

Projet Seine-Aval 5

RESET

« Rôle de l'Estuaire de Seine dans l'Ecologie
Territoriale de la Normandie : cycles des
nutriments et systèmes hydro-agro-alimentaires »

Janvier 2018

Coordination : Josette Garnier

**Co-Auteurs : Sabine Barles, Gilles Billen, Sabine Bognon, Estela Romero, Romain Le Gendre,
Marie Silvestre, Antsiva Ramarson, Vincent Thieu, Sylvain Théry,
Jérôme Castaings et Philippe Riou**



GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

TABLE DES MATIERES

RESUME EXECUTIF	4
SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET	6
PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET	6
RESULTATS	7
Introduction	7
1 Décrire et modéliser le système agroalimentaire : méthodes et outils	8
1.1 Recherche de documentation et entretiens	8
1.2 Exploitation de la base de données SiTraM	9
1.3 Chaîne de modélisation GRAFS-Seneque/Riverstrahler	11
1.4 Modélisation estuarienne et marine ECOMars3D	12
2 La trajectoire socio-écologique du système agro-alimentaire normand, début XXe – début XXIe siècles	16
2.1 Un système intégré au service du local et de Paris (début XXe - fin des années 1950)	17
2.2 Industrialisation, mondialisation, sectorisation : un système ouvert	21
2.2.1 L'émergence et la pérennisation d'un nouveau régime (début des années 1960 - fin des années 1980)	21
2.2.2 Un système en réajustement sous injonction environnementale (début des années 1990 - fin des années 2000)	29
2.3 L'émergence de signaux faibles : vers la remise en question du système ? (Fin des années 2000 - ?)	34
2.4 Éléments de conclusion	37
3 La trajectoire hydro-écologique de la Basse Seine	39
4 Modélisation du fonctionnement biogéochimique actuel de l'estuaire de Seine	42
4.1 Les enjeux de la qualité de l'eau	42
4.2 L'estuaire de Seine : une zone filtre entre le fleuve et la mer ?	42
4.2.1 Dynamique du système estuarien sur la période de référence 2009-2013	42
4.2.2 Bilan des flux de nutriments : transformation, rétention, export	47
5 Scénarios prospectifs	49
5.1 Objectifs et méthode de la prospective	49
5.2 Les 4 scénarios prospectifs	50
5.2.1 Le futur radiex du Grand Paris et l'hyper-spécialisation des territoires agricoles	50
5.2.2 Un futur bio-autonome-démocratique, sobre et écologiquement vertueux	50
5.2.3 Une agriculture duale	51
5.2.4 Et si rien n'avait été fait en matière de réglementation depuis 40 ans ? ou le retour aux années 80	51

5.2.5	Le scénario Pristine	51
5.3	Résultats de la modélisation des 5 scénarios	52
5.3.1	Concentrations en nutriments dans le bassin de la Seine et l'estuaire pour la référence et les 5 scénarios	52
5.3.2	Bilan des flux de nutriments dans l'estuaire pour les 5 scénarios et la référence	56
5.3.3	Influence des 5 scénarios sur la dynamique du phytoplancton en milieu marin	59
	Conclusion	64
	BIBLIOGRAPHIE	67
	ANNEXES	72



RESUME EXECUTIF

Il existe un lien étroit entre l'organisation du système agro-alimentaire des régions Normandes (c'est-à-dire la manière dont sont produits, transformés, distribués et consommés les biens alimentaires) et la qualité de l'eau, expression du fonctionnement écologique de l'estuaire de la Seine, lui-même indissociable du fonctionnement du réseau hydrographique amont et de son bassin versant. C'est donc une démarche très englobante d'**écologie territoriale** qui a été initiée en interdisciplinarité dans le projet RESET pour analyser le fonctionnement actuel de l'estuaire de la Seine dans le contexte du système agro-alimentaire Normand et ses tendances évolutives.

Plusieurs **outils méthodologiques** originaux ont été mis au point à cet effet. L'analyse de la base de données SiTraM sur le transport de marchandises entre départements a été rendue possible grâce au développement d'un logiciel dédié (Amstram), recodé en Python dans le cadre du projet.

Une chaîne de modélisation (GRAFS-Seneque/Riverstrahler) a permis de relier la description des flux de matière à travers les principaux compartiments du système agro-alimentaire avec les apports diffus et ponctuels à l'hydrosystème, et de permettre ainsi une modélisation complète des transferts de nutriments depuis les bassins versants jusqu'à l'exutoire du réseau hydrographique.

Le modèle hydrodynamique côtier MARS-3D développé par l'Ifremer et appliqué avec succès sur des écosystèmes côtiers a été étendu au contexte estuarien entre Tancarville et Poses. La mise à jour des données bathymétriques et le calage de l'hydrodynamique estuarienne et de la dynamique sédimentaire du bouchon vaseux, mais aussi l'ajout des processus biogéochimiques liés à l'oxygène et aux groupes de phytoplancton et zooplancton d'eau douce en plus des groupes marins existants, ont permis de mettre au point un outil de modélisation fiable du fonctionnement biogéochimique estuarien, utilisant en conditions limites amont les flux calculés par le modèle Seneque/Riverstrahler à Poses et à l'exutoire de l'Eure et de la Risle.

Pour caractériser les déterminants politiques, écologiques, économiques et sociaux qui fondent la géographie du système agro-alimentaire normand, outre une recherche bibliographique et une analyse d'archives approfondies, des enquêtes ont été menées auprès des principaux acteurs du système régional.

Ces outils ont permis de retracer de manière synthétique la **trajectoire historique** du système agro-alimentaire normand depuis le début du XXe siècle.

Du début du XXe siècle à la fin des années 1950, se met en place un régime socio-écologique hybride, marqué encore par un haut degré d'autonomie alimentaire et par la prévalence de la polyculture-élevage, même si sont déjà présentes des caractéristiques de métabolisme à cycle ouvert liées aux exportations agricoles vers la région parisienne, un transit important de marchandises par les ports et l'abandon du recyclage des excréta urbains.

À partir des années 1960, ce régime bascule vers toujours plus de linéarité dans un contexte d'industrialisation, de spécialisation et de mondialisation. L'agriculture se spécialise, soit vers les grandes cultures, comme dans l'Eure, soit vers un élevage spécialisé, comme dans la Manche, et a recours à toujours plus d'intrants (engrais de synthèses, aliments pour bétail importés). La grande distribution prend le pas sur le commerce de détail et contrôle une

grande part de l'approvisionnement alimentaire Normand à travers ses centrales d'achats. La Normandie devient une région exportatrice de produits agricoles, qui cesse de se nourrir elle-même, non qu'elle ne puisse le faire compte tenu de ses productions, mais parce les mutations de la distribution et du commerce alimentaire ont contribué à les dé-territorialiser.

Ce régime socio-écologique atteint son apogée dans les années 1980. Plusieurs éléments, conduisent alors à des adaptations à la marge, le plus souvent initiées par un souci croissant de protection de l'environnement, qui pérennisent plus qu'elles ne remettent en question le régime dominant. Enfin, au cours des dernières années, des signaux faibles sont détectables et pourraient annoncer une transition, qui est pourtant loin d'être pleinement engagée, et donc loin d'être achevée, ni d'ailleurs certaine, vers une relocalisation et une re-circularisation du fonctionnement du système agro-alimentaire.

L'analyse de **l'évolution de la qualité de l'eau** de l'axe principal de la Seine (entre l'amont de Paris et Poses) au cours de cette trajectoire séculaire du système hydro-agro-alimentaire révèle un parallélisme très clair. Les apports diffus de nitrate liés à l'agriculture montrent, en amont de Paris, une croissance continue depuis les années 1960 avec une stabilisation depuis la fin des années 1990. En revanche, l'amélioration du traitement des eaux usées urbaines conduit à une amélioration par pallier aux dommages résultants des apports ponctuels (déficit en oxygène, contamination en phosphore et en ammonium). La simulation du fonctionnement biogéochimique de l'estuaire permet d'en évaluer le **rôle filtre** vis-à-vis des nutriments qui lui parviennent depuis le bassin versant amont. Ce rôle apparaît significatif, mais assez limité et variable d'une année sur l'autre en fonction de l'hydraulicité : de 12 à 20% pour l'azote total, de 25 à 35% pour le phosphore, de 5 à 20% pour la silice. Toutefois, les outils de modélisation mis en œuvre ne permettent pas d'évaluer l'impact d'une restauration des habitats sur l'intensité de la rétention des éléments nutritifs.

Le dernier volet du projet a consisté à élaborer 4 **scénarios d'évolution à 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. 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.

Le scénario intitulé *Le futur radieux du Grand Paris et l'hyper-spécialisation des territoires agricoles*, décrit une vision poussant jusqu'à l'extrême une orientation marquée par le désir de croissance économique très présent dans les discours officiels, qui s'accompagne de l'accroissement de la spécialisation territoriale dans la mondialisation, de la poursuite de l'intensification agricole, de la concentration de la population le long de l'axe Seine au détriment du bassin amont.

Un futur bio-autonome-démocratique, sobre et écologiquement vertueux privilégie au contraire les tendances à la relocalisation et à la circularisation des flux dans un contexte de sobriété de la consommation.

Une agriculture duale propose la coexistence des deux modèles précédents grâce à un partage du territoire entre aires de développement économique spécialisées et espaces de protection. Ces derniers, constitués des aires d'alimentation de captages d'eau potable et des Parcs Naturels Régionaux, concernent plus d'un tiers du territoire du bassin de la Seine, ce qui rend non négligeable l'impact des pratiques qui y sont expérimentées.

Enfin le scénario *Et si rien n'avait été fait en matière de réglementation depuis 40 ans ?* permet de mesurer en creux 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.

Au final, le projet RESET, en offrant une vision large du fonctionnement du système hydro-agro-alimentaire de la Normandie et du bassin de la Seine, ouvre la voie à une réflexion d'ensemble sur les **projets de développement** souhaités pour ces territoires en lien avec les conséquences environnementales qu'elles impliquent

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET

- **Equipe 1** : UMR Metis ; Université Pierre et Marie Curie, Paris
Coordination scientifique : Josette Garnier
Autres chercheurs (ou équivalents) : Gilles Billen, Estela Romero, Antsiva Ramarson, Marie Silvestre, Vincent Thieu
- **Equipe 2** : UMR Géographie-Cité, Université Paris 1-Panthéon-Sorbone
Coordination scientifique : Sabine Barles
Autres chercheurs (ou équivalents) : Sabine Bognon
- **Equipe 3** : Laboratoire Environnement Ressource de Normandie, Ifremer
Coordination scientifique : Philippe Riou
Autres chercheurs (ou équivalents) : Romain Le Gendre, Jérôme Castaings

PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET

Personnes ayant contribué au suivi du projet ou ponctuellement à un atelier de travail.

Acteurs de l'estuaire : Guillaume Fresnel (Métropole Rouen - Normandie), Barbara Leroy (AESN), Delphine Jacono (AESN), Nolwen Briand (DREAL Normandie), Catherine Dehondt (UIC Normandie)

Scientifiques : Gilles Armani (Consultant), Florentina Moatar (Université de Tours), Stefan Van Dam (Université d'Anvers), Julia Le Noë (UPMC), Sarah Lumbroso (ASCA), Xavier Poux (ASCA), Jean-Marie Mouchel (UMR Metis), Pierre Le Hir (Ifremer), Florent Grasso (Ifremer), Arnaud Huguet (UMR Metis), Francis Orvain (Université de Caen), Pascal Claquin (Université de Caen), Nathalie Niquil (Université de Caen), Jérémy Lobry (IRSTEA), Patrick Meire (Université d'Anvers), Michel Tackx (Université de Toulouse).



Introduction

L'estuaire de Seine est l'axe privilégié par lequel s'effectuent, par l'eau, la route ou le rail, les échanges de marchandises entre la région Normande et les autres territoires avec lesquels elle entretient des liens économiques. C'est par l'estuaire de Seine que transitent une grande part des flux importés, destinés à l'approvisionnement de tout le Nord de la France, et plus particulièrement de l'agglomération parisienne, ainsi que les flux d'exportation issus de la production agricole et industrielle du bassin parisien. C'est par l'estuaire aussi que sont évacués vers la Manche, les déchets du métabolisme territorial de tout le bassin de la Seine, conditionnant ainsi le fonctionnement de l'écosystème marin côtier. L'estuaire de la Seine joue donc un rôle central dans les flux de matière qui soutiennent le fonctionnement du territoire Normand.

La Région Normande constitue un territoire en pleine mutation, à la croisée de plusieurs grands enjeux économiques, sociaux et environnementaux :

- Le port du Havre, et celui de Rouen, confèrent à la région un rôle majeur dans l'approvisionnement de toute la moitié Nord de la France, mais l'avenir des ports séquanais face à la concurrence d'Anvers et de Rotterdam est un enjeu économique considérable.
- Comme région industrielle, la Normandie doit faire face aujourd'hui à des mutations rapides des conditions de production et de commercialisation de ses produits.
- Comme région agricole, la Normandie occupe une place significative dans la production française, avec un important mouvement de spécialisation spatiale de ses productions. La pêche y reste une activité significative.
- Enfin, région au riche patrimoine naturel, historique et touristique, la Normandie est aujourd'hui confrontée à une artificialisation grandissante de ses espaces et à une altération notable de ses ressources naturelles. L'état des milieux aquatiques (eaux souterraines, eaux de surface, eaux marines) est ainsi préoccupant.

La proximité de Paris et de l'Ile-de-France, et l'énorme demande de consommation qu'elles représentent, ont toujours pesé très lourd dans les choix d'aménagement qui ont été faits en Normandie, et seront encore longtemps au centre des enjeux de développement de la région si l'on se réfère aux études prospectives réalisées récemment ([Attali, 2010](#); [Poux et al., 2015](#); [etc.](#)). Toutefois, l'aspiration à un développement normand plus cohérent et plus autocentré se fait jour à travers bon nombre de revendications citoyennes et d'initiatives émergentes, comme les circuits courts et les AMAP par ex. ([Lamine, 2008](#)).

De même, l'estuaire de Seine et la vallée qui l'entoure ne peuvent plus être pensés simplement comme une voie de transit pour les marchandises à importer ou exporter, ou un lieu de transformation et transfert des éléments nutritifs issus du bassin versant amont (global : [Regnier et al., 2013](#); Seine : [Garnier et al., 2010](#)). Une vision large des fonctions assurées par l'estuaire, et de leurs articulations avec les projets de développement souhaités pour la Normandie est donc devenue indispensable.

Du point de vue de sa structuration spatiale et du rôle joué par l'estuaire de Seine, la Normandie n'est évidemment pas un territoire homogène. Il convient donc de spatialiser la description de son métabolisme, en termes de répartition des zones de spécialisation agricole (grandes cultures ou élevage) ou industrielle, et de zones d'hinterland des grandes villes portuaires (Rouen, Le Havre, Caen).

L'objectif du projet RESET est d'aborder la problématique des flux de nutriments (C, N, P, Si) qui transitent par l'estuaire avant de rejoindre la zone côtière, en la replaçant dans le cadre du métabolisme agro-alimentaire de la région normande et de ses interactions avec les territoires environnants, au premier rang desquels se situent l'agglomération parisienne, l'Ile-de-France et le bassin versant amont de la Seine. Plus largement, les fonctions liées au système hydro-agro-alimentaire (gestion des eaux usées, qualité des eaux souterraines et de surface, agriculture, élevage, industrie agroalimentaire) ont retenu particulièrement notre attention. La démarche est donc d'abord de décrire en parallèle l'évolution durant les 3 à 5 dernières décennies du développement urbain, industriel et agricole des territoires impliqués et celle du fonctionnement biogéochimique des systèmes hydrologiques (fluvial, estuarien et marin côtier) en termes de bilan des éléments biogènes. Cette démarche nécessite de retracer les trajectoires socio-écologiques des territoires pour relier les choix économiques et techniques qui ont été faits avec l'évolution des écosystèmes (Fischer-Kowalski & Rotmans, 2009). Il s'agit aussi d'allier des analyses relevant de la biogéochimie, centrées sur la description de leur métabolisme, ici les flux d'azote qui assurent le fonctionnement des territoires, avec l'analyse des mécanismes sociaux, politiques, économiques et techniques qui les contrôlent. C'est donc une approche de l'écologie territoriale résolument interdisciplinaire que nous proposons, mobilisant des compétences scientifiques les plus variées (Barles, 2010). L'azote est un élément clé du système hydro-agro-alimentaire, par son rôle d'élément limitant de la production agricole, mais aussi par sa mobilité dans les phases atmosphérique et hydrologique, qui en fait un polluant majeur de l'air, et des eaux souterraines, de surface et côtière. L'azote est en outre le composant majeur des protéines, indispensables à la structure et aux fonctions des cellules du corps humain (Les besoins journaliers sont de 10-15 g d'azote par jour et par personne), ce qui en fait un marqueur idéal des flux alimentaires (Sutton et al, 2011).

Au-delà de cette analyse d'écologie territoriale de la Normandie dans une trajectoire de plusieurs décennies, des visions prospectives ont été co-construites entre scientifiques et acteurs, s'inspirant des scénarios existants pour les horizons 2025 ou 2040. Nous avons alors traduit ces visions en termes de contraintes pour la modélisation du bassin versant, du réseau hydrographique et de l'estuaire, afin d'en quantifier les effets sur le fonctionnement écologique des hydrosystèmes.

1 Décrire et modéliser le système agroalimentaire : méthodes et outils

1.1 Recherche de documentation et entretiens

Par système alimentaire nous entendons la mise en réseau des biens, des moyens et des acteurs qui assurent sa subsistance à une population (Malassis, 1973). Cette grille de lecture permet de distinguer des sphères autour desquelles s'articulent les activités économiques du système agro-alimentaire : la production, la distribution, la consommation, mais aussi la transformation (industries agro-alimentaires), le transport et la logistique (ports et fret). Cette sectorisation du terrain permet de caractériser les déterminants politiques, écologiques,

économiques et sociaux qui fondent la géographie du système agro-alimentaire normand (Annexe 1).

L'enquête a été menée entre novembre 2014 et juin 2015. Un premier travail bibliographique a consisté en un dépouillement systématique de tous les numéros des revues scientifiques spécialisées dans l'analyse du territoire normand et d'autres sources académiques traitant du système alimentaire régional. Par ailleurs, les archives départementales du Calvados à Caen et les archives municipales du Havre ont été exploitées avec le même objectif. Des entretiens ont été menés sur le terrain avec des acteurs clés du système alimentaire, notamment avec la collaboration d'étudiant-e-s en second cycle de l'Université Pierre et Marie Curie, selon deux grilles. La première a été conçue pour déterminer de manière compréhensive et par évaluation des éléments de discours la perception de l'état du système alimentaire par nos interlocuteurs. En fonction de leur description, nous engageons le dialogue pour co-construire une analyse dynamique de l'état actuel du système alimentaire, incluant donc leur analyse des facteurs qui y ont conduit et des potentiels changements en cours qu'ils soient perçus de manière tangibles ou souhaités. La seconde grille a été conçue par les étudiants de l'UPMC : analogue à la première sur le fond elle est davantage guidée par une série d'interrogations et de thématiques à aborder. Enfin, pour aborder la prospective, différentes sources ont été mobilisées : les dires des acteurs rencontrés sur l'avenir du système alimentaire normand ont été complétés par l'étude de documents émis par les institutions du territoire (chambres consulaires, agences d'urbanisme, etc.) et un travail pédagogique prospectif a été mené avec les étudiants du Master 2 Transport et mobilités de l'École d'urbanisme de Paris (UPEM) pour esquisser des réflexions quant à l'avenir logistique du système alimentaire normand.

La recherche a été menée sur les bases historiques de la partition régionale, et sur les bases politiques et économiques des liens privilégiés entre la Haute-Normandie et l'amont de la Seine, en particulier avec la région capitale. Dans l'intérêt du programme RESET nous avons ensuite inclus, plus ponctuellement, des données qui concernent la région Basse-Normandie sans lesquelles la trajectoire du système alimentaire normand serait incomplète.

1.2 Exploitation de la base de données SiTraM

Le logiciel Amstram ([Silvestre et al., 2015](#)), recodé dans un nouveau langage (Python) dans le cadre du projet RESET permet de réaliser des bilans d'approvisionnement sur un territoire et d'en déduire sa « consommation ». Il calcule les flux d'importation, d'exportation et la production locale puis estime les provenances et les destinations des marchandises. Grâce à l'identification des territoires sources de l'approvisionnement et de destination, les distances parcourues par les marchandises sont calculées (Annexe 5).

Les calculs font appel à des bases de données de transport et de production de marchandises. Ces bases sont d'origines diverses et renseignées à des échelles variables (échelon géographique et niveau d'agrégation des classes de marchandises). Les flux de marchandises entre départements français et pays étranger sont fournis par la base de données **SiTraM** (Système d'information sur le transport des marchandises), gérée par le Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et la Mer. Les flux de marchandises entre pays étrangers proviennent des matrices du commerce détaillées fournies par la **FAO** (Food and Agriculture Organization). Les productions agricoles brutes des départements français sont issues des **Statistiques**

Agricoles Annuelles produites par le Ministère de l'Agriculture français. Les productions agricoles annuelles des pays étrangers proviennent de la FAO. Les données géographiques utilisées pour les calculs de distance et la présentation des résultats sous forme de cartes sont issues de la base **GEOFLA** produite par l'IGN pour la France et **des limites de pays du monde** produites par Natural Earth.

Chacune de ces bases de données utilisant ses propres nomenclatures (de marchandises et géographiques), une étape clé du travail a consisté à les mettre en concordance. Étant donné l'exhaustivité géographique et thématique de la base SitraM, le choix a été fait de faire correspondre toutes les autres nomenclatures à celles utilisées par cette base. Concernant les marchandises, la NST (Nomenclature Uniforme des marchandises pour les Statistiques de Transport) a subi une évolution majeure en passant de la NST 1974 à la NST 2007. Cette dernière NST permet de dissocier la plupart des produits bruts des produits transformés mais les correspondances entre les deux nomenclatures sont complexes. Les bases de données de transport utilisées dans Amstram fournissent les flux de marchandises entre un lieu de chargement et un lieu de déchargement, ce qui ne renseigne pas sur les lieux réels de production et de consommation de ces marchandises. La méthode de calcul développée dans Amstram permet d'estimer les étapes de transport manquantes et de reconstituer la chaîne depuis le lieu de production vers celui de consommation.

Les bases de données dont nous disposons recensent donc les flux annuels de marchandises (notés I) entre un lieu de chargement (o) et de déchargement (d). Les données de production de marchandises seront considérées comme des flux de production interne. Pour chaque marchandise considérée et pour chaque année nous obtenons ainsi une matrice noté I*(d,o) représentant l'ensemble des flux de transport et de production interne.

Pour déterminer l'origine des produits, il est fait l'hypothèse du « mélange parfait » : la répartition en origine géographique des produits consommés et exportés est supposée identique à celle des importations et des productions.

La contribution relative au premier ordre d'un territoire, i, à l'approvisionnement du territoire étudié, a, est notée $r_1(a,i)$.

Elle est calculée de la manière suivante :

$$r_1(a, i) = \frac{I(a, i)}{\sum_j I(a, j)} \quad (1)$$

$$\text{avec } \sum_i r_1(a, i) = 1 \quad (2)$$

$r_1(a,a)$ correspond donc à la contribution de la production locale dans l'approvisionnement de a.

Les origines calculées au premier ordre ne reflétant pas la provenance réelle des marchandises, il faut tenir compte des origines antérieures. Pour l'estimer, nous nous intéressons à chacun des territoires contribuant à l'approvisionnement au premier ordre et calculons la provenance des marchandises sur ces territoires.

Nous appliquons donc un deuxième calcul au premier ordre sur ces territoires :

$$r_2(a, i) = \frac{\sum_{k \neq a} (I(a, k) \times r_1(k, i))}{\sum_j I(a, j)} \quad (3)$$

$$\text{avec } \sum_i r_2(a, i) + r_1(a, a) = 1 \quad (4)$$

A l'issue de ces calculs à l'ordre 2, un ensemble de territoires est identifié ainsi que leurs contributions respectives. Le tonnage total importé par le territoire étudié n'a pas été modifié par l'ordre 2 mais les provenances sont maintenant réparties sur un plus grand nombre de territoires.

La méthode de calcul utilisée pour les exportations est similaire à celle utilisées pour les importations.

1.3 Chaîne de modélisation GRAFS-Seneque/Riverstrahler

L'approche GRAFS (Billen et al., 2013; Lassaletta et al., 2014; Garnier et al., 2016; Le Noë et al., 2017) est basée sur un bilan détaillé des flux impliqués dans la production, la transformation et la consommation de produits animaux et végétaux dans un territoire, ainsi que des fuites de nutriments associées vers l'environnement (Figure 1). 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, (i) le lien entre élevage, surfaces prairiales et cultures fourragères, (ii) le lien entre régime alimentaire de la population, structure productive du territoire et échanges commerciaux, (iii) le lien entre fertilisation des terres arables et des prairies et les pertes environnementales de nutriments (Annexe 9).

