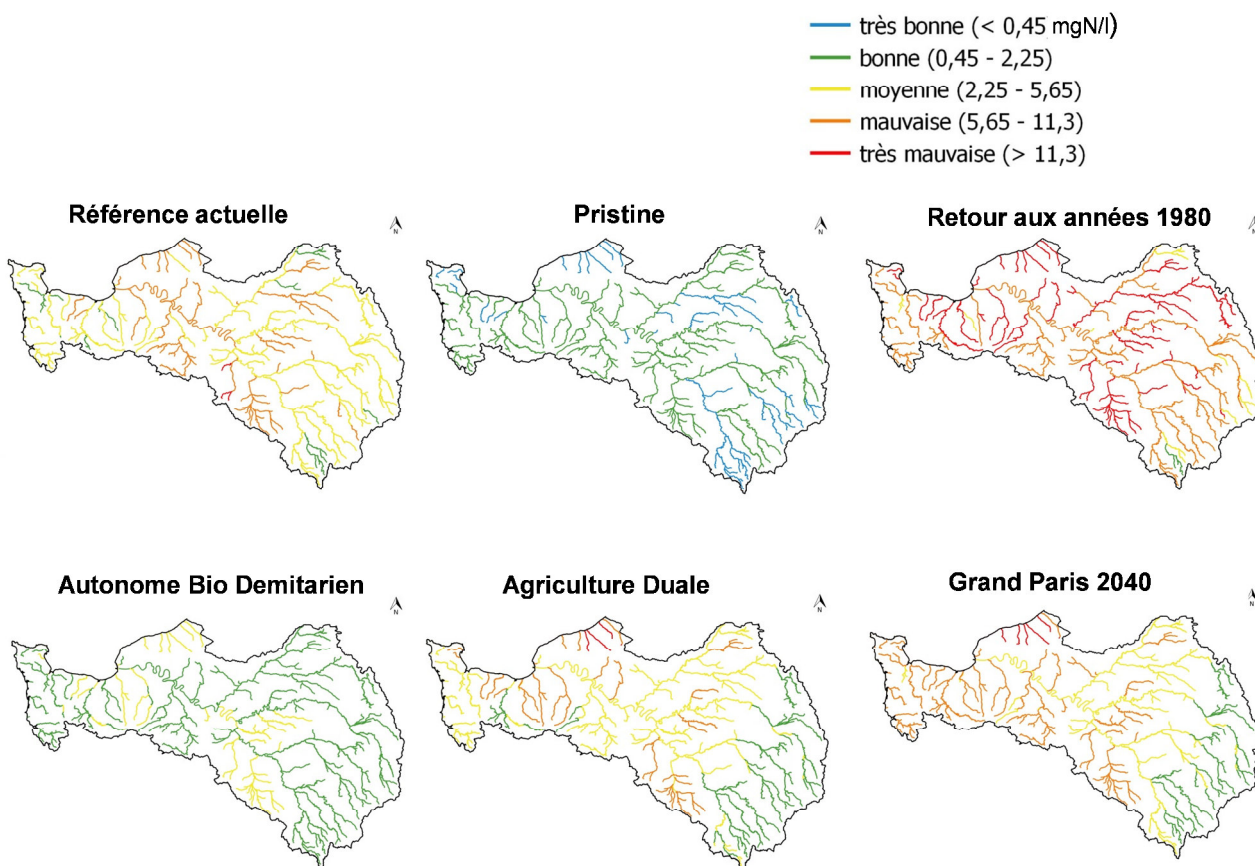


Figure 9. Distribution des concentrations moyennes en nitrates dans le réseau hydrographique de la Seine pour les 5 scénarios étudiés.

En ce qui concerne les phosphates, il apparaît que si l'augmentation de la population –indépendamment de sa répartition- est associée à un traitement aux normes DCE, leur teneur est dans la gamme de qualité de bonne à très bonne (Figure 10).