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 de nutriments à travers l'hydrosystème et l'évaluation de la qualité des ressources hydriques (Figure 1). Le surplus moyen sur une rotation agricole ou sur l'assolement territorial (en kgN/ha/an), calculé par le bilan GRAFS représente un potentiel de lixiviation des nitrates à partir des terres arables. Si une part importante (de l'ordre de 70%) de ce surplus est lessivée lorsque les terres sont laissées nues pendant la saison de drainage hivernale, un couvert végétal implanté en automne réduit fortement cette fraction. Cet effet d'abattement de la lixiviation a été établi par Anglade (2015) pour chaque type d'interculture dans la rotation, sur base des données empiriques documentées par Justes et al. (2014). Le bilan GRAFS fournit ainsi la concentration de l'eau infiltrée à partir de chaque classe d'usage du sol du bassin versant. Ces concentrations sont transmises en entrées du modèle Riverstrahler (Billen et al., 1994; Garnier et al., 1995; Billen & Garnier, 2000; Garnier et al., 2002) sous son environnement Seneque (Ruelland et al., 2007; Thieu et al., 2009) qui décrit quant à lui le fonctionnement biogéochimique du réseau hydrographique, et les transferts et transformations d'éléments nutritifs (Figure 1). Dans une nouvelle version de Seneque-Riverstrahler (version 3.7), nous avons en outre introduit une formulation mécaniste du processus de rétention riparienne par lequel une fraction substantielle du nitrate lixivié dans les bassins versant est éliminée par dénitrification dans les zones humides riveraines des cours d'eau, avant de rejoindre les eaux de surface (Hill & Shabaga, 2010). Le couplage entre GRAFS et Riverstrahler permet donc de disposer d'un 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. Les flux calculés à l'exutoire sont alors pris en charge par le modèle estuarien.

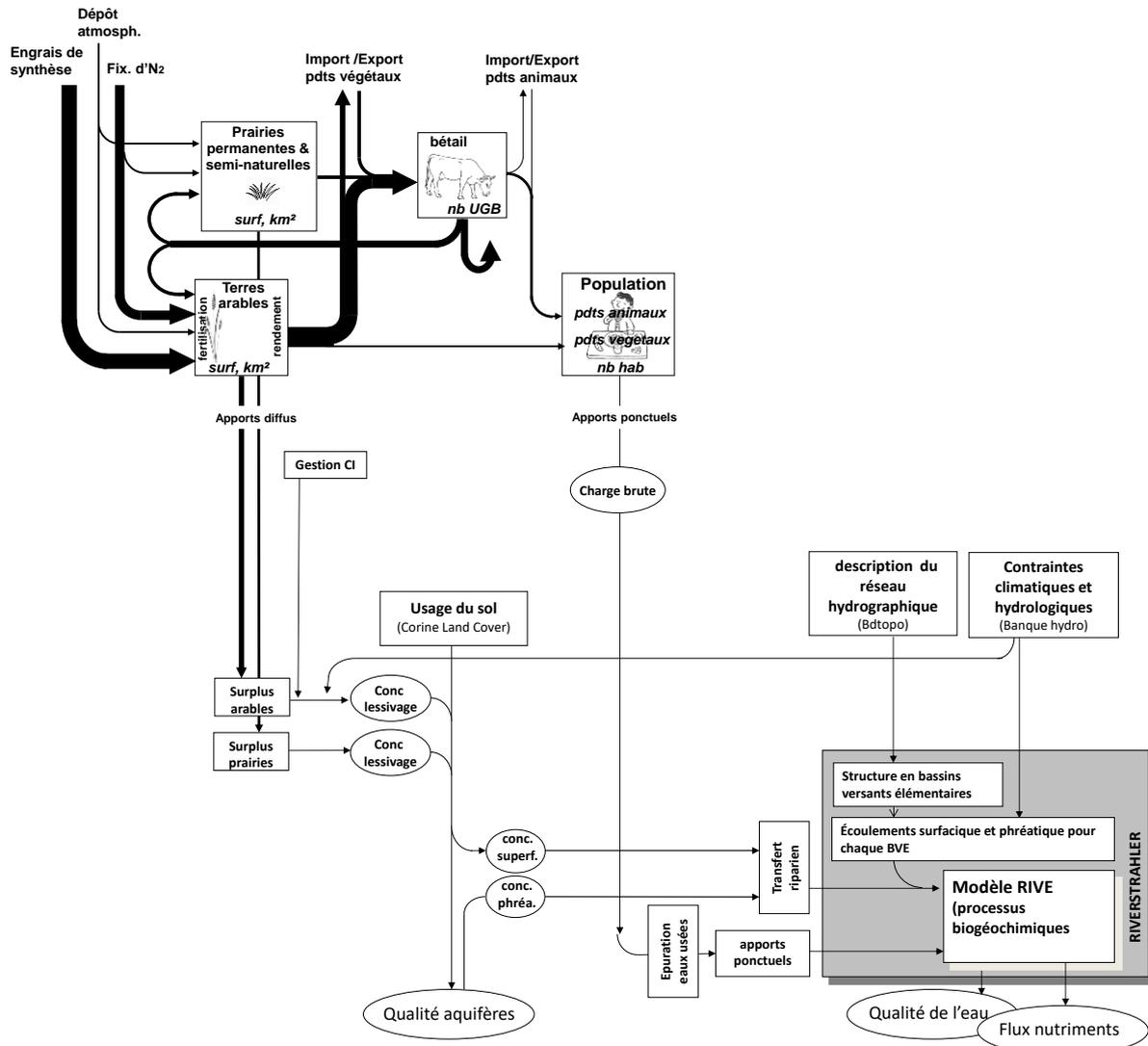


Figure 1 : Architecture générale de la suite GRAFS-SENEQUE/RIVERSTRAHLER.

1.4 Modélisation estuarienne et marine ECOMars3D

Le modèle hydrodynamique côtier MARS-3D (*Model for Application at Regional Scale*) développé par l'Ifremer et appliqué avec succès sur des écosystèmes côtiers variés dont l'estuaire et la Baie de Seine depuis plusieurs années (Cugier & Le Hir, 2002 ; Cugier et al., 2005a,b; Cugier et al., 2010) a été nouvellement enrichi pour mieux représenter les processus estuariens. Le modèle est constitué d'une base hydrodynamique en 3D adaptée aux phénomènes côtiers décrite par Lazure & Dumas (2008). Ce modèle hydrodynamique de base peut être couplé avec plusieurs modules complémentaires afin d'étudier des problématiques spécifiques (sédiments, biologie, transport lagrangien, contaminants chimiques). Dans le cadre du projet RESET, la modélisation utilise le module sédimentaire dont les principes sont décrits par Le Hir et al. (2011) et le module biogéochimique (ECO-MARS) décrit par Cugier et al. (2005a) et Passy et al. (2016) qui est un modèle écologique de type NPZD (Nutriments, Phytoplancton, Zooplancton, Détritique), (Annexe 11).

La configuration ECO-MARS 3D mise en place utilise une configuration marine préexistante sur la baie de Seine (Garnier et al., 2012 ; Passy et al., 2016) avec une grille cartésienne de

500m de résolution spatiale et 10 niveaux verticaux basée sur des données bathymétriques du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Cette configuration a fait l'objet d'une série d'ajustements et d'améliorations pour la représentation de l'estuaire : (1) prolongement de l'emprise spatiale sur l'estuaire entre Tancarville et Poses avec mise à jour des données bathymétriques et ajustement des mailles sur une section d'écoulement réaliste (données du Port de Rouen) ; (2) calage de l'hydrodynamique estuarienne (temps de transit) et de la dynamique sédimentaire du bouchon vaseux ; (3) ajout des processus biogéochimiques liés à l'oxygène ; (4) ajout de groupes de phytoplancton et zooplancton d'eau douce en plus des groupes marins existants ; (5) ajustement des processus biologiques et géochimiques avec des paramètres liés à un seuil de salinité.

La Figure 2 représente l'emprise spatiale du modèle et la Figure 3 schématise les processus simulés qui sont détaillées en annexe (cf. annexe article + rapport Ifremer). Le modèle sédimentaire utilisé comporte deux classes de particules, une légère injectée via les cours d'eau qui simule les apports de matières en suspension et le panache turbide, et une seconde classe lourde initialisée dans le sédiment estuarien pour représenter le bouchon vaseux. Il se produit des processus d'adsorption/désorption des phosphates pour les deux classes. La paramétrisation est celle de Cugier et al. (2005a). Les variables prises en compte par le modèle biogéochimique(Figure 3) comportent les formes dissoutes et particulaires des nutriments (N, P, Si), ainsi que les concentrations en matières en suspension, oxygène dissous et des différentes classes de planctons (exprimées par leur contenu en azote). La dynamique de l'azote prend en compte les nitrates (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+) dissous ainsi que l'azote détritique particulaire. La dynamique du phosphore comprend le phosphore dissous (PO_4^{3-}), le phosphore adsorbé sur les matières en suspension (incluant les deux classes de particules sédimentaires) et le phosphore détritique particulaire.

Au niveau des forçages, le modèle ECOMARS 3D utilise des conditions météorologiques issues du modèle ARPEGE de Météo-France avec une résolution spatiale de $0,5^\circ$ et une résolution temporelle de 6h. Les variables de forçages sont l'intensité et la direction des vents, la pression atmosphérique, la température et l'humidité de l'air, la couverture nuageuse et le rayonnement solaire. Les conditions limites marines sont forcées par des composantes harmoniques de marée fournies par le SHOM et par les variables biogéochimiques issues de la configuration MANGA du modèle ECOMARS 3D (Figure 2) à une résolution spatiale de 16 km et un pas temporel de 4 jours. Les apports des bassins versants sont forcés avec les débits journaliers (Banque HYDRO, www.hydro.eaufrance.fr) et la température de l'eau pour la Seine, l'Eure, la Risle, l'Aubette, le Cailly, l'Austreberthe, ainsi que les principaux fleuves côtiers normands (Touques, Dives, Orne, Seulles, Aure, Vire, Taute, Douve, Saire). Les concentrations des variables biogéochimiques apportées par les cours d'eau proviennent de mesures (Service de Navigation de la Seine et Agence de l'Eau Seine-Normandie) pour la phase de calage et des résultats de simulations du modèle Seneque-Riverstrahler pour la validation et la simulation des scénarios. Ces variables de forçage comportent les formes dissoutes et particulaires des nutriments (N, P, Si), ainsi que les concentrations en matières en suspension, oxygène dissous et groupes de plancton d'eau douce (diatomées, chlorophycées, microzooplancton). Elles sont imposées avec une résolution temporelle décadaire. Ces variables de qualité biogéochimiques concernent toutes les rivières mentionnées ci-dessus ainsi que les apports ponctuels pour les deux grandes agglomérations urbaines et industrielles, cumulés au km 45 pour celle de Rouen et au km 133 pour celle du Havre. Le cumul des débits associés aux apports ponctuels sont également pris en compte.

Le calage et la validation du modèle ont été réalisés à l'aide d'un large jeu de données mesurées fournies par le Réseau Hydrographique du Littoral Normand (RHLN), le Réseau de suivi du phytoplancton et des phycotoxines (REPHY), l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), et le Service de Navigation de la Seine (SNS). Selon les paramètres et les stations la fréquence des mesures est généralement mensuelle ou bimensuelle. Une attention particulière a été portée au calage de la dynamique du bouchon vaseux dans l'estuaire lors de différentes phases de marées selon les caractéristiques physiques décrites par [Brenon & Le Hir \(1999\)](#), et [Dupont \(2001\)](#). Compte tenu de la validation préalable de la partie marine lors des études antérieures ([Passy et al., 2016](#)) et en regard des objectifs de RESET, la paramétrisation du modèle biogéochimique s'est concentré essentiellement sur les stations internes à l'estuaire. La chaîne de modélisation validée, constituée par Senèque-Riverstrahler et cette nouvelle configuration ECOMARS-3D, permet pour la première fois une représentation complète du continuum « bassin versant – fleuve – estuaire – mer ».

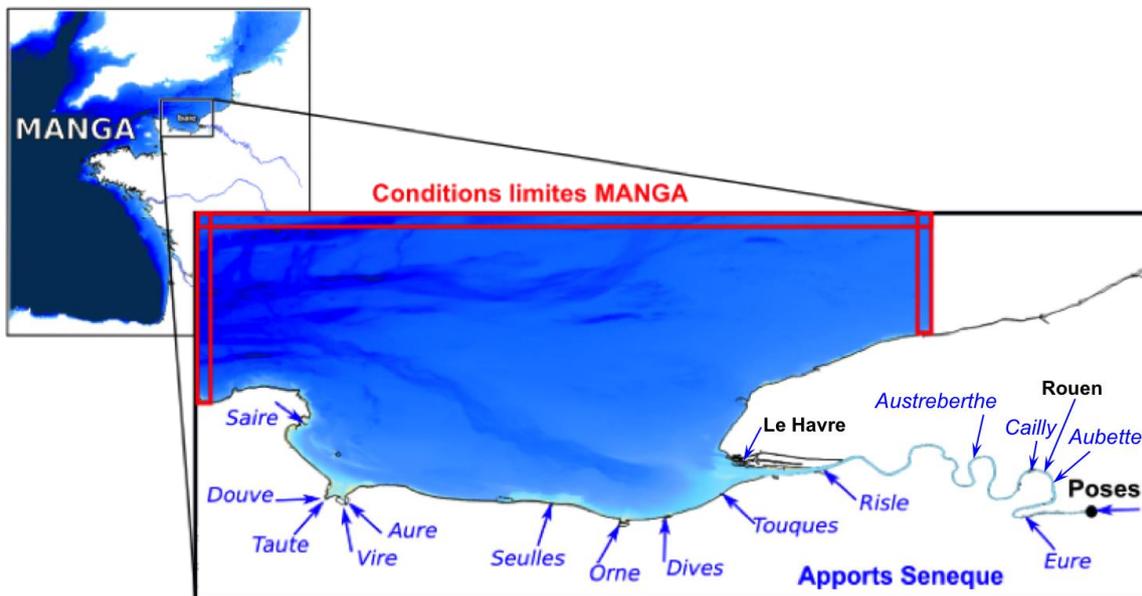


Figure 2 : Emprise de la grille du modèle ECO-MARS 3D et localisation des conditions de forçage aux limites.

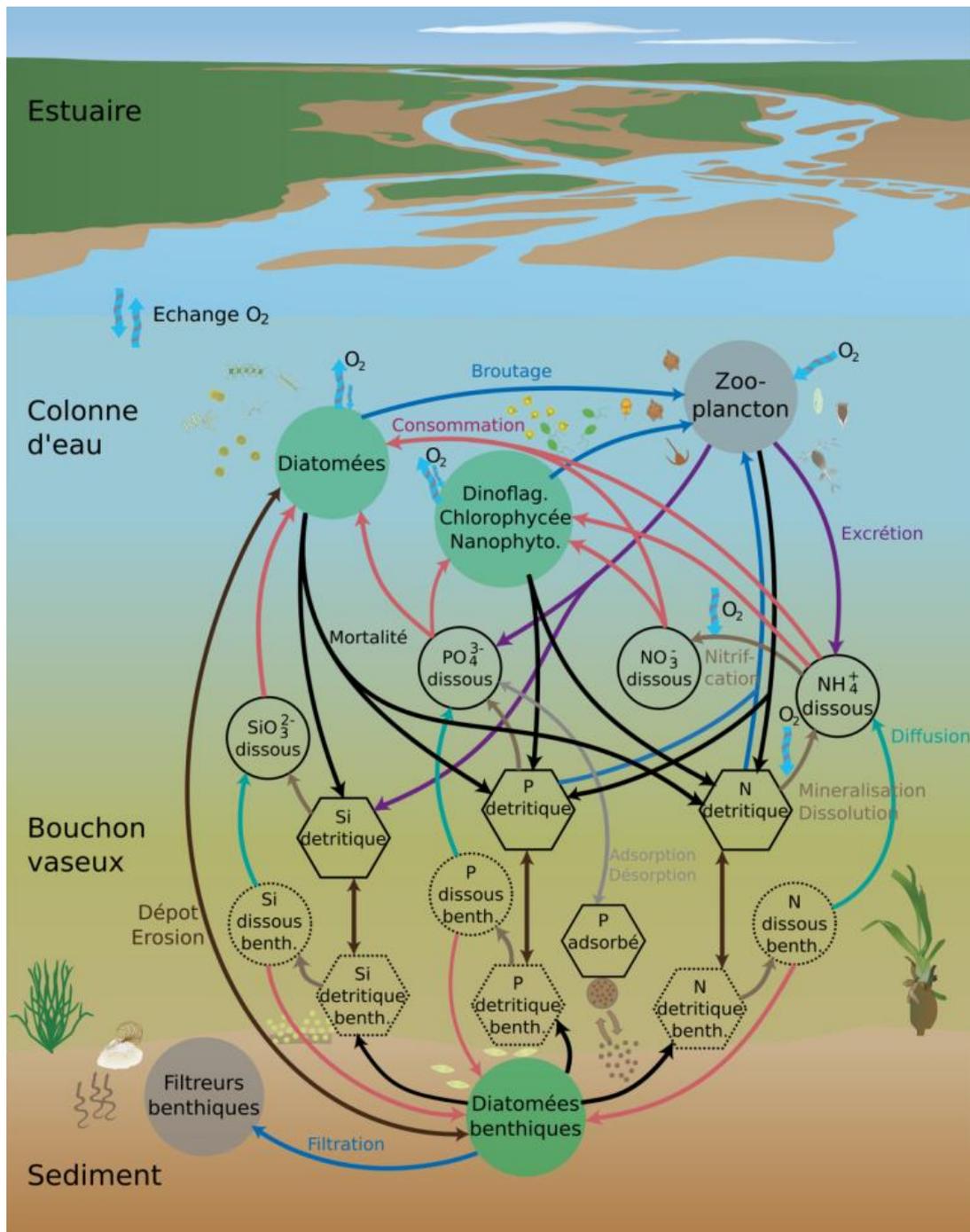


Figure 3 : Diagramme synthétique des processus biogéochimiques modélisés dans la zone estuarienne par le modèle ECOMARS 3D (Romero et al., in prep.).

2 La trajectoire socio-écologique du système agro-alimentaire normand, début XXe – début XXIe siècles

Le système agro-alimentaire normand (Figure 4) nous donne une image, dans un secteur emblématique, des relations spécifiques qu'entretiennent les sociétés et la biosphère, c'est-à-dire de ce que l'on qualifie de régime socio-écologique du territoire. La traduction matérielle du régime socio-écologique est le métabolisme territorial, entendu comme l'ensemble des flux d'énergie et de matières mis en jeu par le fonctionnement du territoire. Ce régime varie dans le temps et dans l'espace. Pour un territoire donné, on dira qu'il suit une trajectoire, qui peut conduire à une transition et finalement à un changement de régime (Fischer-Kowalski & Rotmans, 2009 ; Barles, 2015), (Annexe 2).

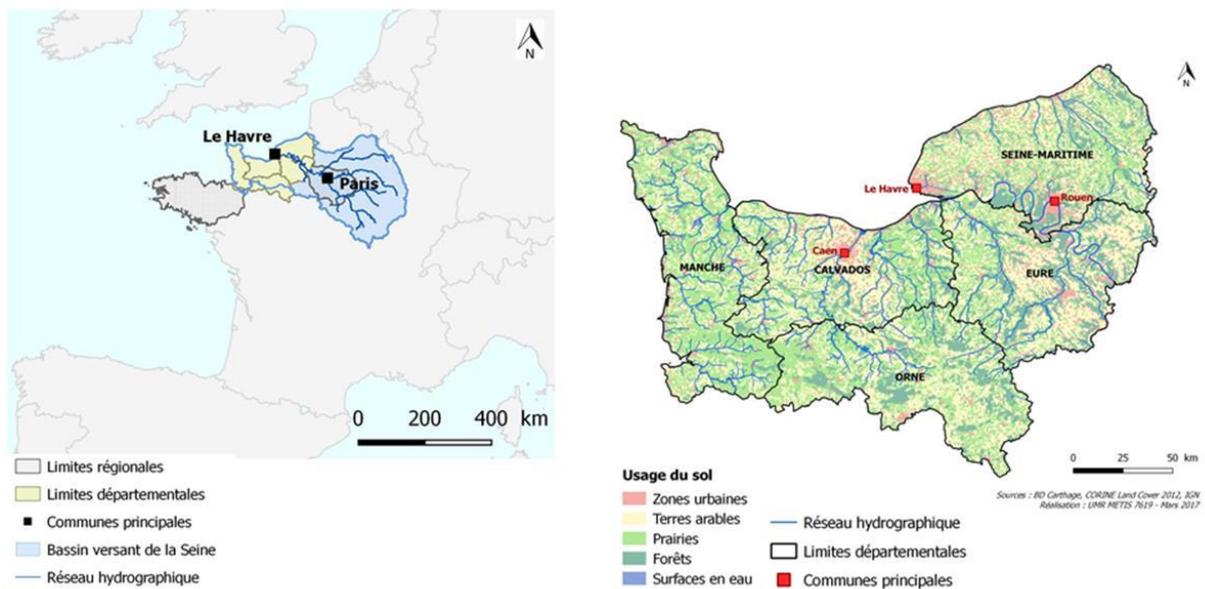


Figure 4 : Le Territoire Normand dans son contexte régional

L'analyse de la trajectoire normande montre ainsi, du point de vue du système agro-alimentaire, la succession de deux régimes tout au long du XXe siècle. Du début du XXe siècle à la fin des années 1950 (§ 2.1), se met en place un régime hybride, entre circularité (polyculture-élevage, autonomie alimentaire) et linéarité (exportation vers Paris, transit par les ports, abandon du recyclage des excreta urbains). À partir des années 1960, ce régime bascule vers toujours plus de linéarité dans un contexte d'industrialisation et de mondialisation : il atteint son apogée dans les années 1980 (§ 2.2.1). Plusieurs éléments, conduisent alors à des adaptations à la marge, qui pérennisent plus qu'elles ne remettent en question le régime dominant (§ 2.2.2). Enfin, au cours des dernières années, des signaux faibles sont détectables et pourraient annoncer une transition, qui est pourtant loin d'être pleinement engagée, et donc loin d'être achevée, ni d'ailleurs certaine (§ 2.3).

2.1 Un système intégré au service du local et de Paris (début XXe - fin des années 1950)

La Normandie du premier XIXe siècle se vide de sa population : c'est dans l'entre-deux-guerres qu'elle atteint son plancher le plus bas (2 270 000 habitants en 1921, contre 2 710 000 en 1851) ; tous les départements se dépeuplent à l'exception de la Seine-Maritime qui s'industrialise. L'exode rural nourrit en partie la croissance de l'agglomération parisienne. Au sein du territoire normand, les villes attirent des ruraux qui se tournent vers l'industrie, Le Havre bien sûr, mais aussi Évreux et Caen où l'on note, dans les années 1930, l'effet du « développement des usines et l'installation dans la banlieue de Caen des Hauts Fourneaux de la Société Normande de Métallurgie et des Chantiers Navals » ([Ministère de l'Agriculture, 1938, p. 225](#)), ainsi que dans une moindre mesure Rouen (Annexe 2).

L'agriculture normande est alors une excellente illustration du système issu de ce que [Mazoyer & Roudart \(1997\)](#) qualifient de première révolution agricole des temps modernes. La complémentarité agriculture-élevage caractérise l'essentiel des exploitations : 80 % dans les années 1950 ([Frémont, 1957](#)). L'utilisation d'engrais industriels reste très limitée : elle représente moins de 10 kgN/ha/an en 1955 (Figure 7), (Annexe 4). La propriété agricole est morcelée, malgré le vote des premières lois relatives au remembrement : en 1950, seules 82 communes de la région ont été remembrées (et aucune dans les départements de la Manche et de la Seine-Maritime) mais déjà 310 en 1955 ([Rieucan, 1965](#)). La taille moyenne des exploitations atteint 13 ha en 1929 alors qu'elles sont au nombre de 205 000 (Recensement 1929), on en compte encore 145 000 en 1960 (Figure 7). Dans le Calvados et la Manche, les prairies permanentes et l'élevage dominant ([Ministère de l'Agriculture, 1936](#)). Cette agriculture dépend de la traction animale, mais le développement, en milieu rural, de la « profession toute moderne des électriciens-mécaniciens » ([Ministère de l'Agriculture, 1938, p. 225](#)), atteste d'un début de motorisation. Les rendements augmentent : 25 hl/ha en blé en 1929, contre 17 hl/ha en 1862 ([Ministère de l'Agriculture, 1936](#)).

Sans surprise, les moulins et minoteries dominent l'industrie agricole (650 en 1929). Cependant, c'est dans le domaine des produits laitiers que l'industrialisation est manifeste : fromageries (340 en 1929, concentrées à 72 % dans le Calvados), beurreries (109 en 1929), laiteries (76 en 1929). Le reste de la transformation, quand transformation il y a, est opéré à la ferme, en particulier pour les produits non ou peu périssables, et pour ceux qui font l'objet d'une vente directe. Les animaux sont abattus au plus près de la consommation, dans les abattoirs publics et les tueries particulières encore très nombreuses. En 1929, on compte à peine 7 entrepôts frigorifiques dans la région ([Ministère de l'Agriculture, 1936](#)).