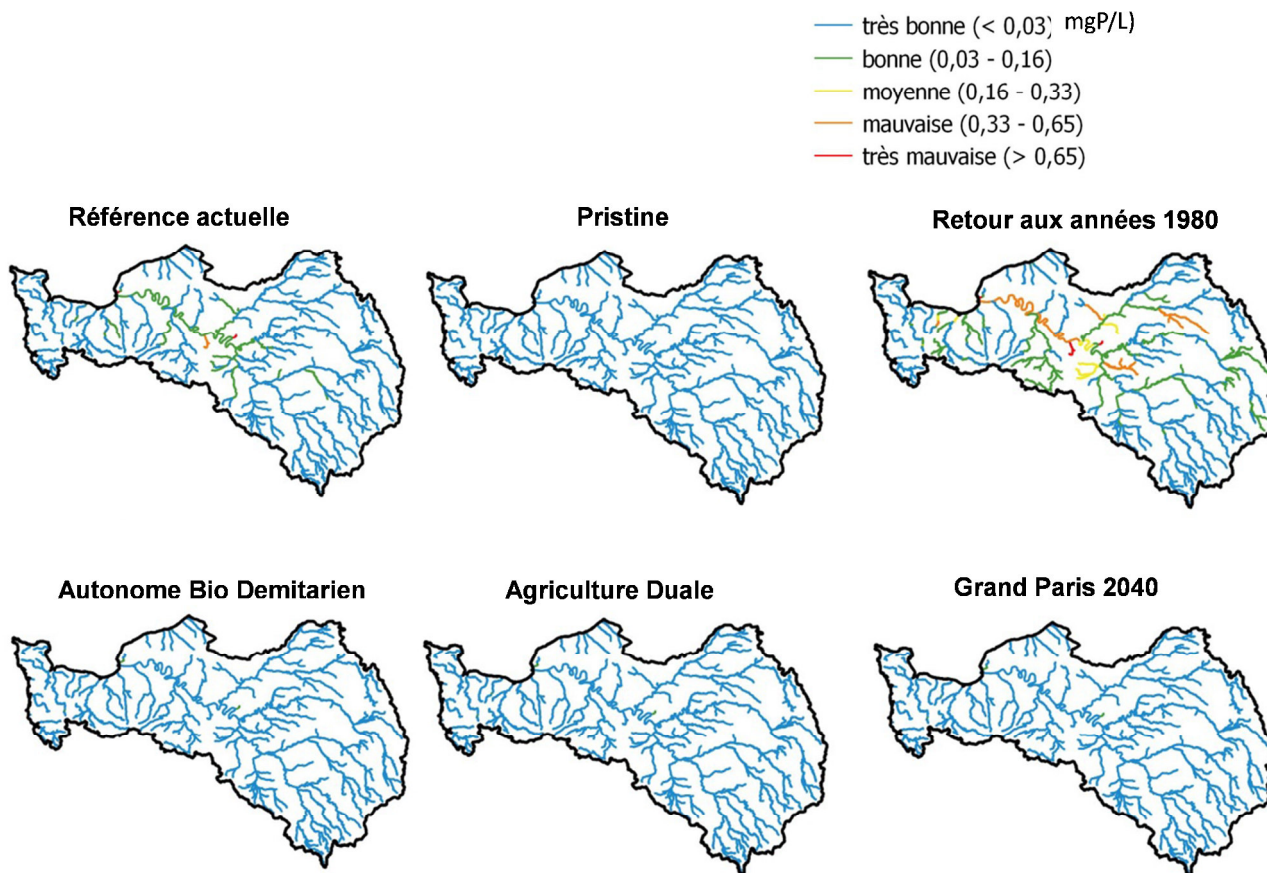


Figure 10. Distribution des concentrations moyennes en phosphates dans le réseau hydrographique de la Seine pour les 5 scénarios étudiés.

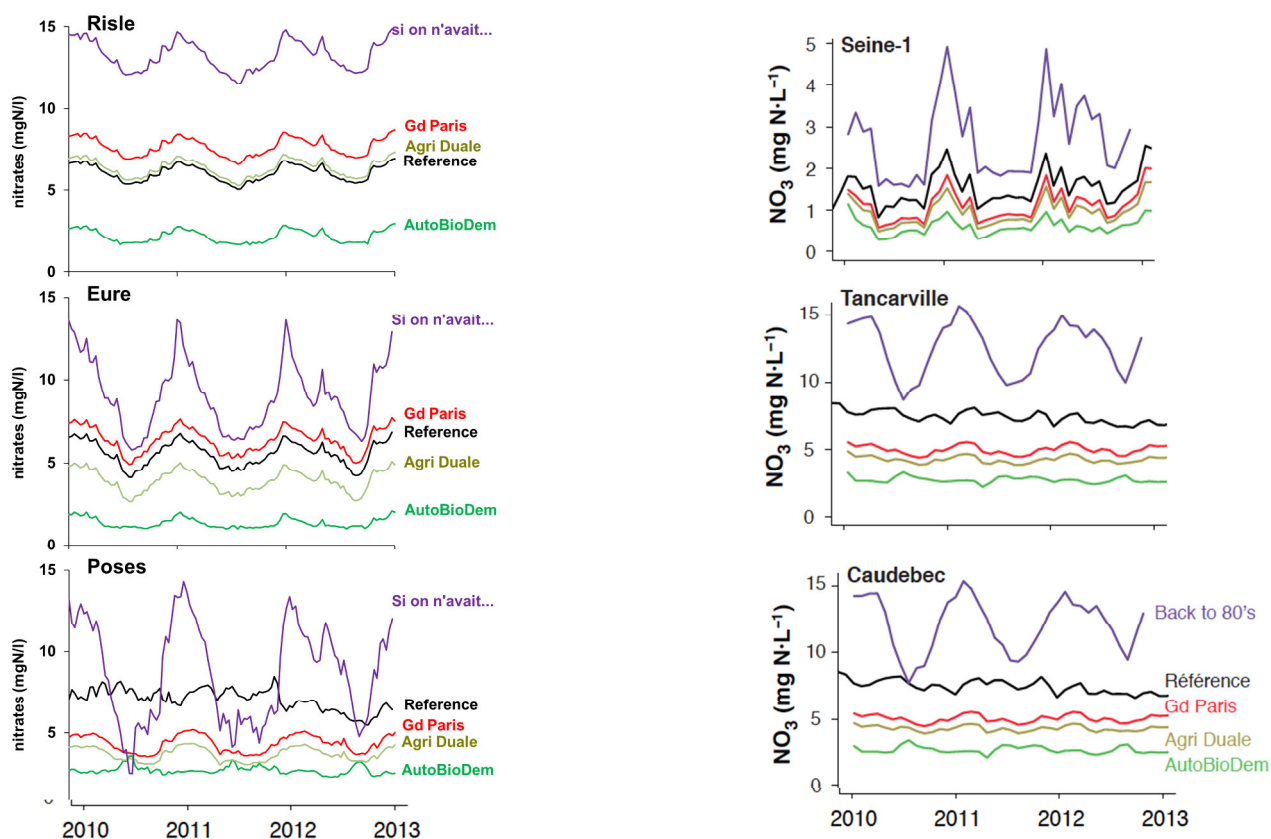


Figure 11. Variations saisonnières et interannuelles de la concentration en nitrates à l'exutoire de la Seine fluviale (Poses), de l'Eure et de la Risle, ainsi qu'à Caudebec, Tancarville et au large d'Honfleur (bouée Seine-1), pour les 5 scénarios testés.

4.2 Flux de nutriments et développement des blooms d'algues indésirables en Baie de Seine

Les calculs des flux moyens annuels (2010-2013) pour la situation de référence et pour les différents scénarios à l'exutoire de la Seine à Poses permettent d'en quantifier l'effet sur l'eutrophisation de la Baie de Seine (Figure 12).

Les flux de silice, apport diffus naturels, associés à l'altération des roches du bassin versant ne changent guère. Les flux de phosphore sont maximums pour le scénario de retour aux années 1980. Ces flux sont peu différents entre scénarios, compte tenu de l'hypothèse d'un traitement aux normes DCE pour tous les autres scénarios, et proches de la situation de référence, ce qui montre que l'essentiel du traitement des apports diffus est actuellement réalisé (Figure 12).

En ce qui concerne les flux d'azote, les différences de valeurs obtenues entre la période de référence et les années 1980, montrent principalement l'effort fait en matière de traitement tertiaire des eaux usées (nitrification en 2007, et dénitrification en 2011). Le scénario Bio-autonome-démocratique réduit d'environ 50% les flux de référence en azote grâce à une réduction importante des apports diffus de l'agriculture. Le scénario Grand Paris diminue de 25% les flux d'azote à Poses. L'agriculture duale les réduit de 40%.