La Normandie se nourrit, en grande partie, elle-même. À l'image du Havre, les pôles urbains ne sont tributaires que des productions locales pour une grande majorité des approvisionnements, même si « un complément est fourni par des expéditions en provenance [...] de Bretagne et des Halles de Paris » ([Laroque, 2001, p. 40](#)). Beurre, œufs et fromages consommés au Havre sont des productions régionales ; les produits carnés proviennent des ports hauts-normands et des éleveurs locaux via la foire de Lillebonne ; les fruits et légumes sont issus des banlieues maraîchères même si des importations extrarégionales affluent déjà pour des produits spécifiques. Les marchés de gros (Caen, Le Havre, Rouen) constituent l'armature commerciale des échanges agricoles et agroalimentaires.



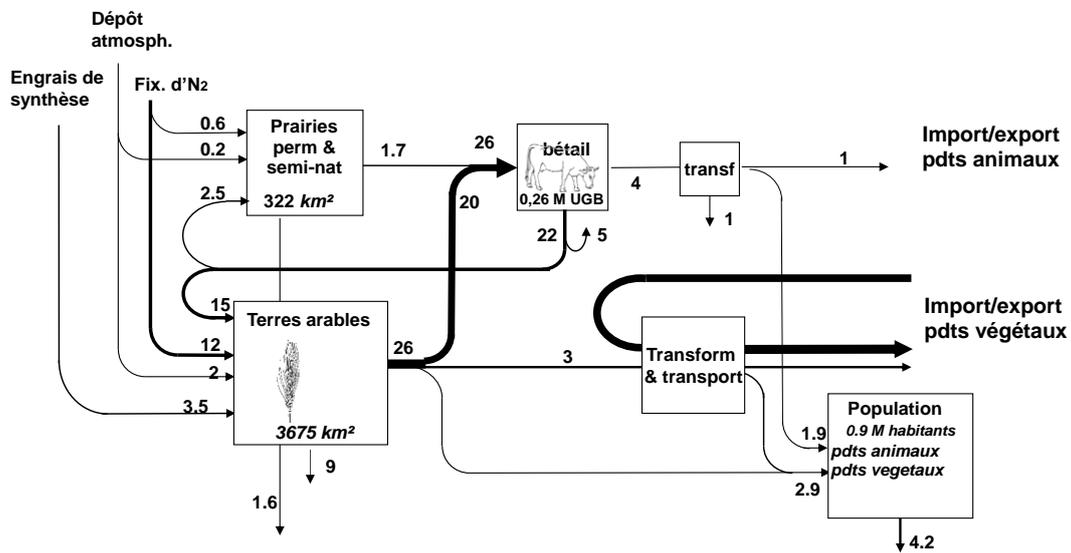
La région est aussi exportatrice, essentiellement vers Paris, de bétail, de viande, de produits laitiers, d'œufs, de céréales, de cidre et de pommes et poires à cidre, etc. Les chemins de fer permettent la circulation, intense, des produits agricoles au sein des et entre les départements normands, de même que vers la capitale et, pour certains produits, vers le reste de la France. Par ses ports maritimes, elle constitue aussi une plaque tournante pour les produits exotiques. Dans les années 1910, plusieurs centaines de négoce de produits tropicaux se situent ainsi au Havre (Thuillier 1986), mettant à profit la proximité de la capitale et l'interface portuaire pour atteindre aisément les marchés d'importation et d'exportation. Cette situation se maintient et, jusque dans les années 1930-40, le port du Havre est le premier importateur de café en France et en Europe : « cette situation est due au fait que la France est, de loin, le premier consommateur de cette denrée sur le continent, et que le marché du Havre, organisé depuis plus d'un demi-siècle, jouit d'une réputation mondiale » (Lachiver 1959, p. 228). Les bananes quant à elles « sont débarquées de navires norvégiens à Dunkerque en 1908, puis à Rouen en 1913 » (Foulquier 2015, p. 269). S'y ajoutent le cacao, ainsi que divers autres produits exotiques qui sont réexpédiés dans la région, vers Paris, dans toute la France, voire en Europe (Annexe 2).

Les bilans des transferts d'azote à travers le système agroalimentaire de 1929 pour un découpage de la Normandie en 4 secteurs (les départements du Calvados et l'Orne étant peu différenciés sont regroupés) illustrent bien l'image générale qui vient d'être décrite et les différences entre départements. La Manche exportatrice de produits animaux et végétaux se distingue clairement de la Seine-Maritime qui présente déjà un secteur de transformations de denrées agricoles, liée à l'activité des ports Figure 5. Le système agro-alimentaire se caractérise par une faible utilisation d'engrais de synthèse au profit de la fixation biologique par les légumineuses, et par une connexion assez étroite entre la culture et l'élevage. Les prairies, sauf en Seine-Maritime, occupent une proportion majeure de la surface agricole (Annexe 6).

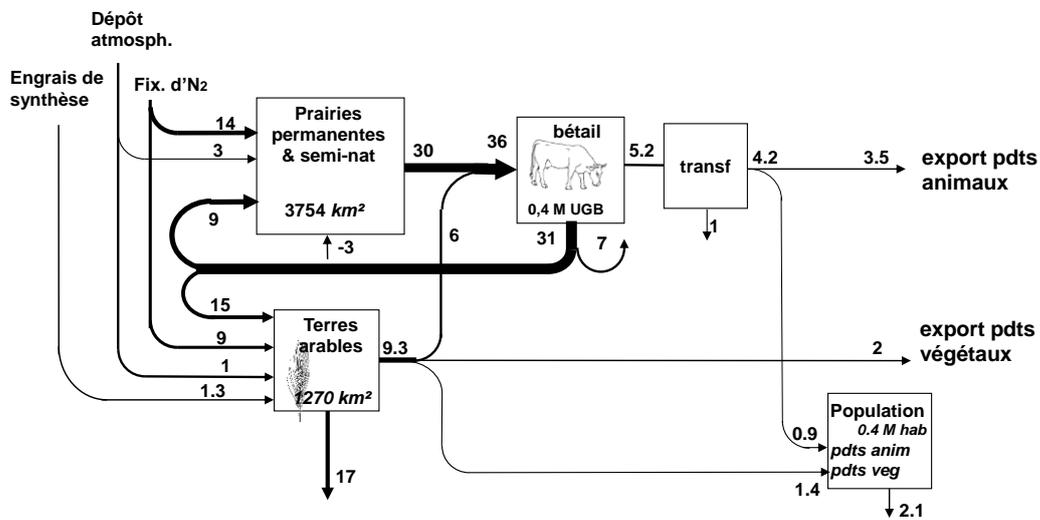
La qualité de l'eau générée par ce système agricole reste parfaitement compatible avec les usages les plus exigeants. En revanche, les déversements d'eaux d'égout – que l'on n'appellera eaux usées qu'à partir des années 1930 – sont nombreux. Paris en traite une partie grâce à ses champs d'épandage, mais la charge polluante reste très importante ; la banlieue procède au rejet direct, de même que les villes riveraines de la Seine et de ses affluents, en particulier Rouen. Elles jettent ainsi à la rivière ce que la Normandie leur a donné sous forme d'aliments. La mise en service de la première tranche de la station d'épuration d'Achères en 1940 ne modifie pas significativement la situation, la population, la consommation d'eau et le raccordement à l'égout augmentant plus vite que la capacité d'épuration (Barles, 2005, p. 209). L'industrialisation du bassin de la Seine contribue à la dégradation de la qualité de l'eau. Cette période est celle du sacrifice des rivières par externalisation de l'insalubrité, urbaine en particulier : l'urgence est en effet à la maîtrise de la mortalité et de la morbidité urbaines, qui ont certes décliné depuis la fin du XVIIIe siècle, mais pour lesquelles beaucoup reste encore à faire : résorption de l'habitat insalubre, accès à l'eau potable, etc. La Normandie doit aussi faire face aux dégâts des guerres : départ souvent sans retour des hommes pour la première comme pour la seconde, destruction massives, principalement pour la seconde. La destruction totale (Le Havre) peut avoir conduit à développer des infrastructures à haut niveau de service (dans le domaine de l'eau et de l'assainissement en particulier), mais dans les cas de destruction partielle, l'urgence est au rattrapage. Si l'on produit du poudeau (engrais) à partir

des ordures ménagères à Rouen (Joulot, 1946, 350), on en incinère l'essentiel, de même qu'au Havre (Bréchet, 1924, 133).

Seine Maritime (6329 km²) 1929, kton N/an

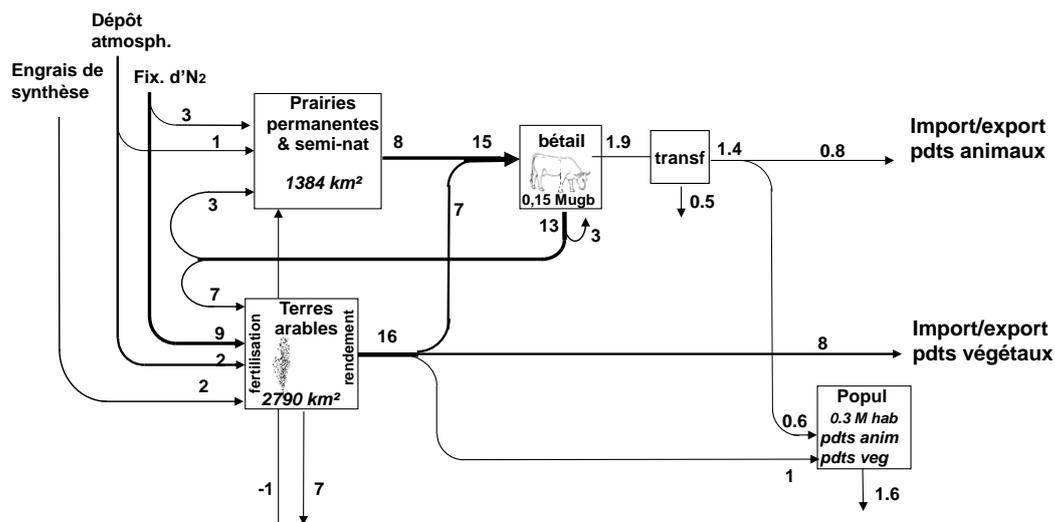


Manche (6051 km²) 1929, kton N/an



Suite figure et titre ci-après

Eure (6028 km²) 1929, kton N/an



Calvados-Orne (11758 km²) 1929, kton N/an

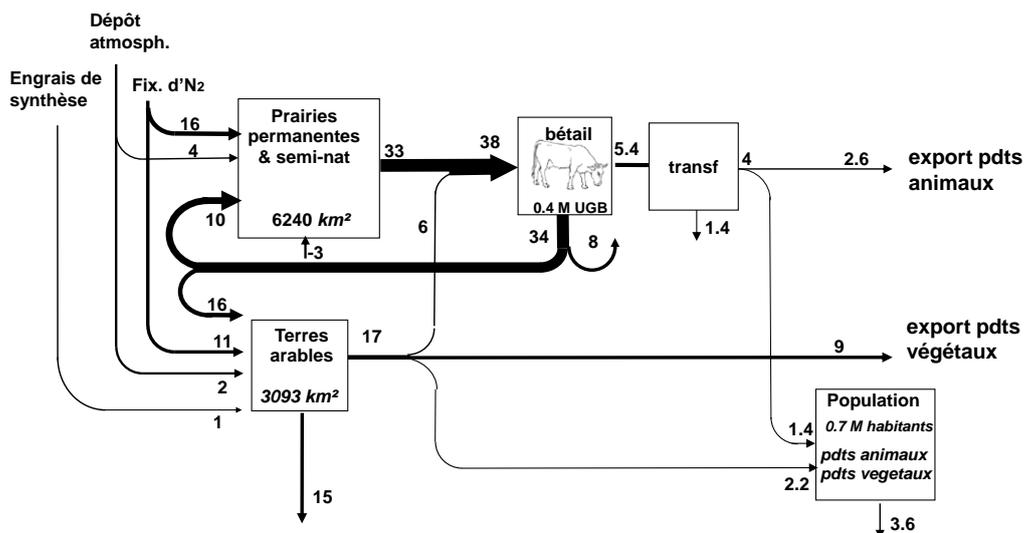


Figure 5 : Métabolisme territorial des départements de Normandie en 1929, figuré par les flux d'azote à travers le système agro-alimentaire.

Le régime socio-écologique normand est ainsi hybride. D'un côté, la complémentarité agriculture-élevage renvoie à la circularité ; de l'autre les villes ont en partie cessé de valoriser leurs sous-produits et présentent un métabolisme en voie de linéarisation : le lien aval entre ville et agriculture est en train d'être rompu. D'un côté, la Normandie se nourrit elle-même ; de l'autre, elle exporte, en grande partie vers la capitale, et constitue une plaque tournante pour les produits exotiques. Agriculture locale et commerce maritime entretiennent très peu de liens.

2.2 Industrialisation, mondialisation, sectorisation : un système ouvert

2.2.1 L'émergence et la pérennisation d'un nouveau régime (début des années 1960 - fin des années 1980)

À partir des années 1960, plusieurs facteurs vont provoquer une transition majeure dans le régime que nous venons de brosser à grands traits, conduisant à l'émergence d'un nouveau régime qui atteindra son point culminant dans les années 1980 (Annexe 2). Après la guerre, la population normande reprend son essor, et dépasse son niveau de 1851 en 1968 (2 758 000 habitants) (Figure 5). Depuis, cette croissance ne se dément pas. La Seine-Maritime, l'Eure, le Calvados, tirent leur épingle du jeu, tandis que les populations de la Manche et de l'Orne croissent très lentement. Cette population est de plus en plus urbaine et de plus en plus étalée. Les unités urbaines (commune ou ensemble de communes présentant une zone de bâti continu (au plus 200 mètres entre deux constructions) qui comptent au moins 2 000 habitants) voient leur population et leur surface augmenter. À titre d'exemple, l'unité urbaine de Rouen compte 15 communes et 246 400 habitants en 1954 (Lamblin & Theys, 2003), 29 communes et 379 900 habitants en 1982 (INSEE, 1983, p. 86). Le déclin de la population rurale se confirme.

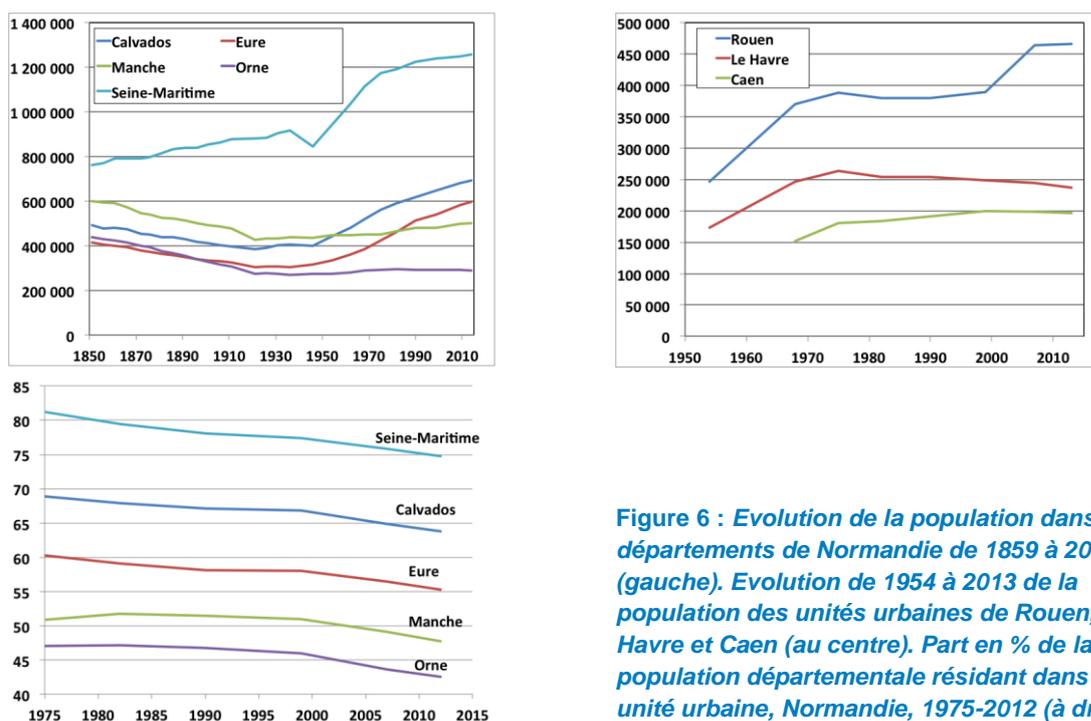


Figure 6 : Evolution de la population dans les cinq départements de Normandie de 1859 à 2014 (gauche). Evolution de 1954 à 2013 de la population des unités urbaines de Rouen, Le Havre et Caen (au centre). Part en % de la population départementale résidant dans une unité urbaine, Normandie, 1975-2012 (à droite)

Sous l'effet de la loi d'orientation agricole de 1960, de la première version, en 1962, de la politique agricole commune (PAC), mais aussi de la transformation du monde agricole, l'agriculture entre dans une phase d'industrialisation massive (correspondant à la deuxième révolution agricole des temps modernes (Mazoyer et Roudart, 1997) : diminution régulière du nombre d'exploitants (145 000 UTA en 1960, 93 000 en 1979) et d'emplois agricoles, agrandissement continu des exploitations (19ha en moyenne en 1960, 28 en 1979 et 49 ha en 2010), mécanisation, spécialisation des productions, croissance des rendements grâce à une augmentation des intrants industriels (Figure 7). Sous l'influence de la PAC, les surfaces toujours en herbe, qui avaient connu un pic en 1967-68, entrent dans un déclin durable, de

même que les vergers (Figure 7) (Annexe 4). Les diminutions sont plus marquées dans l'Orne (47 %). L'instauration des quotas laitiers en 1984 est certainement responsable de la poursuite de cette diminution. Les cultures de subsistance et destinées aux pôles urbains normands (maraîchage et polyculture) s'amenuisent.

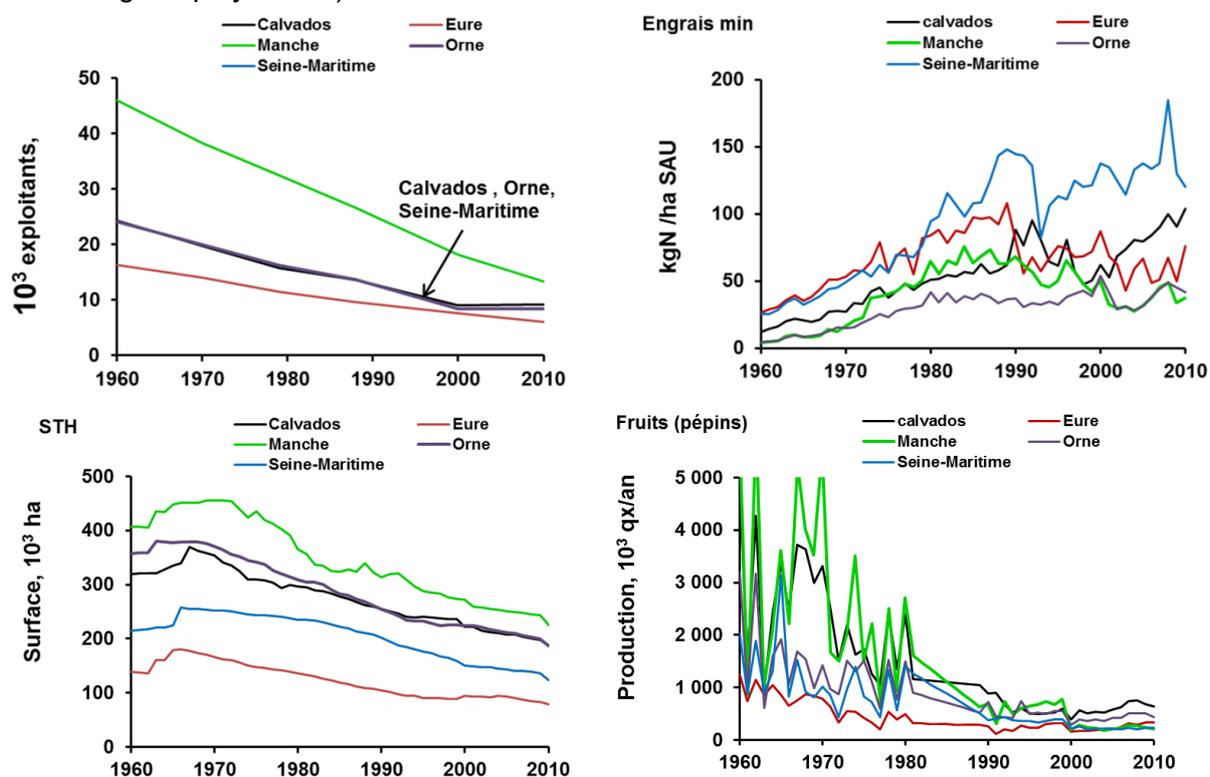


Figure 7 : Evolution du nombre des exploitations et de l'utilisation des engrais minéraux de 1960 à 2007 pour les 5 départements de Normandie (a). Evolution des surfaces toujours en herbe et des fruits à pépins (vergers de pommes et de poires) pendant la même période (b).

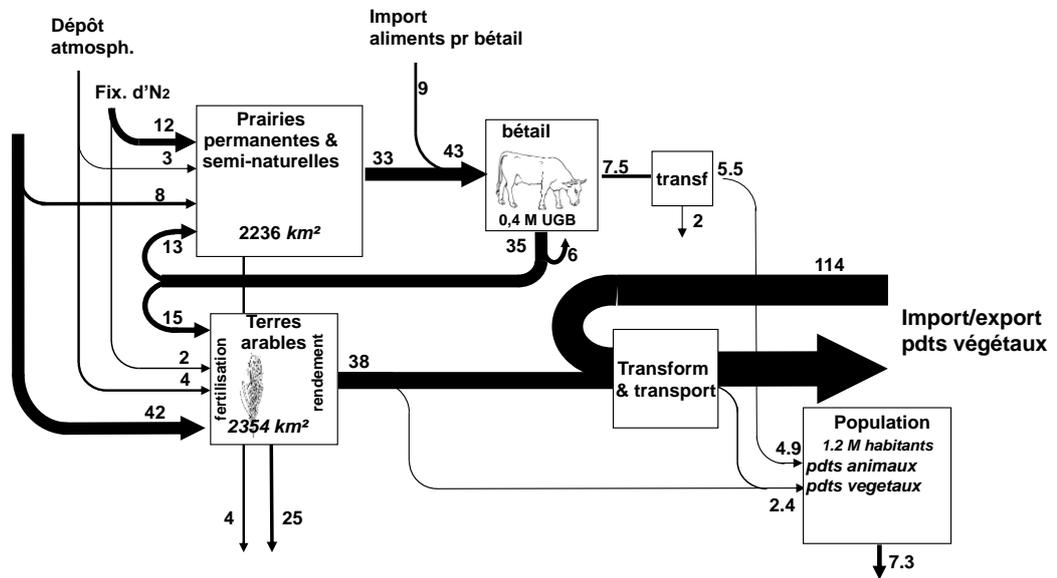
Les bilans du système agroalimentaire établis pour 1985-1987 révèlent une accentuation des spécificités de chacun des départements, mais l'industrialisation massive est très claire quand on se réfère à l'utilisation des engrais industriels multiplié par un facteur de dix à plus de vingt, au détriment de la fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses (Figure 8), (Annexes 5 et 6). Les exportations (végétales et animales) n'augmentent pas dans ces proportions, ce qui nécessairement se traduit par une augmentation des surplus azotés et par conséquent des pertes vers l'environnement. L'activité de transformation largement accentuée en Seine-Maritime, est quasi multipliée par deux dans les autres départements.

Malgré la diminution des bovins, en nombre de têtes, dès la moitié des années 1970, le nombre d'UGB augmente, en raison de l'augmentation de la taille individuelle des animaux, désormais sélectionnés grâce à l'insémination artificielle, mais aussi par le remplacement des vaches/bœufs à l'herbe au profit d'élevage intensif de monogastriques (volailles et porcins). Une forte différenciation s'établit entre les départements normands. La Manche intensifie son élevage, avec une forte augmentation des monogastriques, et une alimentation du cheptel ayant recours à la fois à la production locale d'herbe et de cultures fourragères, et, de plus en plus, à l'importation de tourteaux de soja. L'Eure au contraire abandonne progressivement l'élevage pour se tourner vers les grandes cultures. Le Calvados et l'Orne voient leur cheptel

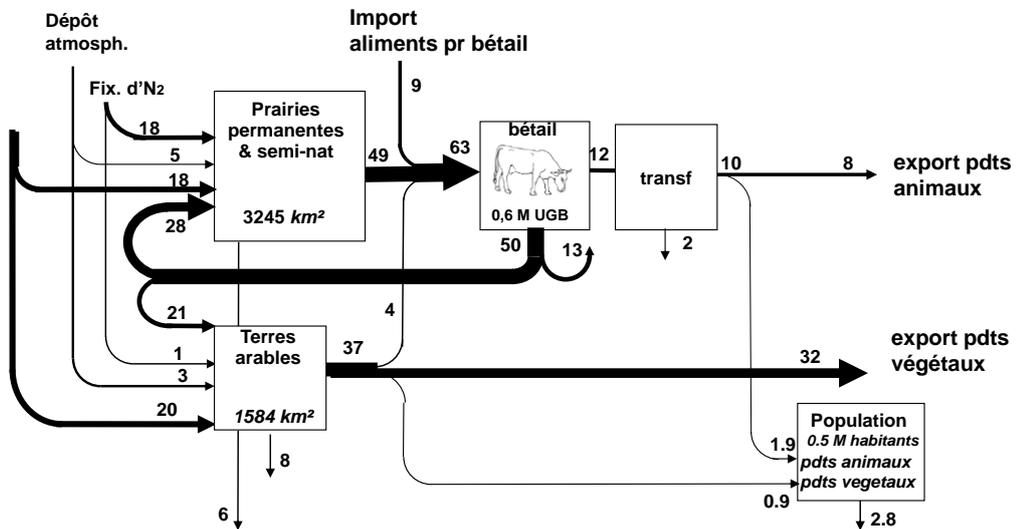
se réduire et dépendre de plus en plus des importations de fourrage. En Seine-Maritime, l'élevage reste encore inféodé à l'herbe (Figure 9), (Annexe 4).

La modernisation de l'agriculture avec l'utilisation des tracteurs et autres engins agricoles participe aussi à la diminution des gros animaux (chevaux, bœufs).

Seine Maritime (6329 km²) 1985, kton N/an

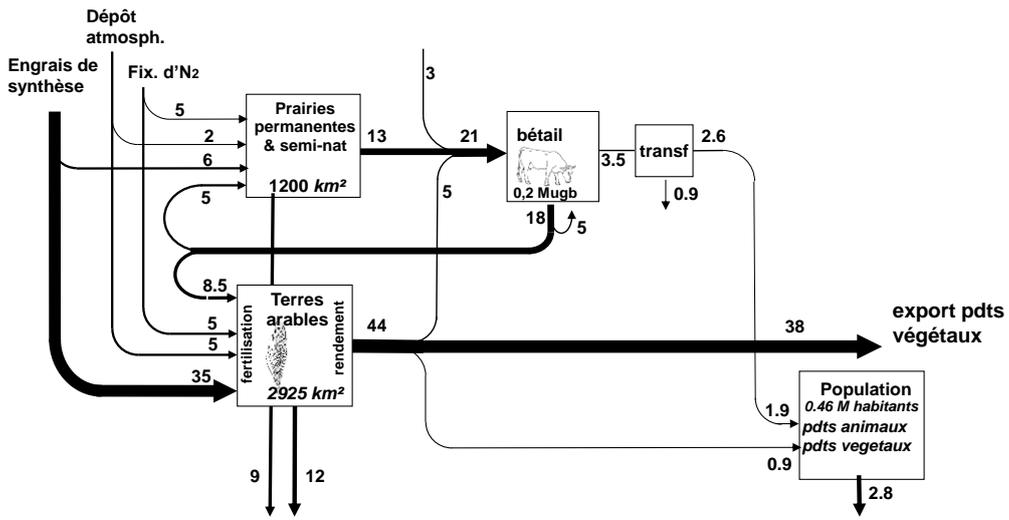


Manche (6051 km²) 1985, kton N/an



Suite figure et titre ci-après

Eure (6028 km²) 1985, kton N/an



Calvados-Orne (11758 km²) 1985, kton N/an

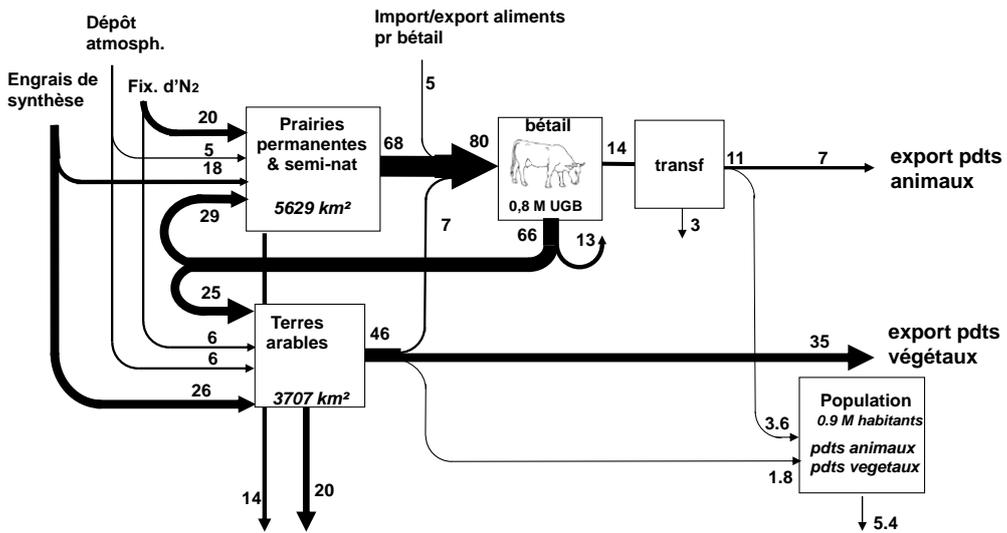


Figure 8 : Métabolisme territorial des départements de Normandie en 1985-1987, figuré par les flux d'azote à travers le système agro-alimentaire.

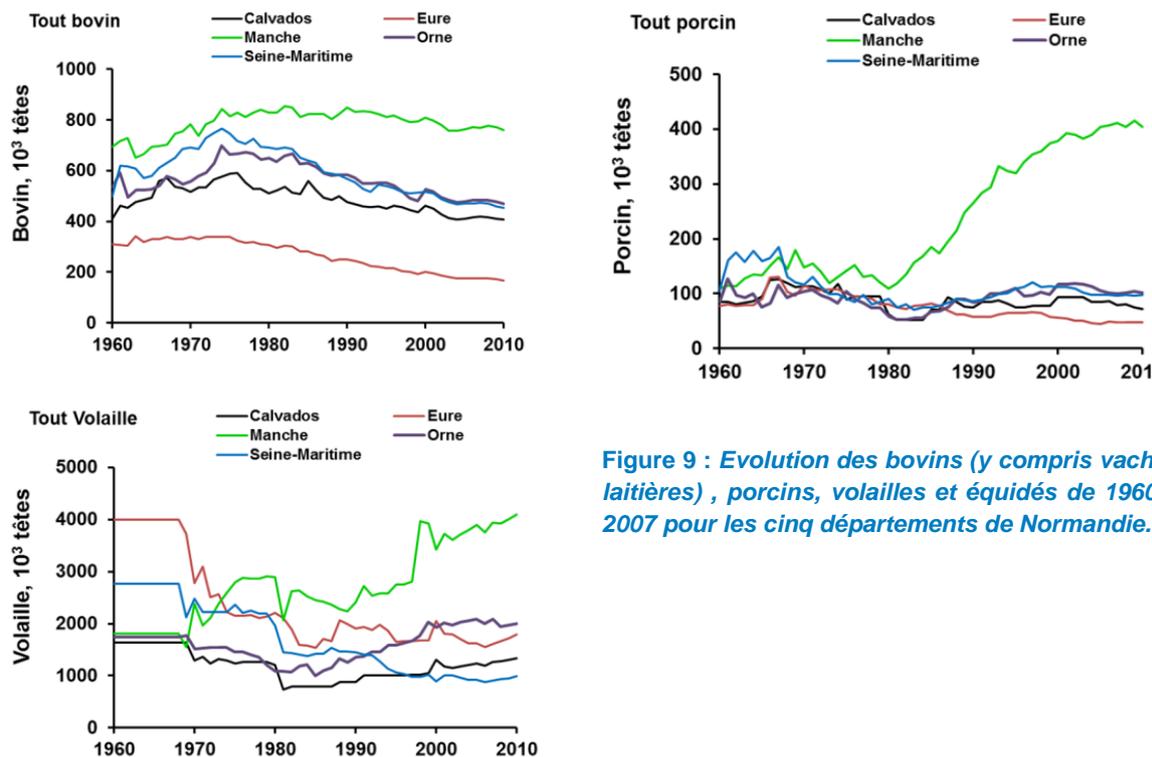


Figure 9 : Evolution des bovins (y compris vaches laitières), porcins, volailles et équidés de 1960 à 2007 pour les cinq départements de Normandie.

L'État soutient le développement des **industries agro-alimentaires** (loi d'orientation agricole de 1960 et loi complémentaire de 1962) et développe une approche des filières définie comme une « succession d'opérations sur le produit et de liaisons entre acteurs de branches différentes » (Rastoin & Bouquery, 2012, p. 13). L'Association nationale des industries agricoles et alimentaires, est créée en 1968 sous tutelle du ministère de l'Agriculture pour développer le secteur. Des développements technologiques accompagnent son essor : « les réseaux d'entrepôts et de transport frigorifiques deviennent essentiels dans tout le pays. L'intégration verticale entre commerces de gros d'approvisionnements ou collectes agricoles et première transformation industrielle se développe, en particulier à travers les coopératives, ainsi qu'entre premières transformations et préparation alimentaires » (Rastoin & Bouquery, 2012, p. 12). Dans les années 1970, on observe ainsi une concentration des entreprises laitières normandes, passant de marques commerciales individuelles en marques nationales qui gagnent en parts de marché par l'essor de la publicité (Bridel, Président, etc.). Pour la production fromagère, cette concentration « redonne la primauté à la Normandie [...] [même si] quatre ensembles [productifs] demeurent : la Basse-Normandie, élargie aux confins du Maine et de la Bretagne, les Pays de la Loire, le Poitou-Charentes et la Lorraine » (Dionnet, 1987, p. 114). Ainsi, sept groupes laitiers dominent la filière normande depuis les années 1960 (parmi lesquels existent encore aujourd'hui Nestlé, Gloria, Gervais), tandis que les entreprises traditionnelles (fermières) périclitent et que les coopératives – établies à proximité des bassins de production – se maintiennent tant bien que mal dans le bas de la hiérarchie économique du secteur. À partir des années 1970-80, les entreprises de production fromagère entrent dans les circuits mondiaux de l'économie alimentaire ; la Haute-Normandie est alors la deuxième région française en termes d'accueil des entreprises agro-industrielles à participation étrangère (surtout européenne) en valeur relative (Concato & Thuillier 1980), (Annexe 2).

Du point de vue de la distribution, dès la fin des années 1950 et avec plus de vigueur dans les années 1960, des promoteurs privés en lien avec les collectivités favorisent le développement des centres commerciaux de manière radiale autour des agglomérations. Ainsi, Carrefour (groupe Promodès) est le premier hypermarché haut-normand créé en 1973 au Mesnil Roux. Il sert de support au premier centre commercial de la région à Barentin, dans la périphérie de Rouen à proximité d'un accès autoroutier (Lemarchand, 1992). Les commerces alimentaires de centre-ville déclinent du fait d'une législation favorable à la grande distribution (Villermet, 1991) (Tableau 1). La polarisation linéaire des nouveaux centres distributeurs le long des axes routiers périphériques est aussi rendue possible par la motorisation accrue des ménages et l'étalement concomitant des agglomérations. Les supermarchés s'installent dans une logique de densification de leur maillage du territoire, à partir des centres-villes et des communes de première couronne d'où ils évincent les épiceries et les magasins populaires. De manière plus générale, dans les grandes agglomérations comme à Rouen, des sociétés extra-régionales prennent position et opèrent de manière de plus en plus intégrée pour contrôler les circuits d'approvisionnement urbain (Muller 1972; Lemarchand 1992). Dans les agglomérations moyennes, de grands supermarchés de groupes indépendants s'installent, leur maillage du territoire normand n'est pas sans rapport avec la proximité géographique dont sont issues ces enseignes (E. Leclerc est landernéen, Intermarché est locarnot). Des coopératives de distribution tentent de s'implanter avec un succès plus mitigé (Soumagne, 1996). Si les Coopérateurs de Normandie-Picardie (à l'origine de l'enseigne Le Mutant en 1986 et qui approvisionne des enseignes du groupe U) réussissent à dominer le paysage commercial régional dans les années 1980, leur succès dû à leur connaissance du territoire n'est que de courte durée : leur concurrent Intermarché connaît une très rapide expansion dans la région, en suivant un modèle commercial similaire, basé depuis sa fondation sur la proximité de l'approvisionnement (Barles & Bognon, 2010), (Annexe 2).

Tableau 1 : Évolution du nombre de commerces alimentaires, Haute-Normandie (TEHN).

	Commerces de détail	Supermarchés	Hypermarchés
1979	6 182	135	10
1989	4 722	189	18
2007	1 993	302	50

L'effet sur les marchés de gros est rapide, bien que l'État et les collectivités aient misé sur leur développement : création du MIN de Rouen (conçu comme un marché de gros régional d'importation) en 1965 ; déplacement du marché de gros de Caen en 1967 - Il était question d'en faire le « premier marché de France (Muller, 1972) - ; déplacement de celui du Havre, dont l'aire de chalandise est restreinte aux abords de l'agglomération, dans la zone portuaire en 1969. Ces deux derniers marchés étaient planifiés pour devenir des MIN. Au début des années 1970, « à peine la moitié de la consommation normande [de fruits et légumes] passe par les trois marchés » (Muller, 1972, p. 54). Se substituant progressivement aux foires et cherchant un créneau économique porteur, les marchés de gros deviennent néanmoins destinataires. L'objectif est en effet d'attirer des marchandises de toute la France pour alimenter les citoyens normands : la centralisation de ces importations (fluviomaritimes et routières) a vocation à rationaliser l'approvisionnement urbain. Rouen s'affirme comme une

plateforme d'échange incontournable, à la fois marché de redistribution (plus d'un tiers des volumes sont des productions normandes et des importations faites par le port) et d'approvisionnement pour les citoyens (le reste des volumes concerne les productions bretonnes et des productions françaises relativement lointaines). Caen est un marché d'approvisionnement pour la Basse-Normandie : les produits halieutiques y sont concentrés (24 % des volumes) et presque deux tiers des produits vendus sont importés des régions françaises. Le Havre est un marché de redistribution des productions locales (pour plus d'un tiers des volumes), de celles des régions limitrophes (presque la moitié des volumes) et des produits importés.

Le déclin des marchés havrais et caennais et l'installation du MIN de Rouen se déroulent concomitamment à l'essor de la grande distribution. Les modalités d'approvisionnement de ce secteur rendent les places marchandes traditionnelles progressivement obsolètes : les centrales d'achat offrent des gammes importantes de produits (et pas seulement des denrées brutes ou peu transformées) ainsi qu'une nouvelle commodité d'achat (les groupes commerciaux contrôlent une grande partie de la chaîne d'approvisionnement). « L'installation récente des grandes surfaces dont les sociétés propriétaires (Promodès, S.N.O.A.) achètent directement aux producteurs par grandes quantités, obtenant ainsi des prix avantageux qui se répercutent sur les prix de détail ; elles conditionnent elles-mêmes leurs produits, ce que ne font pas les grossistes des halles ; ce système réduit les manutentions, les frais qui en résultent et assure la rapidité de distribution nécessaire pour conserver la fraîcheur des denrées » (Muller, 1972, p. 53), (Annexe 2).

Parallèlement, on assiste à l'**internationalisation des ports haut-normands**. À Rouen, devenu le port régional préférentiel pour le commerce alimentaire (Tableau 2), le développement du trafic céréalier est moins clairement marqué par la présence de sociétés à participation étrangère que par celle de courtiers et négociants locaux, en lien direct avec des multinationales basées à Paris ou à l'étranger (Concato & Thuillier 1980).

Tableau 2 : Trafic du port de Rouen pour les produits agricoles, animaux et denrées alimentaires, en ktonnes (Streiff, 1955 ; TEHN, 1979, 1991 ; CCI Rouen, s. d.).

	Importations	% des import. totales	Exportations	% des export. totales	Import. – export.
1954	1 025	25,9	367	13,1	657
1976	839	9,3	3 157	48,2	-2 319
1989	315	3,8	9 077	72,4	-8 762
2014	774	8,7	8 054	62,9	-7 280

La restructuration de l'offre alimentaire est concomitante de profondes transformations dans la consommation des ménages : moins de pain, de légumes et fruits frais, de viande de boucherie, plus de produits surgelés, de chocolat, de yaourts, de plats préparés (INSEE, 1990, p. 138-139). La chute de la consommation de pain est spectaculaire : environ 140 kg par habitant et par an dans les années 1930, 84 kg/hab/an en 1965, 46 kg/hab/an en 1985 à l'échelle nationale (Rottier & Albert, 1959, p. 119 ; INSEE, 1990, p. 138-139). Ces transformations contribuent à éloigner production et consommation : les Normands ne vivent plus de l'agriculture locale ; ils ne s'en nourrissent plus non plus, ou s'ils le font, c'est en quelque sorte sans le savoir. De plus, la restauration hors domicile connaît un essor non négligeable à partir des années 1960, comme en témoignent l'apparition du groupe Sodhexo

en 1966, le développement concomitant de la restauration rapide et la naissance des tickets restaurant (Rastoin & Bouquery, 2012).

L'effet de ce système agro-alimentaire sur **la qualité de l'eau** devient considérable (Figure 10), (Annexe 10). La première loi sur l'eau (1964), qui crée les agences financières de bassin et met en place le principe pollueur-payeur, impulse une politique de réduction des rejets urbains, mais n'a dans un premier temps qu'un effet limité sur les villes normandes. En effet, l'urgence pour celles-ci est plus à la recherche de la salubrité intra-urbaine, et plus encore du logement, qu'à la maîtrise des rejets : en Haute-Normandie, seuls 73 % des résidences principales sont dotées de WC intérieurs en 1975, déjà 86 % en 1982 (TEHN, 1986, p. 45). La pression sur le milieu aquatique en est augmentée d'autant et s'ajoute à la pression industrielle, très forte à l'aval de Paris. En revanche, l'agglomération parisienne augmente considérablement sa capacité d'épuration, avec la mise en service d'Achères II en 1966, Achères III en 1972, Achères IV en 1978, Valenton 1A en 1987. À cette date, la capacité de traitement développée par le SIAAP est quasiment égale au débit à traiter. Malheureusement, les rejets par temps de pluie restent très dommageables à la qualité de la Seine, et de nombreuses agglomérations du bassin de la Seine (estuaire compris) ne traitent pas leurs eaux. Si cette contamination issue de l'aval du système alimentaire n'est pas une nouveauté, s'y ajoute désormais la contamination amont : par l'agriculture et les industries agroalimentaires. La *Figure 11* montre l'évolution spatiotemporelle complexe de la contamination par le nitrate. Cette contamination est en effet tant liée à la nitrification de l'ammonium issus de la station d'épuration d'Achères dans l'estuaire des années 1980 à 2007, puis avec la nitrification en station, la concentration en nitrate augmente dès l'aval de l'agglomération parisienne. Au km 0, en amont de Paris, l'augmentation des concentrations est liée à l'accroissement des sources agricoles.

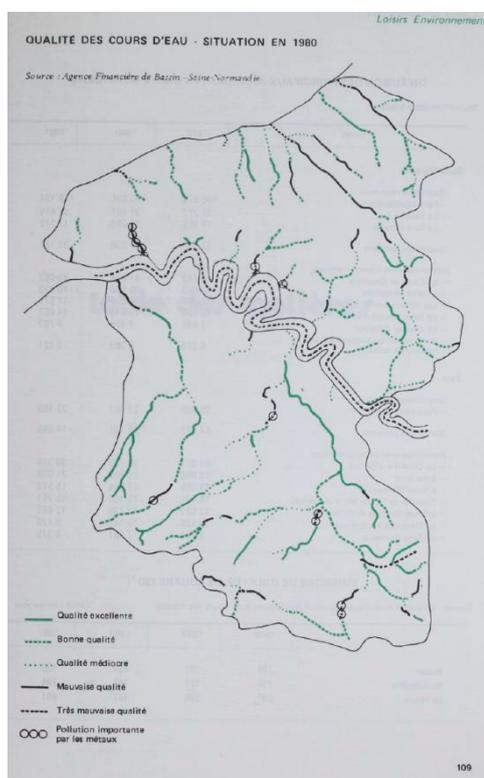


Figure 10: Qualité des cours d'eau en Haute-Normandie en 1980 (TEHN, 1986).

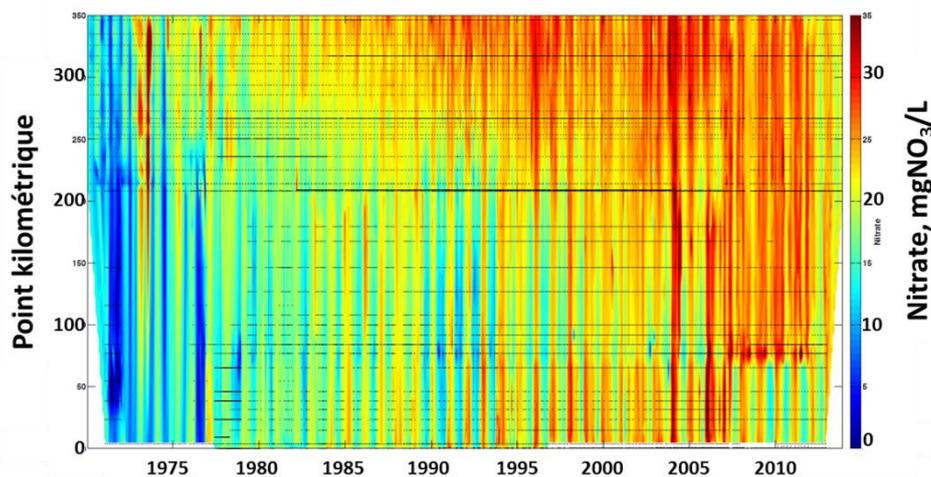


Figure 11 : Evolution de la concentration en nitrate de 1970 à 2014, de Paris (km 0) à l'estuaire (Honfleur, km 350). Le km 48 correspond à l'arrivée des effluents de l'agglomération parisienne, et le km 200 est l'entrée de l'estuaire à Poses.

Au total, le régime socio-écologique normand s'est ouvert et linéarisé dans toutes ses dimensions. L'intensification de l'élevage dans les régions qui s'y spécialisent et l'utilisation d'intrants industriels pour la production végétale ailleurs deviennent progressivement la principale source de contamination de la Seine sans que la pression urbaine n'ait significativement diminué. La Normandie est plus que jamais une région exportatrice de produits agricoles, mais elle ne se nourrit plus elle-même, non qu'elle ne puisse le faire compte tenu de ses productions, mais parce les mutations de la distribution et du commerce alimentaire ont contribué à les dé-territorialiser. La gouvernance du régime socio-écologique s'est simultanément complexifiée, impliquant des acteurs d'échelles multiples, voire a-territoriaux, et combinant une présence très forte des acteurs publics (en particulier par l'intermédiaire de la PAC), et un renforcement de celle des acteurs privés. La mondialisation économique et la privatisation de la gouvernance des flux qui l'accompagne touchent tous les secteurs amont du système alimentaire normand et laissent sur le bas-côté les acteurs qui n'ont pas la capacité (technique, institutionnelle, financière) de suivre le mouvement (Annexe 2).

2.2.2 Un système en réajustement sous injonction environnementale (début des années 1990 - fin des années 2000)

Les années 1980 ont marqué l'apogée du régime socio-écologique ouvert et mondialisé. À partir des années 1990, un certain nombre de réajustements sont observables qui, sans le remettre en question, vont le modifier à la marge.

Les tendances esquissées précédemment sont confirmées : baisse du nombre d'exploitants, avec néanmoins une stabilisation pour le Calvados, l'Orne, la Seine-Maritime dans les années 2000 (Figure 7), régression des surfaces toujours en herbe et, dans une moindre mesure, des vergers (Figure 7). La baisse du cheptel bovin continue elle aussi avec toujours une diminution moins marquée dans la Manche.

De plus, la surface agricole utile, qui s'était globalement maintenue au cours de la période précédente, connaît une légère régression : la pression foncière liée à l'urbanisation (résidences principales et secondaires) en est en partie responsable. La population régionale

continue en effet à augmenter (à l'exception de l'Orne dont la population diminue depuis le recensement de 1982), comme l'attractivité littorale et rétro-littorale. Le mitage péri-urbain conduit à l'enchevêtrement des tissus urbains et ruraux productifs : ainsi en Haute-Normandie, « plus de la moitié des exploitations agricoles sont situées dans le périmètre des aires urbaines. Celles de Rouen et du Havre recourent une zone qui, du Pays de Bray à la Pointe de Caux, concentre la plus forte densité d'exploitations. Ces deux aires urbaines recouvrent le quart des terres agricoles de la région » ([Direction régionale de l'Agriculture et de la Forêt de Haute Normandie, 2013, p. 8](#)). La périurbanisation, engagée dès les années 1970, prend une ampleur telle qu'elle conduit à une diminution de la part de la population urbaine (qui augmente en valeur absolue jusqu'en 2007), si on l'assimile à celle des unités urbaines telles que définies plus haut par la continuité du bâti : de près de 68 % en 1975, elle passe à 66 % en 1990 et 62 % en 2012 pour l'ensemble de la région. Désormais, les couronnes périurbaines accueillent l'essentiel de la croissance urbaine : les sols connaissent la même destinée que les autres ressources non renouvelables. L'essor des activités touristiques conforte ce processus.