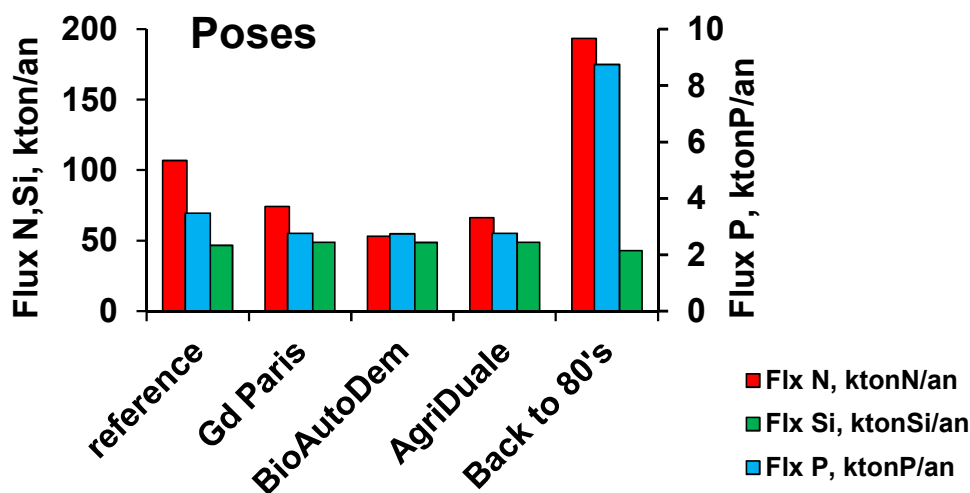


Figure 12. Flux d'azote de phosphore et de silice à l'exutoire du bassin de la Seine fluviale à Poses dans la situation de référence et les 4 scénarios étudiés.

La manifestation première de l'eutrophisation côtière consiste dans le développement d'algues non siliceuses (dinoflagellés) qui bouleversent la chaîne trophique et s'accompagne souvent de la production de toxines rendant les coquillages impropres à la consommation humaine.