Le secteur agro-industriel renforce son caractère économique incontournable dans la région haut-normande et continue de transformer les productions agricoles régionales en Basse-Normandie : « On est la première région française pour la fabrication du chocolat : avec Ferrero on fait le tiers du chocolat Français. On a aussi de grosses boîtes type Barry Callebaut qui est le premier chocolatier mondial, c'est un groupe suisse qui a une de ses plus grandes usines dans la région, qui traite de la fève de cacao brute. [...] Ces produits sont ensuite dispatchés dans toute la France dans les magasins qui en ont besoin » ([Entretien n° 11](#)). Plus globalement, la Normandie suit la tendance nationale tendant à rendre ce secteur de plus en plus indépendant de la production agricole : successivement Association Nationale des Industries Agricoles et Alimentaires, puis Association Nationale des industries Agro-alimentaires, en 2000, l'institution responsable des entreprises du secteur devient Association Nationale des Industries Alimentaires, marquant ainsi dans son nom l'autonomisation de ces acteurs vis-à-vis du secteur agricole ([Rastoin & Bouquery, 2012](#)). L'effondrement du commerce de détail se poursuit (Tableau 1), avec la multiplication des hypermarchés et l'émergence du hard discount (115 magasins en 2002, 156 en 2007, [TEHN](#)).

Le secteur des transports continue de soutenir la mondialisation et la privatisation du système alimentaire. Si la désindustrialisation et la concurrence internationale ont mis à mal les activités portuaires, si les ports bas normands restent en marge de la mondialisation, Rouen se maintient de manière significative dans les échanges agroalimentaires portuaires à l'échelle de la région (Tableau 2) – le site rouennais reste en retrait par rapport à Dunkerque pour certaines denrées (Annexe 2) et surtout vis-à-vis des ports du nord de l'Europe. Récemment, des investissements ont été effectués pour le fret fluvial : étant donné l'importance des importations pondéreuses à Rouen (et dans une moindre mesure au Havre) et comme « le trafic de céréales joue un rôle-clé pour l'équilibre économique [...] le réseau hydrographique européen vient appuyer une politique d'exportation de productions agricoles devenues excédentaires durant le dernier tiers du vingtième siècle » ([Beyer, 2015, p. 288](#)). Ainsi, « à l'interface entre le transport fluvial et maritime, le port de Rouen, leader européen pour l'exportation du blé, réalise à lui seul 50 % des exportations françaises et 25 % des exportations de céréales de la Communauté » ([Beyer, 2015, p. 289](#)), (Annexe 2). Les pays d'Europe comptent pour moins de 20% dans ces exportations de céréales. Les pays du Maghreb et du Proche Orient en sont de loin la destination principale, depuis l'effondrement,

au début des années 1990, des exportations vers les pays de l'ancienne Union Soviétique (Figure 12).

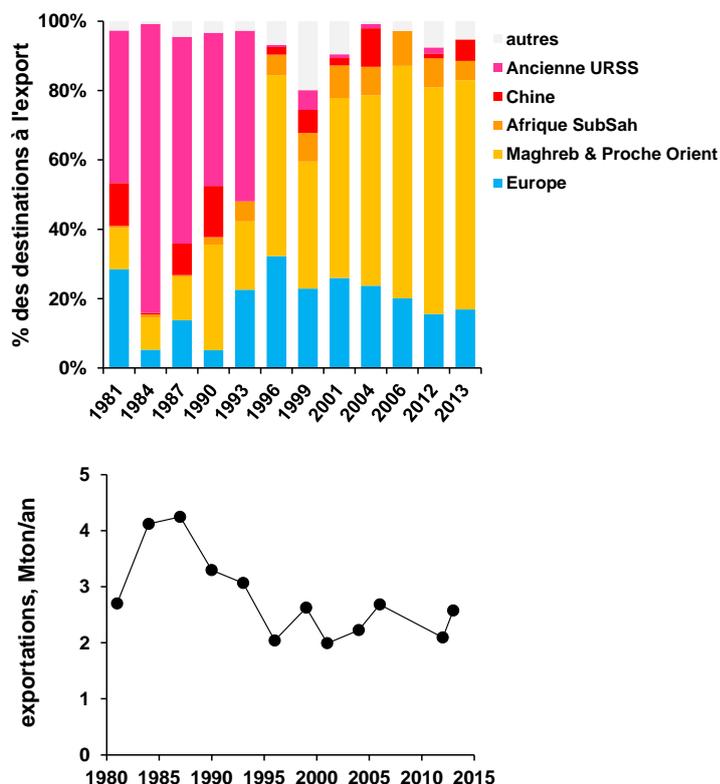
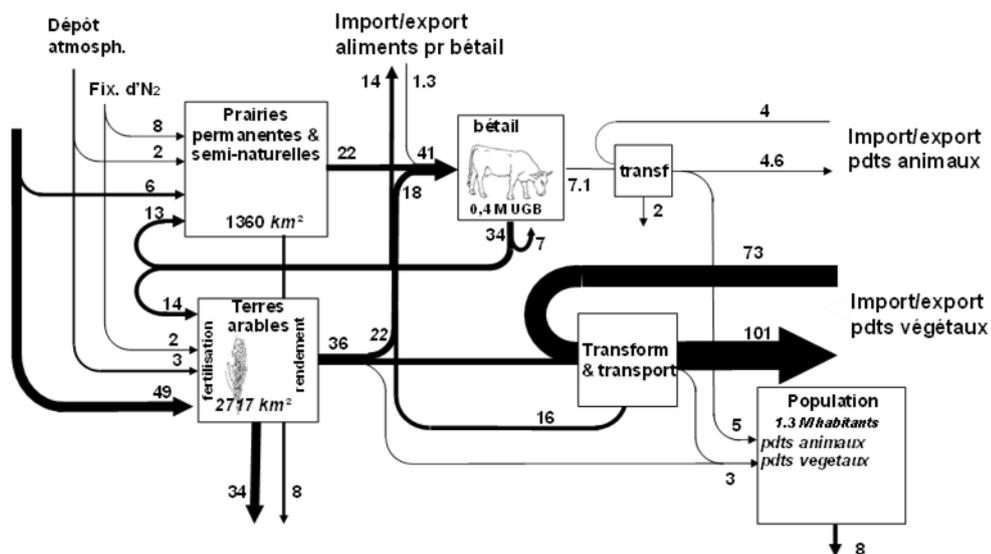


Figure 12 : Exportations de céréales (Blé + Orge) depuis la Seine Maritime (graphique inférieur) et part relative des différentes régions du monde dans ces exportations (graphique supérieur) (données SiTraM).

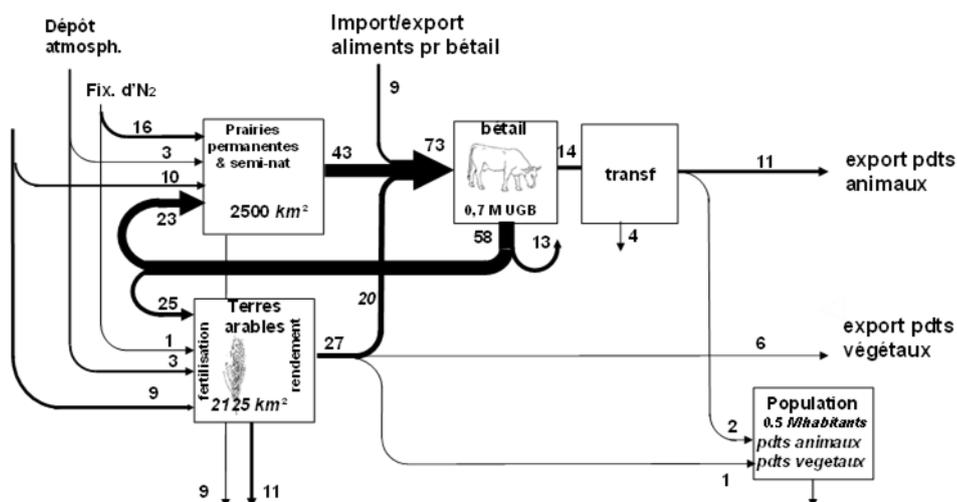
Tous ces éléments montrent que la trajectoire suit la direction engagée à partir des années 1960. Pourtant, les années 1990 marquent le renforcement de la législation à caractère environnemental, qui s'ajoute à plusieurs modifications de la PAC, dont la fin des prix garantis en 1992. En 1991 en effet, deux textes importants, d'émanation européenne, touchent directement le métabolisme territorial : la directive dite Nitrates ([EU-Nitrate directive 91/676/CEE](#)) et la directive relative aux eaux résiduaires urbaines ([EU-WWTD, directive n° 91/271 du 21/05/91](#), dite DERU). La première vise à maîtriser les apports en nitrates d'origine agricole dans les milieux aquatiques par la mise en œuvre d'un programme d'action dans les zones reconnues vulnérables dont la cartographie est l'une des premières nécessités (cartographie révisée à plusieurs reprises depuis). La seconde impose des impératifs de collecte, de traitement et de rendement d'épuration aux collectivités : près de trente ans après la loi sur l'eau de 1964, un mouvement massif d'équipement s'amorce, qui touche les collectivités de toutes taille (selon un calendrier défini dans la directive). La DERU impose par ailleurs la mise en œuvre du traitement tertiaire (dénitrification et déphosphatation) pour les agglomérations de plus de 10 000 équivalents habitants (EH) qui déversent leurs eaux dans des zones sensibles en termes d'eutrophisation. On note au passage la nuance entre zones vulnérables (pour la directive nitrates) et zones sensibles (pour la DERU). La station d'épuration de Rouen (nommée Émeraude) est ainsi mise en service en 1997 (elle est actuellement en cours d'extension).

Pourtant, les directives « nitrate » et les modifications de la PAC en 1992 ne semblent pas avoir entravé l'intensification agricole de la période précédente, comme le montrent les bilans de l'année 2006 (Figure 13), (Annexes 5 et 6). L'utilisation des engrais minéraux est en effet relativement stable par rapport à la période précédente. L'exportation des produits agricoles augmente encore, ce qui tend à montrer de meilleures performances agronomiques. Toutefois avec une nouvelle diminution de la surface des prairies, les pertes environnementales augmentent encore. De même, du point de vue de la qualité de l'eau, la DERU, ne semble avoir un effet qu'après les années 2000, avec la nouvelle directive cadre sur l'eau (EU-WFD, Directive 2000/60/CE, dite DCE). Cette amélioration concerne essentiellement les apports ponctuels urbains (phosphates, ammonium et carbone) et l'oxygénation.

Seine Maritime (6329 km²) 2006, kton N/an

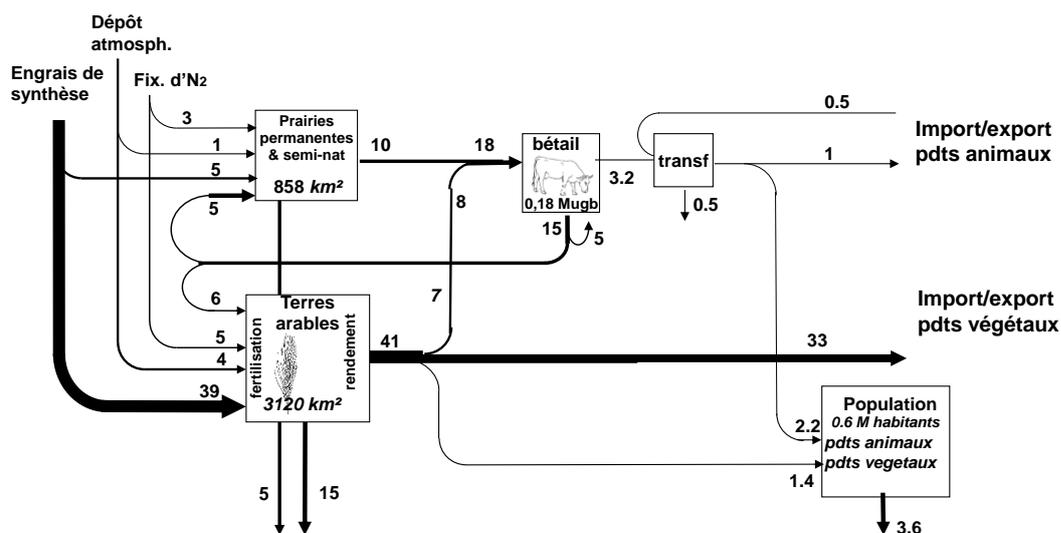


Manche (6051 km²) 2006, kton N/an



Suite figure et titre ci-après

Eure (6028 km²) 2006, kton N/an



Calvados-Orne (11758 km²) 2006, kton N/an

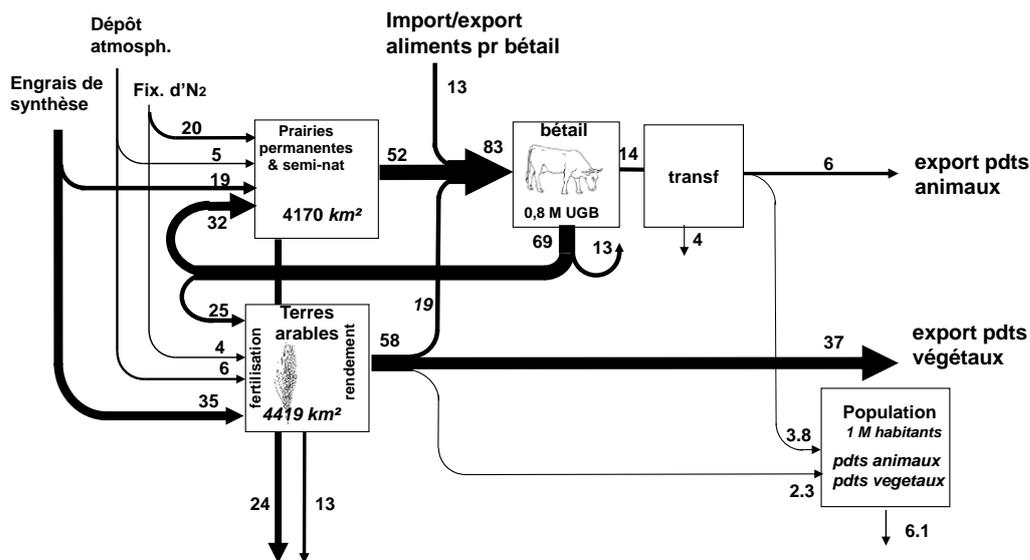


Figure 13 : Métabolisme territorial des départements de Normandie en 2006, figuré par les flux d'azote à travers le système agro-alimentaire

Si les flux fournis par l'approche GRAFS sont assortis d'une incertitude de l'ordre de 10 à 20% pour la situation de référence (évaluée par une analyse de la propagation des incertitudes sur les données de base et les paramètres au moyen d'une méthode de bootstrapping par tirage aléatoire, Le Noë et al., 2017), on peut s'attendre à ce que l'incertitude sur les flux calculés pour les valeurs anciennes soient de l'ordre de 20 à 30%, les données disponibles étant de moindre qualité et les coefficients souvent basées sur des hypothèses difficilement validables (par exemple, sur l'évolution de la physiologie des animaux d'élevage depuis le début du siècle, ou encore sur les modes de fertilisation des terres).

2.3 L'émergence de signaux faibles : vers la remise en question du système ? (Fin des années 2000 - ?)

Plusieurs signaux faibles interrogent l'avenir de la trajectoire dans différentes sphères du système agro-alimentaire.

En premier lieu, après l'apogée de la spécialisation agricole, la spécification distingue l'existence de ressources et d'actifs différenciants dans le développement du territoire. Organisés en filières dorénavant plus spécifiques, les acteurs proches sont plus clairement identifiés au sein du système agro-alimentaire et donc mieux capables de se ressaisir face à une éventuelle crise. Cette dynamique de spécification est perceptible dans deux domaines : la certification de la qualité des productions par leur origine normande, l'essor (encore très relatif) de l'agriculture biologique (Annexe 3).

Depuis les années 1990, une agriculture intégrant des critères environnementaux encourage la diversification des activités des exploitations : au tournant des années 2010, on constate l'expansion toute relative des productions certifiées par l'origine et pour leur caractère respectueux de l'environnement. La production en agriculture biologique concerne très peu de surfaces agricoles (3,3 % de la SAU des deux régions en 2015 selon l'Agence Bio), mais les productions fruitières et maraîchères se démarquent. Cela traduit une certaine praticité à la conversion pour les exploitations de cultures fragiles ([Entretien n° 10](#)), et à l'opposé, des cultures professionnelles liées à l'élevage et à la céréaliculture moins enclines et sensibles au passage à l'agriculture biologique ([Entretien n° 29](#)). Notons qu'en Basse-Normandie, l'agriculture biologique est plus développée. En surface et *a contrario* de ce qui se passe dans la région voisine, elle concerne d'abord les prairies productives et les céréales, mais aussi les productions animales (bovins et volailles) ([Agreste Basse-Normandie, 2012](#)). Néanmoins, rapportée à la surface agricole utile régionale, l'agriculture biologique reste très en dessous de la moyenne nationale (4,9% de la SAU). Cela s'explique d'une part par le relatif retard qu'a pris la région par rapport au reste de la France et d'autre part, par le faible maillage par des pôles urbains qui guideraient une demande locale ([Entretien n° 21](#)).

Les productions certifiées pour leur qualité (e.g., Label Rouge) ou pour leur origine (AOC, IGP) concernent tous les départements normands, mais le nombre d'exploitations concernées par ces certifications en Haute-Normandie reste faible malgré d'importants volumes ([DRAAF Haute Normandie 2013](#)). Cela semble s'expliquer d'une part par la multiplication des modes de certification ([Entretien n° 1](#)) ; d'autre part, parce que ces certifications sont parfois contournées par les agriculteurs qui, pour valoriser la qualité de leurs productions, s'orientent vers des canaux de commercialisation alternatifs aux certifications ([Entretien n° 27](#)). Au contraire, en Basse-Normandie et en lien avec la présence de polarités touristiques, la production de denrées sous signe d'identification de la qualité et de l'origine (SIQO) est importante (Figure 14). Ces productions y sont présentes avec une plus forte prégnance, et depuis longtemps ([Entretien n° 11](#)), en particulier du fait de productions emblématiques (Annexe 3). De manière générale, les productions agricoles bas-normandes jouissent d'une notoriété auprès des consommateurs de la région et au-delà, des touristes et visiteurs.



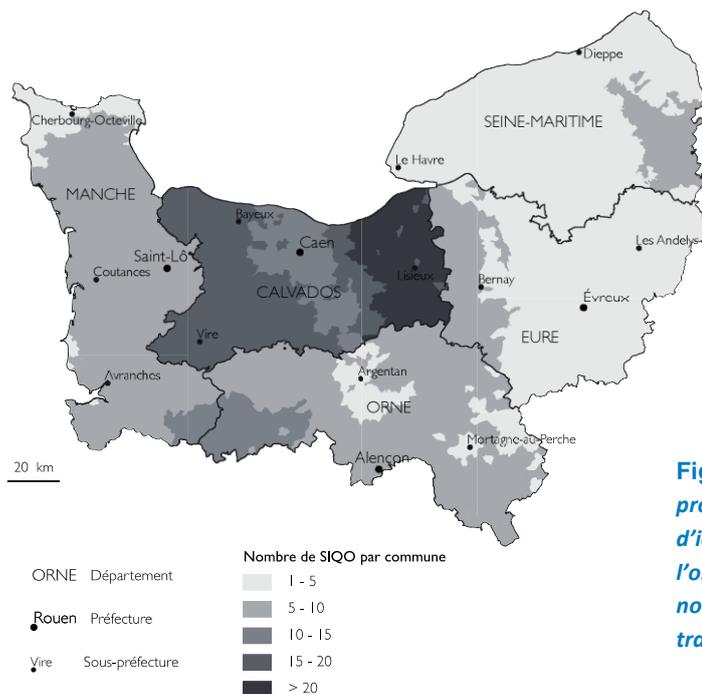


Figure 14 : Présence de productions sous signe d'identification de la qualité et de l'origine dans les départements normands. Source : INAO, 2016 – traitement S. Bognon, 2016

La sphère agro-industrielle suit la demande amorcée par le secteur de la distribution d'une offre marquant l'origine géographique des produits transformés. Par exemple, initiée par les chambres consulaires, la marque commerciale *Gourmandie* s'attache depuis 2003 à valoriser des produits locaux selon trois critères : proximité (transformation et matières premières au maximum normandes), savoir-faire (valorisation des pratiques régionales de transformation agro-alimentaire) et saveur. Cette marque est surtout vendue par les enseignes de la grande distribution, secteur avec lequel la chambre d'agriculture travaille pour faire référencer les produits dans les catalogues de centrales d'achat régionales, mais aussi par les enseignes de détaillants non affiliés.

Le rapprochement spatial et cognitif entre producteurs et consommateurs est valorisé par l'essor des circuits courts et leur succès dans les pôles de consommation (grandes villes et littoraux touristiques). D'une part, AMAP et magasins de producteurs se développent depuis le milieu des années 2000 (Lamine, 2008). Ces nouveaux formats de vente rencontrent encore des obstacles : les surfaces agricoles consacrées aux produits directement consommables restent faibles et ne répondent pas en masse à une demande qui serait généralisée ; et les initiatives de ce type sont encore peu structurées, et gouvernées par les formes de commercialisation dominantes. Pourtant, notre enquête révèle que la conquête des canaux classiques de distribution (MIN et grande distribution) par les producteurs de proximité pourrait être une aubaine commerciale et un moyen efficace de réaliser une forme de reterritorialisation massive du système alimentaire. Des acteurs auxiliaires de ces démarches se font jour : les syndicats agricoles, les associations telles que les Défis Ruraux, Interbio, les collectivités qui font appel à des groupements de producteurs (Entretien n° 10), (Annexe 3).

Par ailleurs, l'importance des marchés est notable dans les dépenses alimentaires des ménages de tous les types de communes. Malgré le fait que les acteurs rencontrés sur le terrain ne fassent pas état d'une augmentation de l'offre (que ce soit en nombre de tenues hebdomadaires ou en nombre de sites), la part des dépenses faites aux marchés ou en vente

directe augmente dans tous les types de communes en particulier en milieu rural et dans les grandes agglomérations ([Budget de famille 2006 et 2011](#)).

En parallèle et de manière transversale, la gouvernance du système agro-alimentaire semble transformée par les acteurs politiques et socio-économiques, de l'échelle nationale à l'échelle infrarégionale.

D'une part, la législation environnementale produit des effets. À l'échelle nationale, les programmes scolaires de l'enseignement agricole se transforment au profit d'une meilleure prise en compte de l'environnement dans les pratiques de production. Cela se traduit aussi par l'application au territoire de la PAC. La répartition des fonds alloués est décidée par la Région – par délégation de l'État –, guidée par les recommandations de la Chambre d'Agriculture. Celle-ci met en avant une volonté de développer l'activité, et donc de répartir les fonds sur le maximum de filières et d'exploitations tout en constituant un moyen d'orientation de la production vers des modalités plus vertueuses vis-à-vis de l'environnement ([Entretien n° 10](#)). De nombreuses actions sont en outre menées par les institutions régionales, par les collectivités locales, mais aussi par des acteurs parapublics et privés. Par exemple, la Chambre d'Agriculture mandate des missions de sensibilisation auprès des agriculteurs sur la préservation des ressources en eau ([Entretien n° 8](#)). De la même manière, depuis 2012, l'agglomération de Rouen attribue, avec les chambres consulaires et les services déconcentrés de l'État ([DRAAF, Agence de l'Eau](#)), des aides aux agriculteurs sur critères environnementaux, en particulier sur les mesures qui peuvent être prises à l'échelle de l'exploitation pour la protection de la ressource en eau ([Entretien n° 24](#)). Ou encore, depuis 1991, l'association *Les Défis Ruraux*, propose un accompagnement technique pour favoriser la réduction des impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement, mais aussi pour le maintien, le renouvellement et l'installation d'agriculteurs respectant ces principes ([Entretien n° 12](#)). En 2000, une coopérative agricole entreprend de dédier un de ses collaborateurs à une veille juridique concernant la réglementation environnementale. Ce volet de l'activité économique a été rendu nécessaire par l'amplification des réglementations et aussi pour satisfaire à la demande pressentie auprès de la clientèle ([Entretien n° 15](#)).

D'autre part, certains pouvoirs publics locaux se montrent particulièrement volontaires pour engager des formes de reterritorialisation. Citons par exemple, le revirement de la politique municipale de la ville de Rouen et du syndicat intercommunal d'approvisionnement de la restauration collective : depuis 2011, à la faveur d'une requalification des marchés publics et du retour en régie de la cuisine centrale, les ressources agricoles locales (de l'Eure et de la Basse-Normandie) sont mobilisées en priorité ([Entretien n° 17, cf. Annexe 3](#)).

Ainsi, les démarches valorisant ou imposant une réglementation favorable à l'environnement touchent essentiellement le secteur agricole et a des répercussions potentielles ou déjà effectives sur tout l'aval du système agro-alimentaire.



2.4 Éléments de conclusion

En un siècle, la Normandie a vu se succéder deux régimes socio-écologiques. Le premier se caractérise par une optimisation des cycles biogéochimiques agricoles dans un contexte de dépopulation régionale et de croissance des besoins de la capitale auxquels il s'agit de répondre. Au même moment, les villes abandonnent leurs techniques de valorisation des excreta urbains et l'agglomération parisienne déverse dans la Seine et son estuaire une grande partie de ce que la Normandie et l'ensemble du bassin amont – lui ont donné. Le second régime socio-écologique, qui monte en puissance à partir des années 1960, est marqué par l'industrialisation, la spécialisation et l'internationalisation de l'agriculture normande, la sectorisation des activités, l'essor de la grande distribution qui accroît la distance entre consommateurs et producteurs et favorise la déterritorialisation de l'alimentation. À l'impact des villes sur la qualité de l'eau, s'ajoute désormais celui de l'agriculture. La législation environnementale ne permet pas d'endiguer ce processus, bien qu'elle conduise à une réduction des impacts urbains : elle a surtout pour but de permettre le maintien du régime en place par la correction de ce qu'il est convenu de nommer ses externalités négatives. Elle s'avère par ailleurs peu efficace dans sa déclinaison agricole. Il n'est pas possible d'évaluer aujourd'hui l'effet des signaux faibles détectés depuis quelques années. Par certains aspects, ils semblent témoigner d'une ébauche de transition socio-écologique, mais rien ne dit que ces niches d'innovation (voire de contestation) seront à même de renverser le régime dominant, qui s'épuise pourtant, autant qu'il épuise la biosphère.

La frise chronologique (*Figure 15*) résume l'ensemble des évolutions et transformations du système agro-alimentaire au cours de cette période et situe dans le temps les faits marquants en termes de politiques sectorielles structurantes et de traitements des eaux usées dans les stations d'épuration. Il apparaît que les périodes clé de l'évolution de la qualité de l'eau de la Basse Seine jusqu'à son estuaire sont évidemment en phase avec ces changements.



PERIODES	1- Un système agro-alimentaire intégré au service du local et de Paris	2- Industrialisation, mondialisation, sectorisation : mise en place du régime dominant	3- Un système en réajustement pour l'environnement	4- Un système remis en cause par des signaux faibles
AGRICULTURE				
> Fertilisation	Jusqu'en 1955 : moins de 10 kgN/ha/an 1955 - début 1980's : accroissement de la fertilisation		1980's : pic de fertilisation à 200 kgN/ha/an dès 1992 : diminution de la fertilisation	
> Spécialisation (élevage/grandes cultures)	1950s : couplage agriculture/élevage (80 % des exploitations)		1965 : début de la mécanisation (disparition des chevaux de trait) dès 1970 : diminution des surfaces en prairies et en vergers (pommes) dès 1980 : augmentation des élevages de porcs et volailles (Manche) dès 1984 : diminution du cheptel bovin	
> Taille des exploitations agricoles	Jusqu'en 1950 : moins de 10 ha	1950's : 20 à 30 ha	Dès 1960 : augmentation de la taille des exploitations	2000 : 60 à 80 ha
DEBOUCHES				
> Géo / export : céréales	dès 1980 : quasi-totalité du volume des céréales exportée à l'étranger (Europe de l'Est, puis Afrique du Nord à partir de 1995) dès 1990 : changement des destinations d'export de céréales dès 1995 : augmentation de l'export de céréales transformées			
> Géo / export : viande et lait	1980 - 2013 : export de viande vers le reste de la France dès 1995 : augmentation de l'export de lait hors BV Seine			
> Commercialisation	1930 : vente directe + épiceries + transformation régionale 1960's : Basse Norm. : vente IAA 1960's : Haute Norm. : export		2000 : début des agrocarburants	
> Non alimentaire	2010 : remise en cause des agrocarburants			
TRANSFORMATION				
> Fermes / IAA	1960 - 1980 : Basse Norm. : transformation croissante des productions agricoles régionales 1960 - 1980 : Haute Norm. : transformation croissante des importations			
> Commercialisation / distribution	1973 : inauguration de l'hypermarché Carrefour à Barentin 1986 : création de l'enseigne "Le Mutant" par Coop (Normandie-Picardie)			
> Ports / Transports	1930s : axe Le Havre > Rouen : denrées, produits exotiques + porte d'entrée de la France (avec Marseille) 1960 : aménagement du nouveau chenal du port de Rouen 1960 : axe Rouen > Le Havre : denrées alimentaires 1976 : augmentation du nombre / de l'activité des silos			
CONSUMMATION	2003 : lancement du label de qualité "Gourmandie"			
AMENAGEMENT / URBANISATION	1918-1919 : loi sur le remembrement (1/2) 1941 : loi sur le remembrement (2/2) 1960 - 1980 : remembrement effectif			
POLITIQUES SECTORIELLES STRUCTURANTES	1960 : loi d'orientation agricole 1962 : entrée en vigueur de la PAC 1963 : MIN 1964 : loi sur l'eau 1973 : loi d'orientation du commerce et l'artisanat 1984 : instauration des quotas laitiers dans la PAC (crises de surproduction) 1984 : loi pêche 1991 : Directive Nitrates 1991 : DERU 1992 : loi sur l'eau 1992 : réforme de la PAC (diminution prix garantis vs. aides directes) 1998 : convention d'OSPAR (protection du milieu marin) 2000 : DCE 2003 : fin des aides directes de la PAC 2003 : plan biocarburants 2006 : loi sur l'eau 2008 : DCSMM (Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin)			
TRAITEMENT DES EAUX URBAINES	1940 : Achères I 1966 : Achères II 1972 : Achères III 1978 : Achères IV 1997 : inauguration de la STEP de Rouen 2003 : déphosphatation à Achères (clarifloculation) 2007 : nitrification Achères 2012 : dénitrification Achères			

Figure 15 : Frise chronologique de l'évolution du système agro-alimentaire normand.

3 La trajectoire hydro-écologique de la Basse Seine

Les données sur la qualité de l'eau ont été rassemblées pour 45 stations le long du fleuve (Figure 16), dont 22 dans l'estuaire et 23 en amont de l'estuaire (de Paris à Poses) depuis les années 1970 (Service De Navigation de la Seine (SNS); Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN)). Les données de qualité concernent essentiellement les nutriments (les formes de l'azote, phosphore et la silice) ainsi que la biomasse algale (en termes de concentrations en Chl a). Les données de débit existantes (1955-2014) ont été fournies par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable à travers la Banque HYDRO (www.hydro.eaufrance.fr). Au cours de la période 1970-2014, le débit moyen de la Seine était d'environ $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à Paris, et de $467 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à l'entrée de l'estuaire (Poses), avec des écarts marqués entre les flux d'hiver et d'été (à Poses, $726 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en hiver et $249 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en été), et entre années humides et sèches (Cf. Annexe 10).

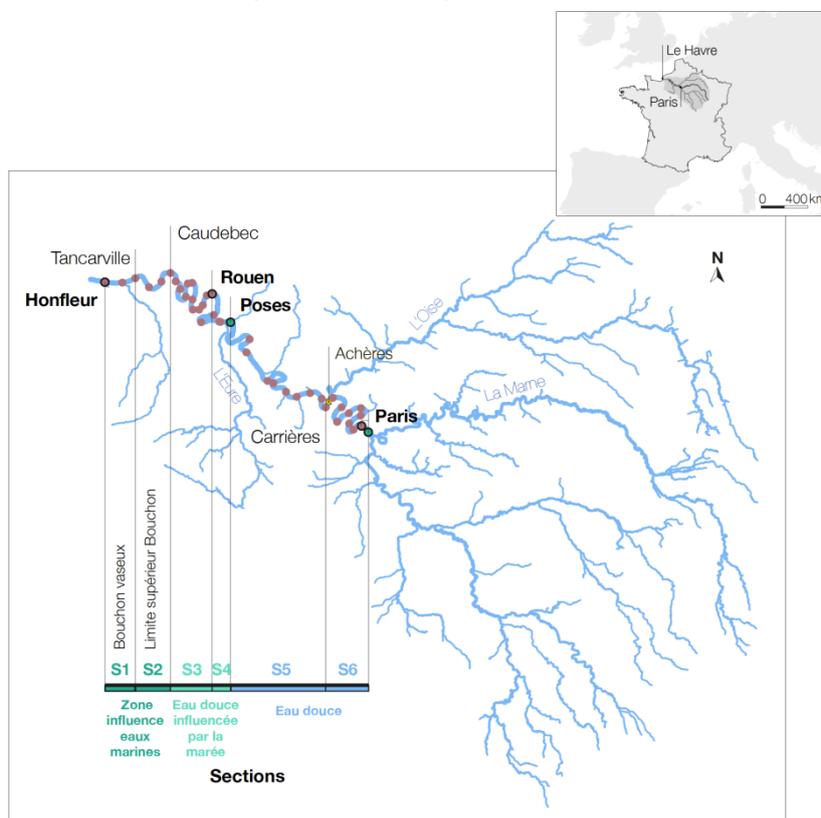


Figure 16 : Carte du bassin de la Seine avec le réseau de stations de mesure de la qualité de l'eau (points roses) et de débit (points bleus). La zone d'étude (Paris-Honfleur) est divisée en 6 sections en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et géographiques.

Avec une meilleure gestion des flux des effluents à traiter, une diminution de la matière organique permet de réduire les concentrations en ammonium, mais ce n'est qu'en 2007 avec l'instauration de la nitrification que l'ammonium diminue de manière spectaculaire (Figure 17).

Ces modifications ont conduit à une nette amélioration de l'oxygénation, d'abord à l'aval immédiat de l'agglomération parisienne, grâce à la diminution des rejets de matière

organique rapidement minéralisés par les bactéries hétérotrophes, puis dans l'estuaire, la nitrification de l'ammonium des effluents n'ayant plus lieu en Basse Seine et notamment dans l'estuaire (Billen et al., 1999 ; Garnier et al., 2007), mais en station d'épuration. Avec un taux de croissance plus faibles que les bactéries hétérotrophes, l'activité des bactéries nitrifiantes s'effectuait en effet sur une longue distance, la nitrification des rejets parisiens provoquant ainsi la désoxygénation dans l'estuaire.

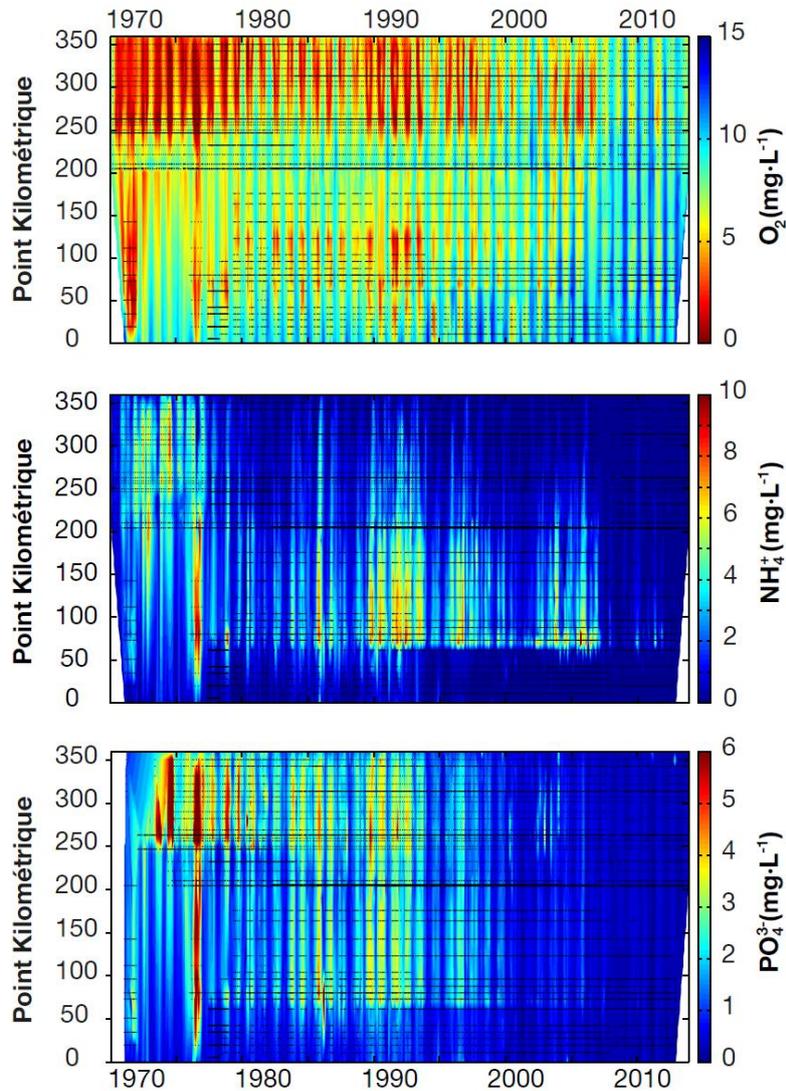


Figure 17 : Profils (1970-2013) d'oxygène dissous, d'ammonium et de phosphates pour les 45 stations d'échantillonnage, de Paris (point kilométrique 0) à Honfleur (point kilométrique 355).

Pendant cette même période les concentrations en nitrate ont régulièrement augmenté, bien qu'une stabilisation soit observée depuis quelques années (Figure 18). Ces valeurs en nitrate sont largement supérieures à celles recommandées pour un bon état écologique de 9-10 mg L⁻¹, soit 2-2.25 mgN-NO₃ L⁻¹ (Directives européennes 91/676/CEE; 91/271/CEE; 96/61/CEE; 2000/60/CE).

La mise en place de la directive nitrate ([EU-Nitrate Directive 91/676/CEE](#)) s'accompagne d'un raisonnement de la fertilisation azotée, qui se marque par une stabilisation (Orne et Calvados) ou une diminution (Manche et Eure) de l'utilisation des engrais, à partir de 1991. A l'échelle du bassin de la Seine, les effets sont très limités sur la concentration en nitrate de l'eau du fleuve, qui au mieux se stabilise près de 20 ans plus tard. Cet effet retard peut s'expliquer par l'inertie des aquifères.

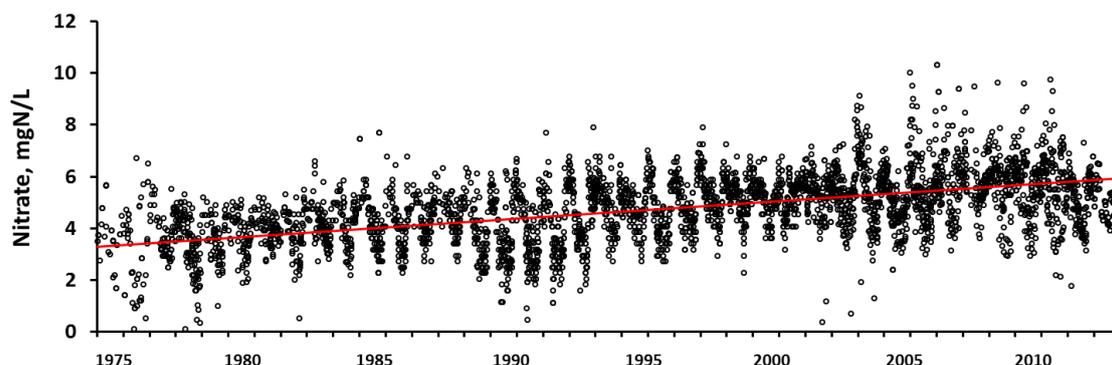


Figure 18 : Evolution des concentrations en nitrate à l'entrée de l'estuaire à Poses de 1975 à 2013.

Sur l'ensemble des stations de mesures sur l'axe Seine de Paris à la mer, la fréquence d'occurrence de situation de mauvaise qualité en ce qui concerne les nitrates ($25 \text{ à } 50 \text{ mgN-NO}_3 \text{ L}^{-1}$) s'accroît régulièrement de 1980 à 2012 (Figure 19). La situation s'améliore franchement à partir de 2012, suite à la mise en place de la dénitrification en station d'épuration. Les concentrations restent cependant très largement supérieures aux valeurs de $2\text{-}2.25 \text{ mgN-NO}_3 \text{ L}^{-1}$ correspondant à une bonne qualité écologique, c-à-d un bon équilibre nutritionnel N, P, Si pour les algues, permettant de prévenir l'eutrophisation (Annexe 10).

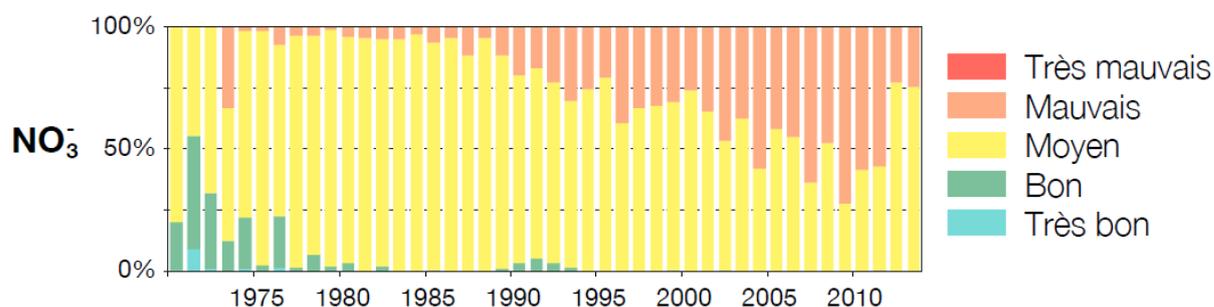


Figure 19 : Pourcentage d'échantillonnages par année (1970-2013) compris dans les 5 catégories de l'échelle EQS, telle qu'établie dans les règlements européens et français pour les concentrations en nitrates. Les seuils de concentration par catégorie sont décrits dans le Tableau A1 (Annexes 10). Les données de toutes les stations sont regroupées.

4 Modélisation du fonctionnement biogéochimique actuel de l'estuaire de Seine

4.1 Les enjeux de la qualité de l'eau

Les concentrations et les flux de nutriments des rivières varient en réponse à des variations hydrologiques et aux changements liés aux activités humaines dans le bassin versant. L'eutrophisation des rivières a atteint un maximum dans les années 1980-1990 et n'a été réduite que récemment vers les années (2010) après à une amélioration progressive de la gestion du phosphore des effluents domestiques (réduction puis élimination des polyphosphates dans les lessives, création de nouvelles stations d'épuration (STEPS), traitement du P des eaux usées par floculation...). Dans le même temps l'augmentation de l'utilisation d'engrais azotés (N) par l'agriculture a conduit, dans les apports fluviaux à la mer, à un excès de N par rapport au P et à la silice (Si) élément indispensable à la croissance des diatomées. Les flux de N déséquilibrés par rapport au besoin des algues sont de nature à favoriser les espèces indésirables, voire toxiques à la Baie de Seine (Passy et al., 2016 ; Riou et al., 2016). Malgré les traitements de l'azote dans les grandes stations d'épuration parisiennes (nitrification en 2007 et dénitrification en 2012), les flux d'azote restent en excès par rapport à la silice à l'exutoire de la Seine fluviale, ce qui constitue une menace potentielle pour l'eutrophisation côtière.

4.2 L'estuaire de Seine : une zone filtre entre le fleuve et la mer ?

4.2.1 Dynamique du système estuarien sur la période de référence 2009-2013

L'effet filtre potentiel de l'Estuaire vis-à-vis des flux apportés par le fleuve n'avait fait jusqu'ici l'objet que d'estimations assez grossières (Garnier et al., 2008 ; Garnier et al. 2010), basées sur des observations de distribution des concentrations en nutriments dans le gradient de salinité, ou de modélisations simplifiées. Dans le cadre du projet RESET, la chaîne de modélisation GRAFS-Seneque/Riverstrahler-ECO-MARS 3D a été utilisée en conditions réalistes pour simuler une période de référence du fonctionnement actuel de l'estuaire de Seine. Au sein de la chronique 2002-2014 traitée par le modèle GRAFS-Seneque/Riverstrahler, les simulations en estuaire et en zone marine côtière ont été effectuées sur 3 ans (2011-2013) avec une année de spin-up, lapse de temps permettant la stabilisation du signal. Cette période de 3 années permet de tester le rôle biogéochimique de l'estuaire sous différentes conditions hydrologique. L'année 2011, a été relativement sèche, surtout en été (399 m³/s en moyenne à Poses et 224 m³/s pour la période estivale), l'année 2012 peut être considérée comme une année moyenne (483m³/s en moyenne à Poses et 343 m³/s pour la période estivale), et l'année 2013 plus humide 854 m³/s en moyenne à Poses et 578 m³/s pour la période estivale).

Il existe de manière générale un accord raisonnable entre les simulations et les observations, dans l'estuaire et la Baie de Seine (Figure 20). La performance du modèle est

aussi explicitée en Annexe 11. Les critères de performance choisis ici (RMSE normalisé et % biais) indiquent généralement une bonne adéquation entre les simulations et les observations, et le % biais reste dans une gamme raisonnable même si, à l'une ou l'autre station de l'estuaire ou de la Baie de Seine, il existe parfois une surestimation ou sous-estimation du modèle par rapport aux données.

Les couples de données NRMSE et % biais à Poses reflètent la performance du modèle Seneque-Riverstrahler, entrée du modèle Eco-Mars-3D-Estuaire. Les matières en suspension (TSS) y sont surestimées, et donc la transparence de l'eau sous-estimée, induisant des concentrations en chlorophylle a logiquement sous-estimées (Figure 20).

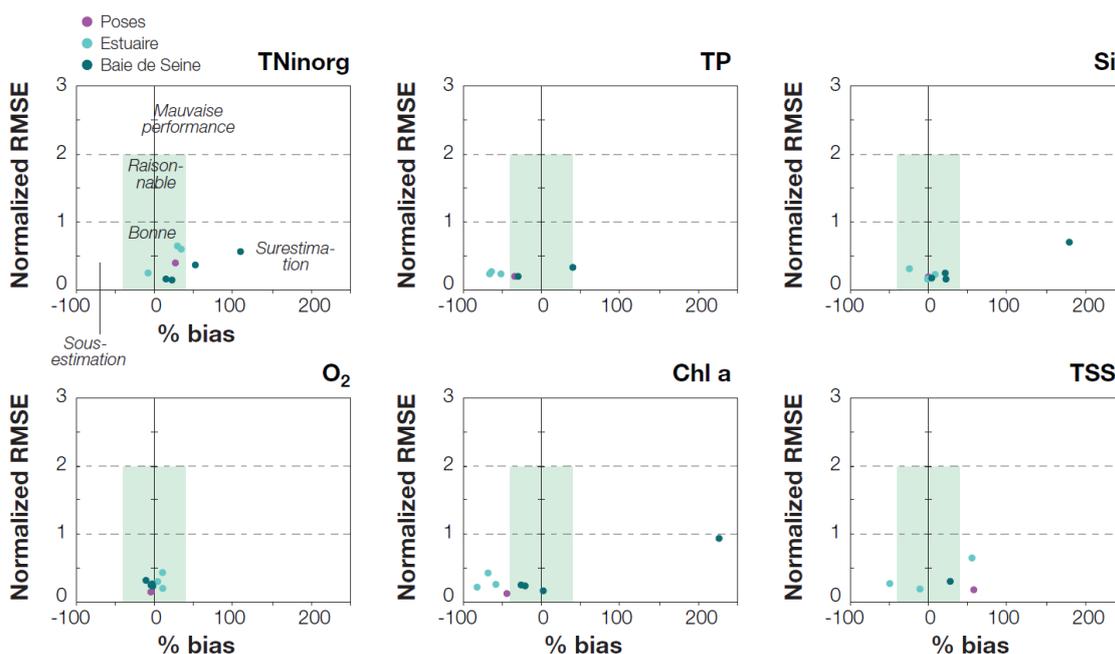


Figure 20 : Graphiques de validation générale du modèle : performances du modèle pour diverses variables en termes de RMSE normalisé et de biais. La moyenne journalière modèle est comparée avec la valeur "instantanée" mesurée. % biais = 100* (somme(modèle-obs)/somme(obs)) ;

$$NRMSE = \text{Racine carrée}(\text{moyenne}((\text{modèle}-\text{obs})^2))/(\text{maximum}(\text{obs})-\text{minimum}(\text{obs})).$$

La surface bleutée du diagramme recouvre la zone de bonne performance du modèle.