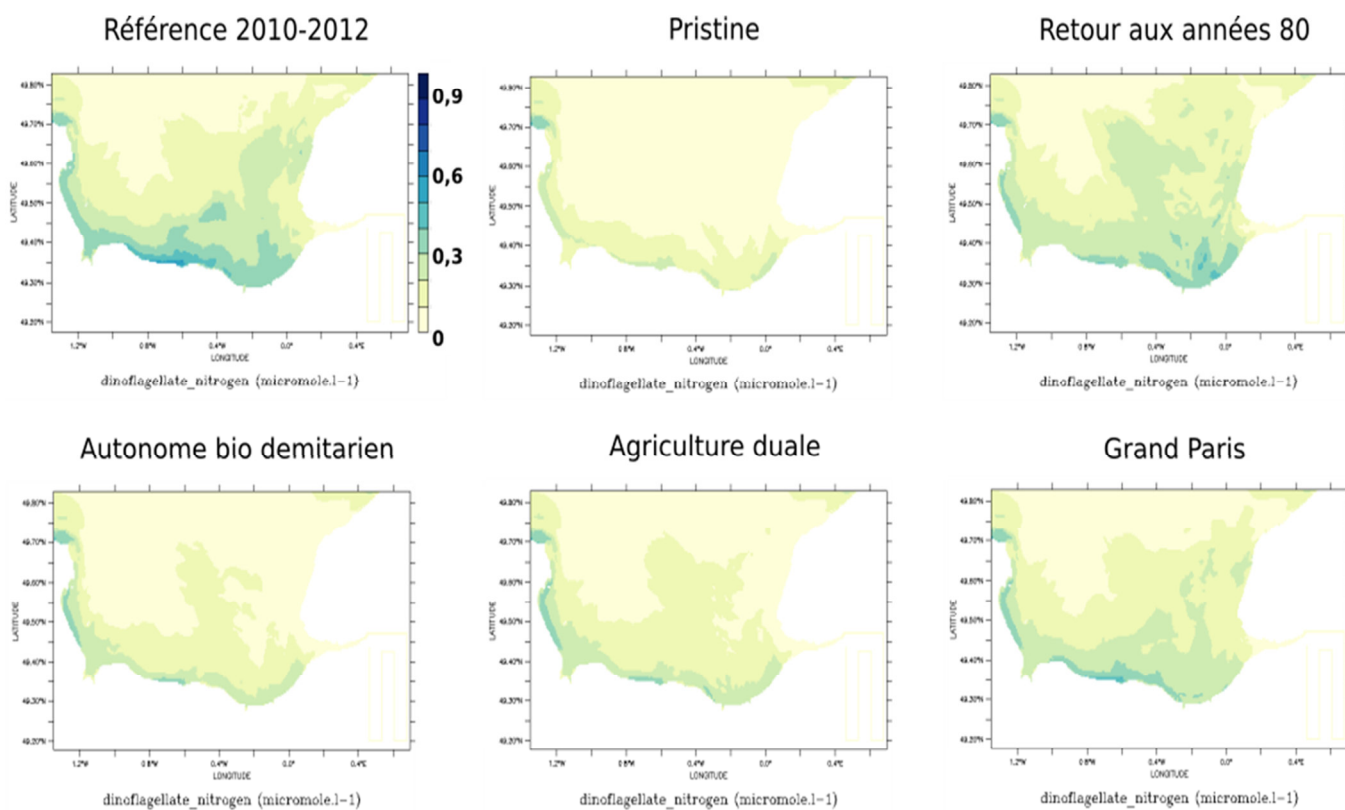


Figure 13. Développement maximum des algues non-siliceuses (biomasse des dinoflagellés en $\mu\text{molN/l}$) en Baie de Seine dans la référence et les 5 scénarios étudiés au cours de la période 2010-2012.

Conclusions

Les résultats présentés ici démontrent avant tout la capacité que nous avons développée de traduire de façon opérationnelle les narratifs de divers scénarios prospectifs du système territorial en jeux de contraintes quantitatives utilisables pour alimenter une suite de modèles permettant de calculer les conséquences de ces scénarios en termes de fonctionnement biogéochimique du système agro-alimentaire et de qualité de la ressource en eau.

Les scénarios que nous avons décrits montrent l'étendue des options possibles qui s'offrent à l'organisation de la chaîne agro-alimentaire territoriale future. Ils permettent ainsi d'instruire un débat sur l'avenir du territoire tenant compte des nombreuses interrelations entre divers aspects de son fonctionnement.

Bibliographie

- Anglade J, Billen G, Makridis T, Garnier J, Puech T et 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, G. Billen, J. Garnier (2017). Reconquérir la qualité de l'eau en régions de grande culture : agriculture biologique et reconnexion avec l'élevage. Fourrages. In press.
- Attali J., 2010. Paris et la mer. La Seine est capitale. Ed. Fayard. 193 pp.
- Benhalima, M. (2015) Analyse du système agro-alimentaire de la région Nord-Pas de Calais et ses enjeux sur l'eau. Etudes et Documents n° 125. Commissariat Général au Développement Durable. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ED125.pdf>
- Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie (2006). 2020 : Que mangerons-nous? www.normandie.chambagri.fr/eco_prosp.asp
- Découflé, C. (1980). La prospective. PUF.
- DREAL HN, 2014. Scénarios prospectifs de développement de la Vallée de Seine à l'horizon 2040. Etude. <http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/prospective-vallee-de-la-seine-2040-a250.html>
- Duszinski, J. 2013. Filière céréales en Vallée de Seine : Quelles perspectives de développement ? Mémoire projet MBA Maritime, Transport et Logistique.
- Gorgeu, Y. (2007). Le paysage : un projet territorial. Une opportunité pour repenser la planification, renforcer l'urbanisme opérationnel et accélérer la transition énergétique, à l'exemple des PNR. PAP (Paysages de l'après pétrole, n°5, janvier 2017).
- HAROPA (2015) Projets stratégiques HAROPA 2030. http://www.haropaports.com/projets_strategiques/
- Lestel D. (2011) Apologie du carnivore. Fayard.
- Porcher J (2011). Vivre avec les animaux : une utopie pour le XXIe siècle. La Découverte.
- Singer P. (1975) Animal Liberation. A new ethic for our treatment of animals. Harper Collins Ed.
- Solagro (2014) Afterres2050 : Un scénario soutenable pour l'agriculture et l'utilisation des terres en France à l'horizon 2050. <http://www.solagro.org/site/393.html>