Les résultats de la modélisation sont dans l'ensemble satisfaisants et tout particulièrement dans le bouchon vaseux, section difficile à reproduire par modélisation en raison de la complexité des processus hydro-sédimentaires qui s'y déroulent. Le phosphore total -TP- et la chlorophylle a -Chl a- sont toutefois sous-estimées. Pour le domaine marin, les surestimations importantes observées concernent la station de Géfosse (cf. Figure 23, ci-dessous).

La Figure 21 permet d'approfondir les résultats des simulations du phosphore, variable problématique tant à simuler en raison de sa dépendance à la dynamique particulière, qu'à mesurer car les méthodes de mesures de phosphore total sur l'eau brute d'un échantillon ne sont pas toujours représentatives de la colonne d'eau, surtout dans un milieu stratifié comme l'estuaire.

Les simulations sur le devenir du phosphore total et des phosphates reproduisent toutefois assez bien les observations dans l'estuaire, de Poses à Honfleur, mais aussi dans la Baie de Seine (Figure 21). Le modèle tend à sous-estimer les observations à Poses (modèle Riverstrahler), sous-estimations que le modèle Eco-Mars 3D estuaire ne corrige pas à Caudebec.

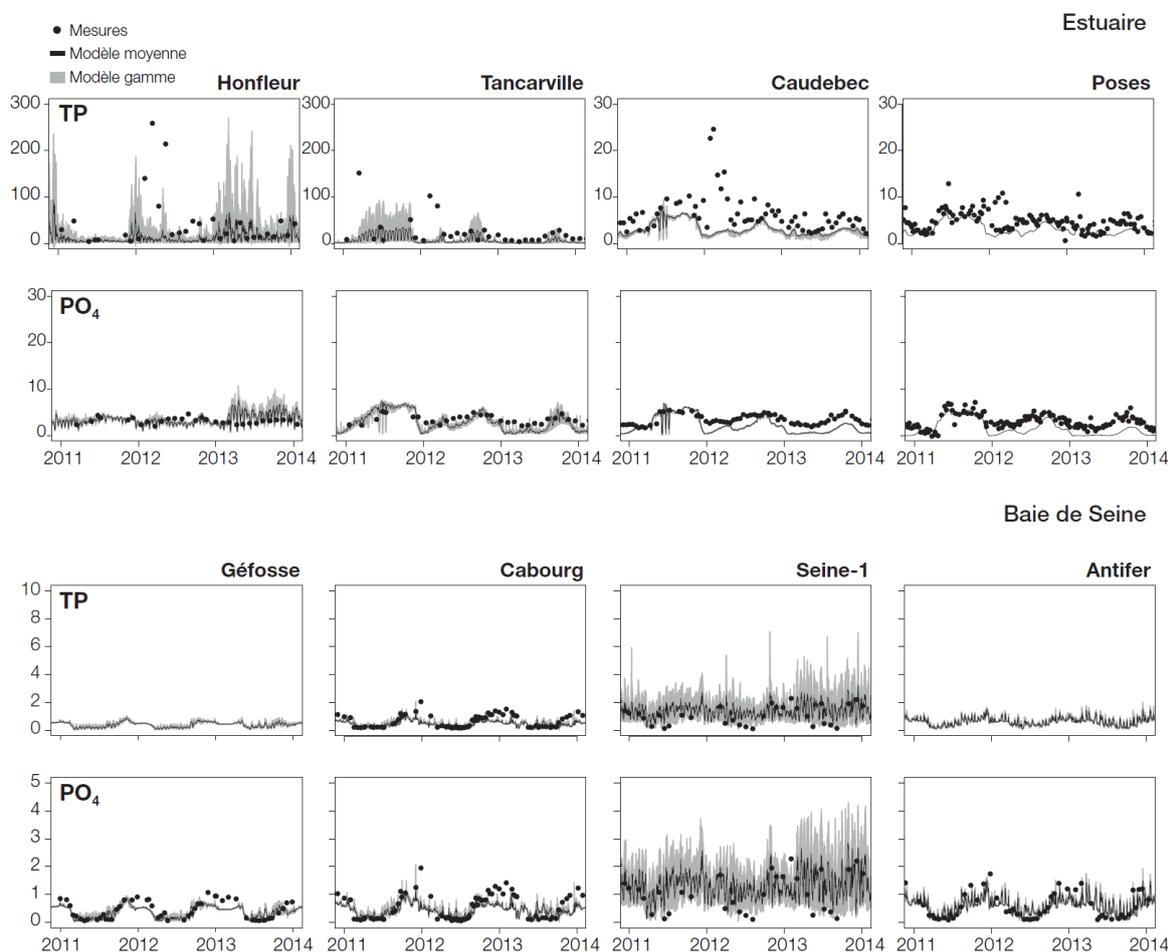


Figure 21 : Comparaison entre les simulations du modèle Seneque-Riverstrahler à Poses (en haut, à droite) et Eco-Mars 3D-estuaire et les observations, dans l'estuaire (Caudebec, Tancarville, Honfleur) et dans le domaine marin pour le phosphore total (TP) et les phosphates (PO4).

Les concentrations en ammonium sont surestimées à la station de Poses, de même que dans une moindre mesure, les concentrations en nitrate (Figure 22). Ces surestimations proviennent de la difficulté à reproduire avec fidélité les apports de la station d'Achères qui, au cours de la période étudiée, marquée par la mise en place des traitements de nitrification (dès 2007), puis de dénitrification (à partir de 2011), a vu son fonctionnement varier de manière parfois quelque peu aléatoire dans les années qui ont suivi.

Si l'adéquation entre les simulations et les observations de l'ammonium se rétablit de Caudebec à Honfleur, la surestimation du nitrate se propage jusqu'à Tancarville, puis observations et simulations montrent un bon accord à Honfleur. Ces deux variables sont correctement simulées en Baie de Seine (Figure 23).

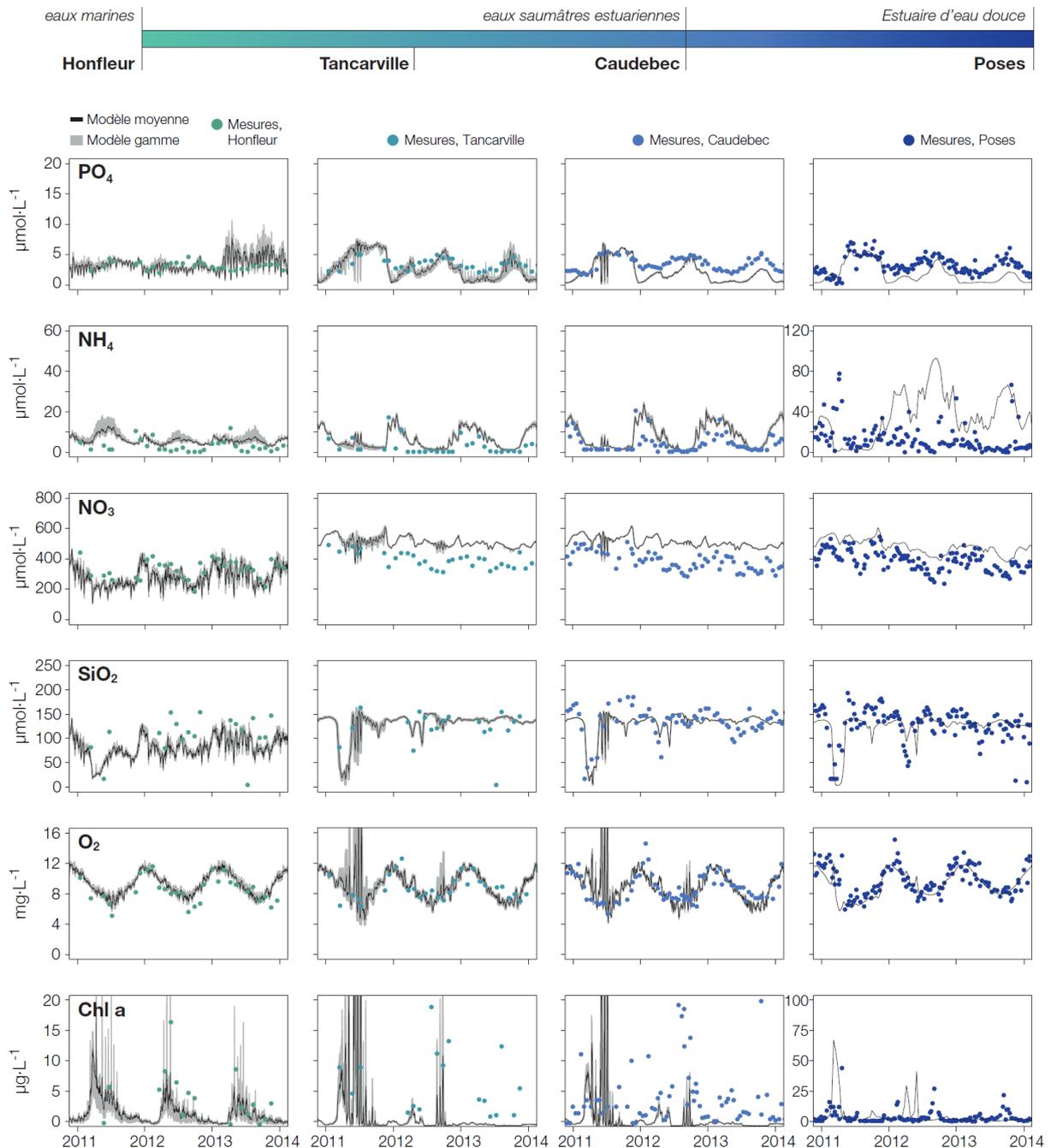


Figure 22 : Comparaison entre les simulations du modèle Seneque-Riverstrahler (à Poses à droite) et Eco-Mars 3D-estuaire et les observations, de droite à gauche, à Caudebec, Tancarville, Honfleur et de haut en bas, pour les phosphates, l'ammonium le nitrate, la silice, l'oxygène et la chlorophylle a. Les simulations du modèle sont indiquées en moyenne journalière et en valeurs extrêmes journalières.

Les concentrations en silice, en oxygène et en chlorophylle a sont également bien rendues par la chaîne de modélisation, de Poses à la Baie de Seine (Figure 22 & Figure 23). Seules les concentrations en silice et en chlorophylle a sont toutefois surestimées à la station de Gêfosse, la plus éloignée de l'embouchure et surtout dans une zone proche des conditions limites du modèle marin et donc soumis à plus d'incertitudes.

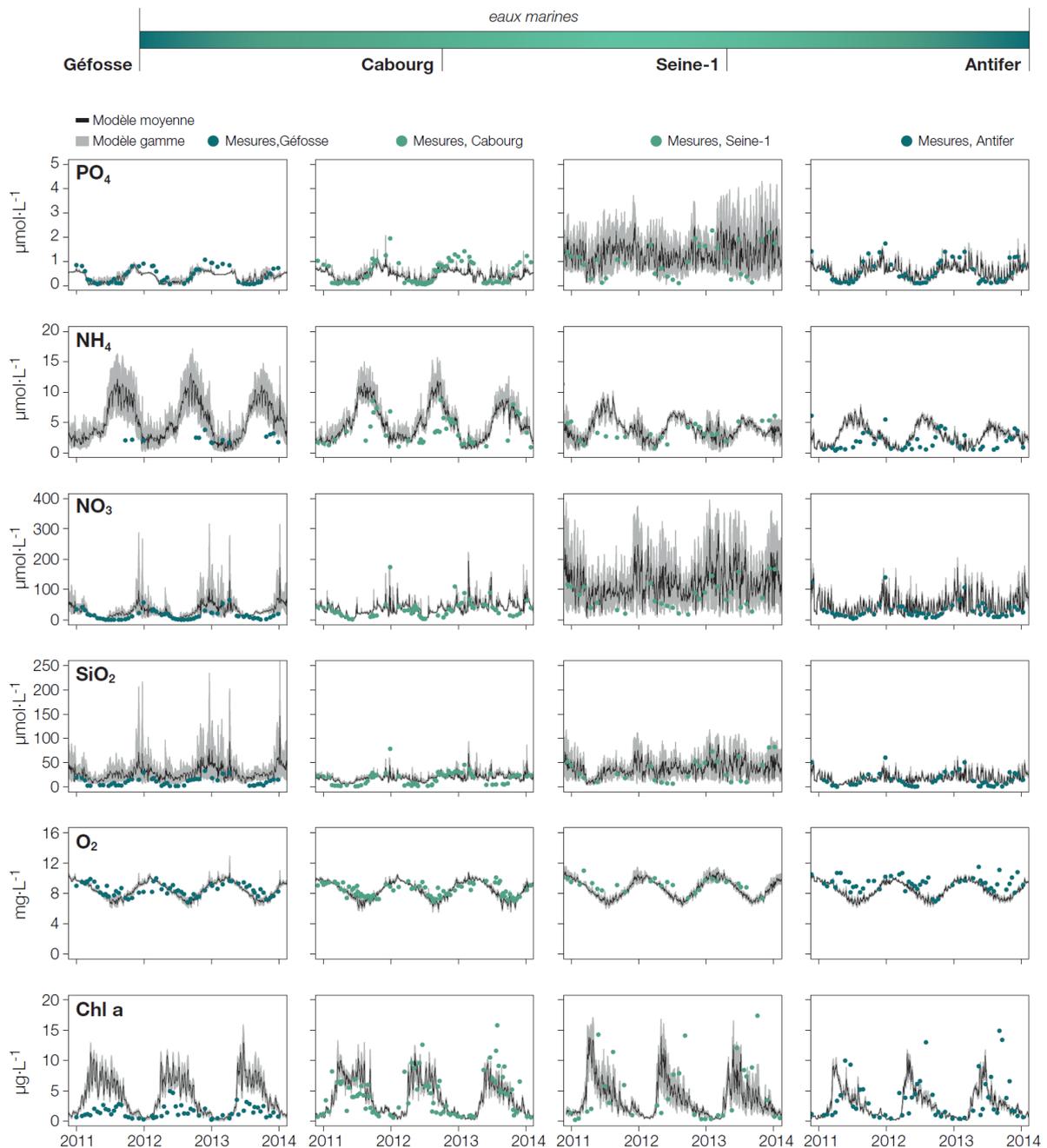


Figure 23 : Comparaison entre les simulations du modèle Eco-Mars 3D-estuaire et les observations, de droite à gauche, Antifer, Seine-1, Cabourg et Géfosse, et de haut en bas, pour les phosphates, l'ammonium le nitrate, la silice, l'oxygène et la chlorophylle a. Les simulations du modèle sont indiquées en moyenne journalière et en valeurs extrêmes journalières.

Les variations saisonnières (après filtrage de l'effet de marée) des nutriments, de l'oxygène et de la chlorophylle pour la situation de référence montrent que dans l'estuaire, et encore plus à Poses (Cf. l'ammonium), les concentrations en nutriments sont remarquablement plus élevées que dans les eaux côtières marines où elles sont diluées, et les tendances saisonnières sont moins marquées (Cf. les concentrations en oxygène).

Les concentrations à la zone côtière sont diminuées d'un facteur 5 pour l'ammonium, 2-3 pour le nitrate et la silice, mais plutôt d'un facteur 5 à 10, en moyenne pour le phosphore total et les phosphates, ce qui peut aussi s'interpréter par un prélèvement important par le phytoplancton, dans un environnement où la lumière, à la différence de l'estuaire, n'est pas limitante. En conséquence, les concentrations en chlorophylle *a* dans la zone marine côtière sont relativement élevées aux trois stations par rapport à celles de l'estuaire. Les valeurs à Honfleur sont proches de celles de la zone côtière, montrant que l'aval de l'estuaire est fortement influencé par les eaux côtières, avec de possibles apports de biomasse marine.

Les concentrations de phosphore sont particulièrement variables dans le bouchon vaseux (Tancarville et Honfleur) en raison des processus d'adsorption/désorption. Une variabilité existe aussi pour les concentrations en chlorophylle *a*, silice et nitrate à l'aval de l'estuaire, en raison des interférences entre les eaux marines et eaux douces (Figure 22 & Figure 23).

4.2.2 Bilan des flux de nutriments : transformation, rétention, export

La rétention des éléments nutritifs dans l'estuaire, que l'on désigne par « effet filtre », peut varier considérablement d'une année à l'autre. Au cours d'une année moyenne en termes de pluviométrie et de débit, pour tout le profil estuarien (Poses-Le Havre), on observe une réduction notable des flux d'azote et de silice (-13% et -11%, respectivement en moyenne sur les 3 années), mais une réduction plus élevée du flux de phosphore total (-27%) (Figure 23, Tableau 3), (Annexe 11).

Tableau 3 : Pourcentage de rétention de l'estuaire (entre Poses et Le Havre) en moyenne annuelle pour chacune des 3 années, ainsi que la moyenne annuelle des 3 années. Ces pourcentages de rétentions sont aussi calculés pour la période hivernale (de novembre à mars) et estivale (d'avril à octobre), ces périodes correspondant aux saisons hydrologiques.

Référence	Filtre estuarien : Poses-Le Havre		
	NTOT	PTOT	SITOT
	t/yr	t/yr	t/yr
2011	-10.9%	-25.0%	-5.7%
2012	-9.6%	-22.7%	-8.7%
2013	-17.2%	-34.1%	-17.1%
m	-12.6%	-27.3%	-10.5%
H 2011	-7.3%	-16.8%	-2.3%
H 2012	-8.0%	-20.6%	-6.6%
H 2013	-15.4%	-27.2%	-16.0%
Hiver	-10.2%	-21.5%	-8.3%
E 2011	-18.5%	-36.1%	-14.8%
E 2012	-12.1%	-25.4%	-11.9%
E 2013	-20.0%	-44.5%	-18.9%
Eté	-16.8%	-35.3%	-15.2%

Pendant les années sèches comme 2011, on observe une plus faible rétention des 3 éléments avec en revanche, au cours des années humides, une augmentation de la rétention. Ces résultats paraissent contre-intuitifs, car on pourrait penser que les temps de séjours des masses d'eau plus longs en année sèche conduisent à plus de rétention relative, mais ce n'est pas ce que montrent les résultats de modélisation. Toutefois, en séparant les rétentions

purement estuariennes pour les périodes hivernales et estivales, celles-ci sont en effet plus élevées en été (Tableau 3). Au total, les rétentions dans l'estuaire varient d'une année à l'autre de 60%, 42 % et 100 % respectivement pour l'azote total, le phosphore total et la silice.

La Figure 24 montre également les résultats du bilan de rétention/relargage pour l'azote, le phosphore et la silice, dans différentes sections de l'estuaire de la Seine. C'est le tronçon Poses-Caudebec qui apparaît le plus rétentif pour les 3 nutriments, plus que les secteurs Tancarville-Honfleur et Honfleur-Le Havre où se situe le bouchon vaseux. Le secteur Caudebec-Tancarville à l'interface de l'estuaire fluvial et salin révèle au contraire une légère exportation du phosphore total et apparaît neutre pour l'azote et la silice (Figure 24).

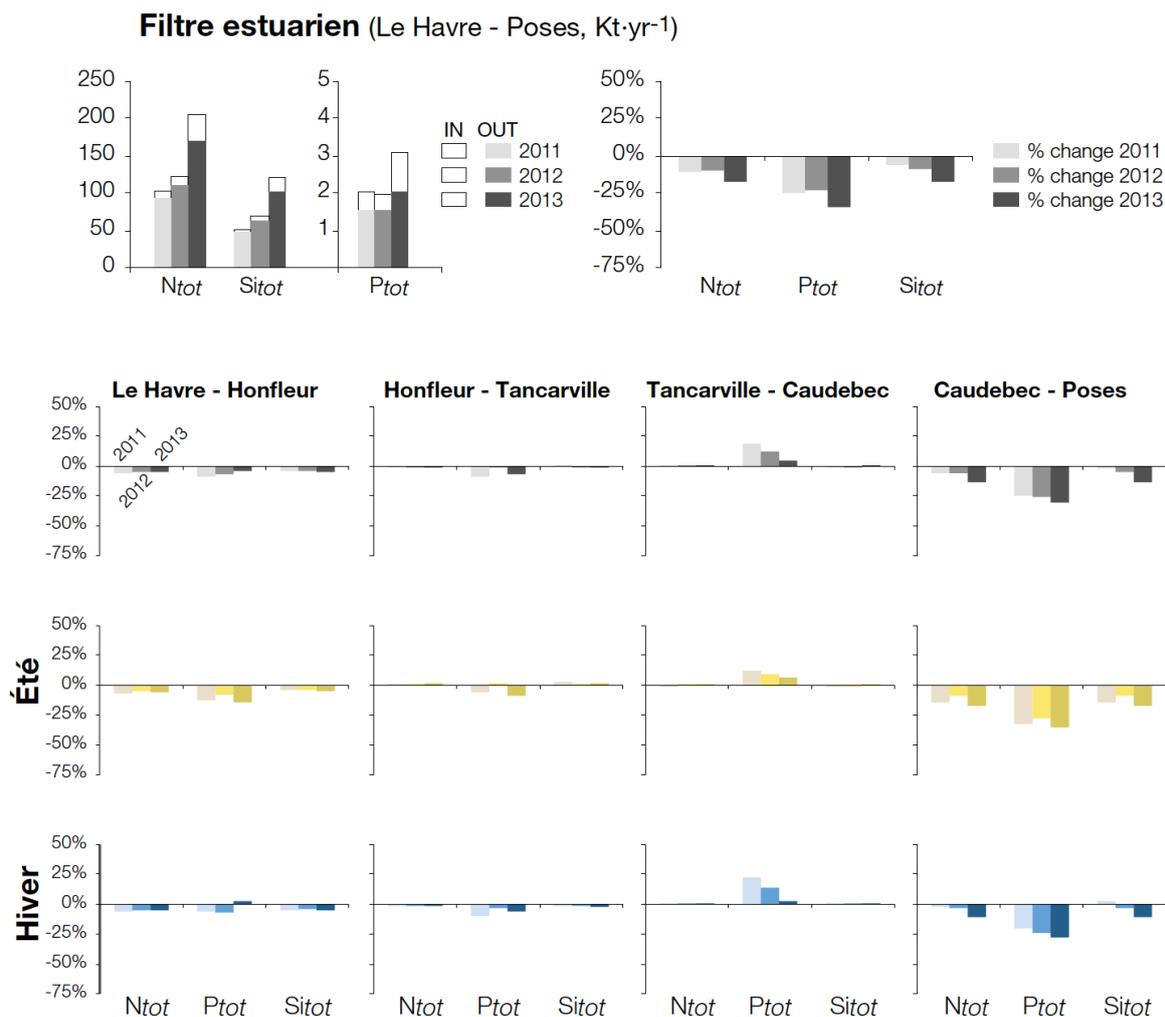


Figure 24 : Bilan de transformation pour l'azote total (Ntot), le phosphore total (Ptot) et la silice (Sitot) dans l'estuaire de Poses au Havre pour les 3 années caractéristiques. Les pourcentages de rétention sont également montrés par secteur estuarien et par saison (hiver de novembre à mars, et été d'avril à octobre, correspondant à la saison hydrologique).

Ce secteur d'interface entre l'estuaire fluvial et le bouchon vaseux dans lequel le sédiment en suspension est en interaction permanente avec le phosphore dissous par les processus d'adsorption/désorption. On assiste alors à un relargage de phosphore depuis le sédiment, dont le stock n'aurait peut-être pas atteint l'état stationnaire sur un pas de temps annuel (Figure 24).

Un effet filtre plus important dans le secteur Poses-Caudebec, *a priori* surprenant par rapport au rôle du bouchon vaseux, peut s'expliquer par sa longueur (108 km) conduisant à plus de zones d'interface, par rapport aux tronçons Caudebec-Tancarville, Tancarville-Honfleur et Honfleur-Le Havre (20 à 30 km chacun).

5 Scénarios prospectifs

5.1 Objectifs et méthode de la prospective

Un volet important du projet a consisté à élaborer divers scénarios d'évolution à 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, avec la chaîne de modélisation GRAFS-Riverstrahler-EcoMars Estuaire & zone côtière. Ces scénarios sont enrichis des connaissances acquises sur les trajectoires et transitions identifiées au cours des 50 années d'évolution de l'agriculture, de la distribution et de la consommation alimentaire.

Dans le cadre d'une des réunions du consortium RESET, une présentation du projet PERCEES (Fondation de France & GIP-Seine Aval, coordonné par Audrey Coraux), a été réalisée le 25 novembre 2015 (présentation par Sarah Lumbroso), afin d'examiner les scénarios proposés pour éventuellement les mobiliser dans le cadre de RESET. Bien que les deux projets aient pour objectif d'articuler les enjeux environnementaux et les enjeux socio-économiques du territoire, l'objet du projet PERCEES était de réfléchir à une restauration de l'estuaire en termes écologiques et hydromorphologiques, tandis que le projet RESET cherche plutôt à quantifier les apports de nutriments à l'estuaire et son rôle filtre et l'impact de ces flux en termes d'eutrophisation à la zone côtière. Les narratifs des scénarios PERCEES et les réactions qu'ils ont suscitées ont toutefois été utiles à la réflexion pour la construction des scénarios RESET, l'amélioration de la qualité de l'eau de l'estuaire étant nécessairement aussi liée à sa restauration écologique et hydromorphologique, bien que les outils développés ici ne soient pas en mesure de prendre en compte ces aspects.

Lors de la réunion du consortium RESET le 23 mars 2016 (à Paris), les grandes lignes de scénarios contrastés ont été proposées, puis soumises à la réflexion des partenaires lors de la réunion du 13 juin 2016 (à Rouen) pour recueillir leurs réactions, les enrichir et les préciser. L'AESN, la Métropole Rouen, le Port de Rouen, la DREAL Normandie, l'Union des industries chimiques (UIC) ont participé. Des membres des programmes GIP-SA et PIREN-Seine étaient aussi présents.

Les scénarios retenus s'inspirent 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](#)).

Quatre scénarios contrastés, plausibles mais sans doute provocateurs, ont été élaborés. Ils constituent plus des visions territoriales contrastées que des scénarios normatifs car ils ont été construits pour pousser à l'extrême certaines tendances déjà perceptibles dans le territoire d'aujourd'hui (Annexe 7).

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 des tendances déjà perceptibles dans les dynamiques actuellement à l'œuvre étaient poussées jusqu'au bout de leur logique.

5.2 Les 4 scénarios prospectifs

5.2.1 Le futur radioux 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 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.

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

Narratif. La transition écologique prend corps avec des actions volontaristes de l'Etat (énergies renouvelables, politique foncière limitant l'extension urbaine), qui se poursuit autour des petites et moyennes agglomérations existantes, y compris à l'amont du bassin.

Les pratiques d'assainissement urbain évoluent vers des filières de valorisation des urines collectées à la source se développent, ainsi que la méthanisation des déchets et excréments solides.

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 de sensibilisation réduisent considérablement le gaspillage alimentaire.

Les pratiques de l'agriculture biologique se généralisent avec en matière d'azote, une généralisation du recours aux légumineuses, ce qui 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.

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

5.2.3 Une agriculture duale

Narratif. Les deux tendances antagonistes à l'œuvre respectivement dans les scénarios précédents, s'affrontent 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. La situation aboutit à un compromis consistant dans un partage du territoire entre espaces de développement économique spécialisé et espaces de protection (aires d'alimentation de captage d'eau potable, Parcs Naturels Régionaux...), dans lesquels sont expérimentés à des échelles territoriales divers modes alternatifs de produire et de consommer. Ces espaces 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 à l'échelle du bassin.

Ce scénario propose la coexistence de deux modèles d'agriculture aux développements diamétralement opposés

5.2.4 Et si rien n'avait été fait en matière de réglementation depuis 40 ans ? ou le retour aux années 80

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.

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 ferait l'objet de nombreuses dérogations.

C'est le scénario du pire qui permet d'apprécier en creux les effets des politiques environnementales mises en œuvre depuis 40 ans.

5.2.5 Le scénario Pristine

Un 5^{ème} scénario a été établi dans l'objectif de définir les niveaux 'naturels' de nutriments et d'estimer ce que pourrait être le fonctionnement des écosystèmes marins côtiers en l'absence de toute perturbation anthropique.

Il correspond à un bassin versant couvert entièrement de forêts, avec par conséquent les apports diffus correspondant à ceux attribués au milieu forestier non perturbé, et aux

apports directs de litière dans les cours d'eau. Le régime hydrologique est conservé identique à celui des années 2000, mais sans perturbations par les retenues ou les prélèvements.

Le scénario Pristine est donc construit autour de bassins versants exempts de toute action humaine. Il s'agit de mesurer à travers ce scénario un état de perturbation anthropique nulle.

5.3 Résultats de la modélisation des 5 scénarios

Les narratifs de ces scénarios ont été pris en compte par le modèle selon les hypothèses énoncées au Tableau 4.

Tableau 4 : Contraintes prises en compte par Seneque/Riverstrahler pour le calcul des flux de nutriments dans le bassin de la Seine et à l'exutoire à Poses. Les résultats à Poses alimentent le modèle Eco-Mars 3D de l'estuaire et de sa zone côtière.

Scénarios	Population et step	Régime alimentaire	Agriculture
1. Gd Paris	INSEE: Hypothèse haute de la population Le surcroît de la population est réparti sur l'axe Seine Step aux normes	Scénario de la Chambre Agri Normandie: Régime : 7.5 kgN/cap/an, 70% animal	Spécialisation : Gde culture dans le bassin parisien Elevage spécialisé en Normandie Polycult-élevage intensif à l'Est
2. Auto-Bio-Dem	INSEE: Hypothèse haute de la population Le surcroît de population actuelle de l'axe est redistribuée à l'amont du bassin au pro rata des populations actuelles Step aux normes Recyclage de l'urine : logements neuf construits en séparatif et ceux du tertiaire mis	Réduction gaspillage, distribution & consommation Régime demitarien : 40% de protéines animales	Pas d'intrant chimique Autonomie maximum des exploitations, le bétail est limité par la capacité à le nourrir localement
3. Agricult Duale	INSEE : Hypothèse haute de la population, répartition selon 1 Step aux normes	Régime du scénario 1	Dans les AAC et les PNR: Agriculture du scénario 2 Ailleurs : Agriculture du scénario 1
4. Si on avait rien fait	Population actuelle Step traitement minimum (B0)	Régime actuel: 7.3 kgN/cap/an, 65 % animal	Agriculture des années 1980 (sans raisonnement de la fertilisation, sans CIPAN)

L'ensemble des 4 scénarios prospectifs et le scénario Pristine ont été simulés pour la période 2011-2013 avec la chaîne de modélisation mise en place (GRAFS - Seneque/Riverstrahler – ECO MARS 3D). Ils sont comparés entre eux ainsi qu'avec la situation de référence actuelle.

5.3.1 Concentrations en nutriments dans le bassin de la Seine et l'estuaire pour la référence et les 5 scénarios

Les résultats de ces différents scénarios sont présentés du point de vue des concentrations en nitrate aux Figure 25 & Figure 26 par rapport à la situation de référence (2011-2013, années retenues pour les simulations avec le modèle EcoMars), respectivement en cartes de valeurs moyennes dans le réseau hydrographique (Figure 25), mais aussi en variations saisonnières de 2011 à 2013 à l'exutoire des principaux affluents de l'estuaire (Poses, Eure, et Risle) (Figure 26). Les effets sur les phosphates sont présentés en Annexe 7.

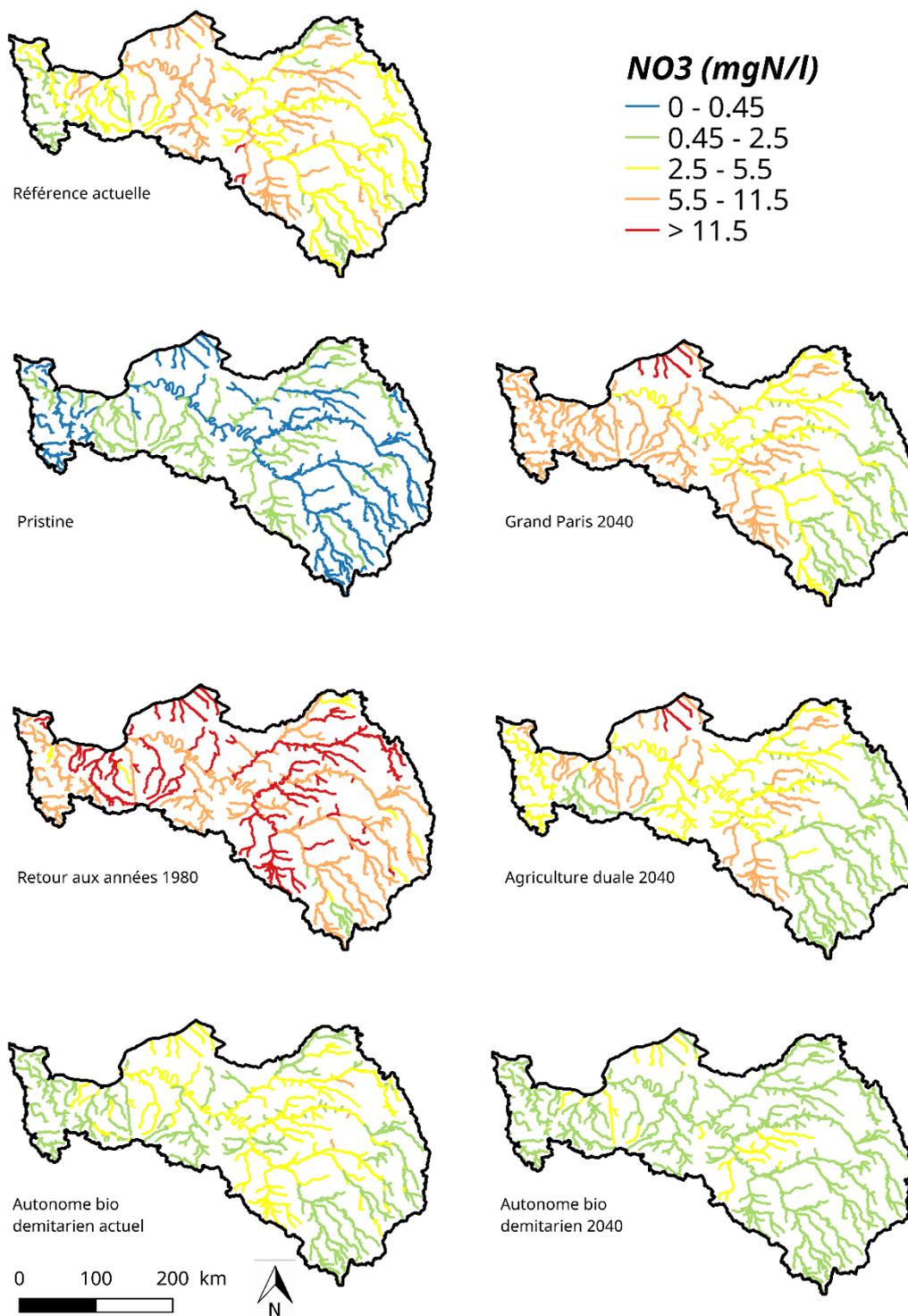


Figure 25 : Distribution spatiale des concentrations en nitrate dans les différentes situations explorées. Moyenne pour les années 2011 à 2013.

Il apparaît clairement que le retour aux années 1980 serait la pire des situations par rapport à la référence, alors que le scénario de changement radical du système agro-alimentaire serait le meilleur en termes de contamination nitrique (mis à part le scénario Pristine qui permet d'évaluer une différence maximale entre le bassin sans activité humaine et avec une activité humaine et ses pollutions non maîtrisées (Figure 25). Il est intéressant de

remarquer que le scénario du Grand Paris diminue la concentration en nitrate à des valeurs inférieures à celles de la référence pour la Seine à Poses (Figure 26) en raison de l'hypothèse choisie d'une mise aux normes les plus strictes du niveau d'épuration des eaux usées parisiennes ; l'option mixte 'duale' diminue la concentration en nitrate de l'eau à un niveau un peu au-dessous de celui du scénario Grand Paris sur la Seine. En revanche, pour l'Eure comme pour la Risle, la situation du Grand Paris détériore la qualité de l'eau en nitrate.

Les résultats de ces mêmes scénarios montrés à une échelle saisonnière aux exutoires de la Seine à Poses, à l'amont de l'estuaire et pour l'Eure et Risle (Figure 26), révèlent une saisonnalité des concentrations en nitrate beaucoup plus accentuée pour la Seine Amont et l'Eure que pour la Risle, en raison des différences entre ces bassins en ce qui concerne la distribution des zones humides riveraines responsables de la rétention riparienne (Billen et al., soumis Biogeochemistry).

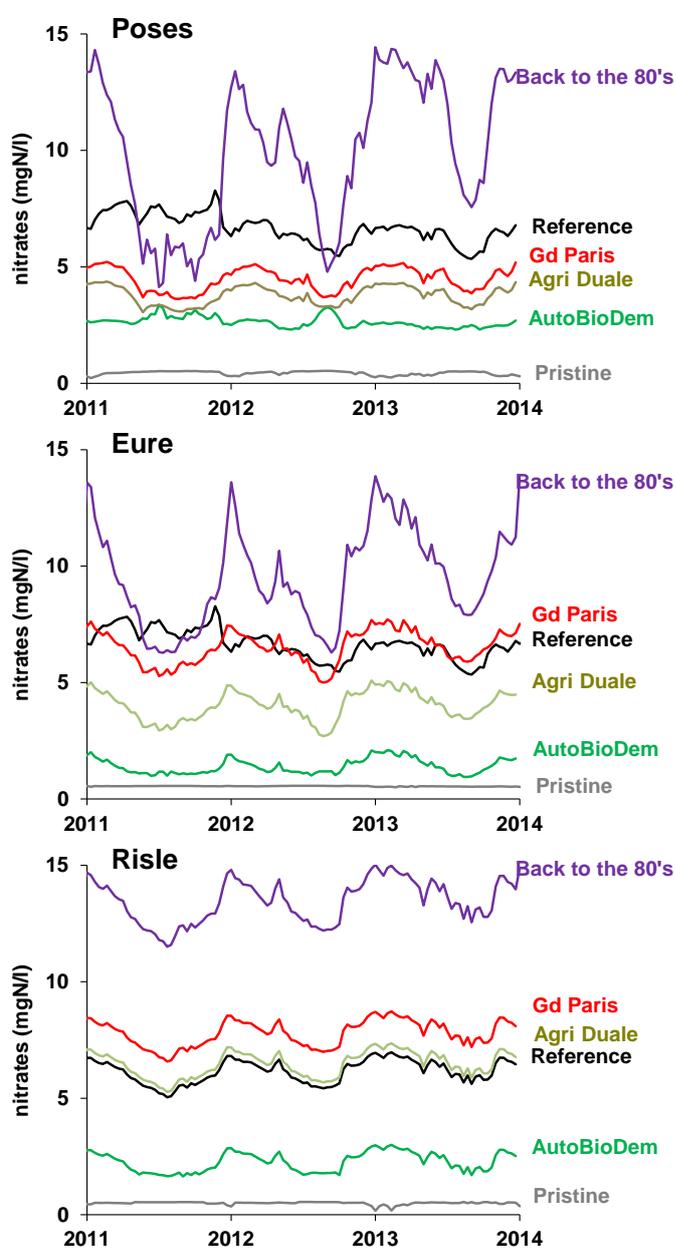


Figure 26 : Evolution sur la période de 2011 à 2013 des concentrations en nitrate pour les conditions de référence actuelles, et pour les différents scénarios, à l'exutoire de la Seine à Poses, de l'Eure et de la Risle.



Comme aux exutoires des rivières, le scénario retour aux années 1980 équivalait aussi la question «et si l'on n'avait rien fait ? » montre, dans l'estuaire (Caudebec et Tancarville) et à la zone côtière (bouée Seine), des concentrations en nitrate et phosphore total bien supérieures à celles de la référence (Figure 27), (Annexe 11).

En revanche, les concentrations en silice sont plus faibles que celles de la référence, un excès de N et P, contribuant à diminuer la silice par le prélèvement des diatomées, jusqu'à la limitation, les diatomées laissant place alors à des algues non siliceuses, parfois toxiques (Billen et Garnier, 2007 ; Passy et al., 2016).

D'une manière générale, en estuaire et à la zone côtière comme en rivières, c'est le scénario autonome-Bio-Demitarrien qui abaisse le plus les niveaux de nitrate et de phosphore, et qui permet à la silice de se maintenir à un niveau favorisant la croissance des diatomées. Les concentrations de ces différentes variables sont intermédiaires pour les scénarios Grand Paris et agriculture duale (Figure 27).

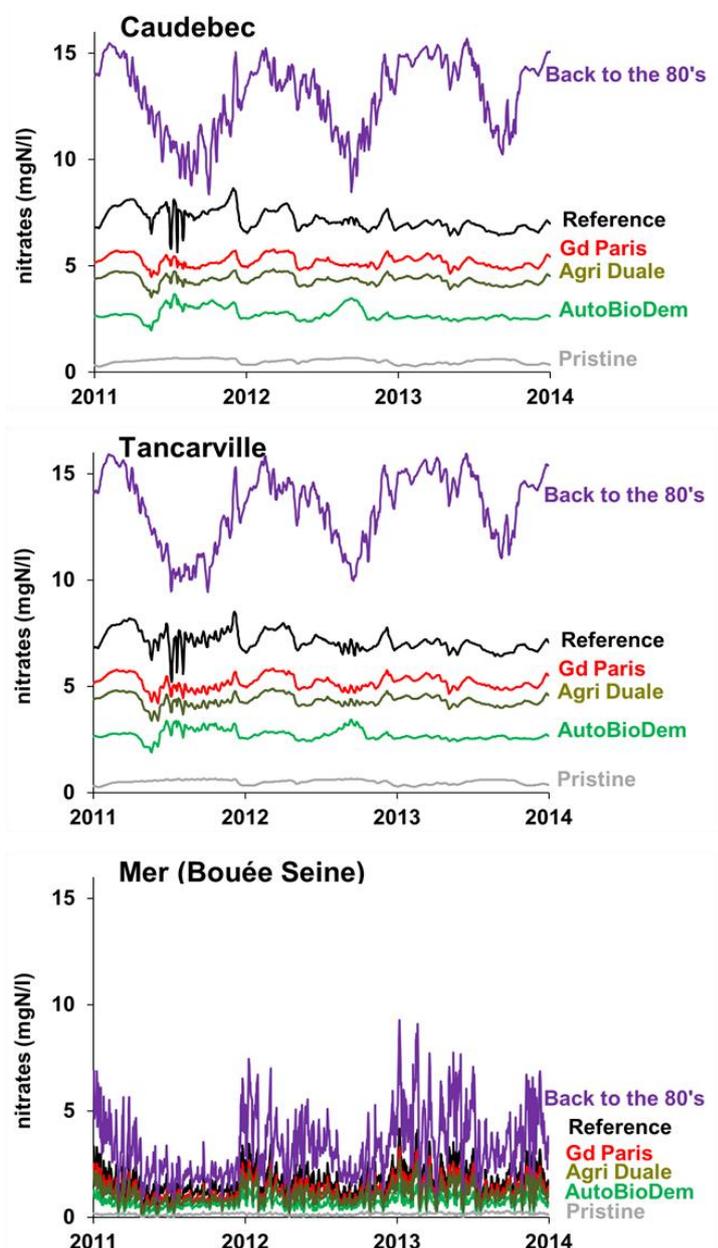


Figure 27 : Evolution sur la période de 2011 à 2013 des concentrations actuelles en nitrate pour les différents scénarios, dans l'estuaire à Caudebec et Tancarville et à la zone côtière.

5.3.2 Bilan des flux de nutriments dans l'estuaire pour les 5 scénarios et la référence

Les bilans entrée-sorties moyen de l'estuaire pour les 3 années 2011, 2012 et 2013, montrent une rétention d'environ 10% pour l'azote et la silice et de près de 30% pour le phosphore en situation de référence.

Les pourcentages de rétention en azote sont similaires pour tous les scénarios, sauf pour les conditions du Pristine avec une rétention de 10 % au lieu de 13%-14% pour les autres (Tableau 1 Tableau 5). Pour le phosphore, la rétention est maximale pour le scénario Pristine (51%), minimale pour la Référence (27%), et entre 27 et 35% pour les autres scénarios. La rétention en silice varie peu, entre 9% (Pristine), 11 % pour la référence et 12-13% pour les autres scénarios (Tableau 5; Figure 28), (Annexe 11).

Il est toutefois important de remarquer qu'une rétention très élevée pour le scénario Pristine, en phosphore par exemple, ne signifie pas une grande rétention en termes de flux (0.3 ktP an^{-1}), les flux d'entrée étant beaucoup plus faibles (Figure 29). La rétention pour le cas du scénario retour aux années 80 est de 2.8 ktP an^{-1} contre $0.5-0.6 \text{ ktP an}^{-1}$ pour les autres scénarios.

L'indicateur d'eutrophisation potentielle à la zone côtière (ICEP) a été calculé vis-à-vis de de l'azote et du phosphore et représente l'excès de ces deux nutriments par rapport à la silice, qui permet le développement des diatomées, considérées comme des espèces favorables à la chaîne trophique (Tableau 6). Avec une valeur positive, l'azote et/ou le phosphore en excès sont susceptibles de conduire à l'eutrophisation (Billen & Garnier, 2007). Cet indicateur est converti en unité carbone selon les rapports de Redfield pour la comparaison du N-ICEP et P-ICEP.

Les résultats sont très cohérents, car il n'existe aucun risque d'eutrophisation tant pour N que P en situation Pristine, alors qu'en cas de retour aux années 80s, le risque est maximum (Tableau 6).

Après une diminution des apports en P, le risque d'eutrophisation vis-à-vis du phosphore semble éliminé. En revanche l'azote reste systématiquement en excès, pour tous les scénarios : Référence > Grand Paris > Agriculture duale > Autonome-Bio-Demitarrien soit $20.9 > 14.1 > 10.9 > 4.5 \text{ kgC/km}^2/\text{j}$.

Scénarios		Filtre estuarien : Poses-Le Havre		
		NTOT	PTOT	SITOT
Référence	2011	-11%	-25%	-6%
	2012	-10%	-23%	-9%
	2013	-17%	-34%	-17%
	m	-13%	-27%	-11%
Grand Paris 2040	2011	-11%	-30%	-9%
	2012	-11%	-38%	-11%
	2013	-17%	-43%	-18%
	m	-13%	-37%	-13%
Agriculture duale	2011	-11%	-29%	-9%
	2012	-13%	-44%	-13%
	2013	-17%	-41%	-18%
	m	-14%	-38%	-13%
Autonome-Bio-Demitarrien	2011	-11%	-31%	-8%
	2012	-12%	-33%	-12%
	2013	-15%	-23%	-15%
	m	-13%	-29%	-12%
Retour aux années 80's	2011	-13%	-35%	-6%
	2012	-10%	-29%	-8%
	2013	-17%	-39%	-17%
	m	-13%	-35%	-10%
Pristine	2011	-9%	-48%	-5%
	2012	-6%	-48%	-6%
	2013	-16%	-56%	-17%
	m	-10%	-51%	-9%

Tableau 5 : Bilans comparatifs des flux de nutriments (N, P, Si) entrant à Poses et par les affluents et du flux sortant au Havre, exprimé en % des flux entrant pour les 5 scénarios et la référence. Moyenne pour les années 2011, 2012 et 2013.



Figure 28 : Pourcentages de rétention dans l'estuaire (Paris-Le Havre) en moyennes annuelles pour chacune des 3 années (2011, 2012 et 2013) et pour les scénarios, ainsi que pour la situation de référence. De haut en bas : Azote total, Phosphore total et Silice totale (silice dissoute + silice contenue dans les frustules de diatomés).

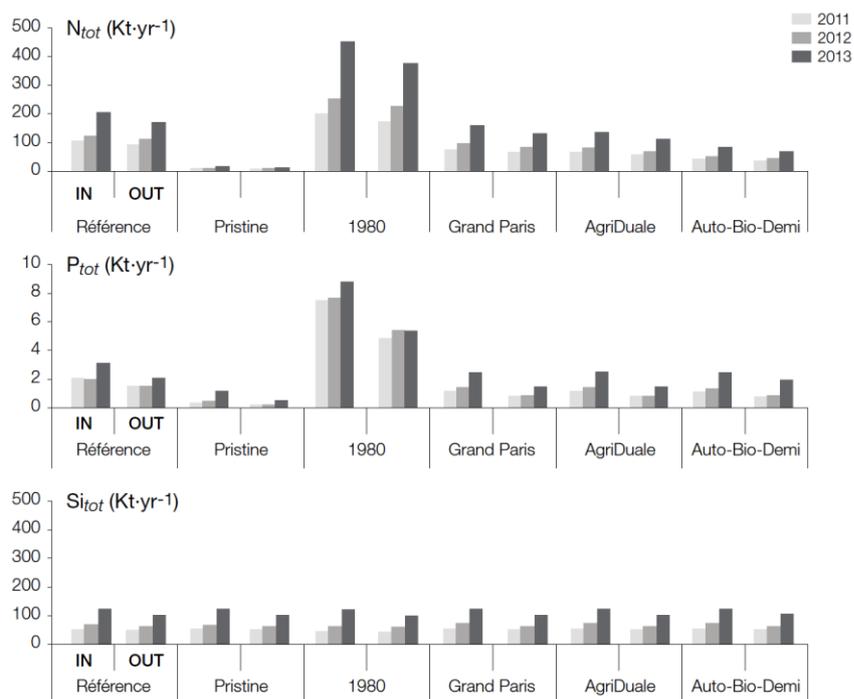


Figure 29 : Bilan des rétentions exprimées en valeurs absolues pour l'azote total, le phosphore total et la silice totale, dans l'estuaire de Poses au Havre pour les 3 années caractéristiques.

Tableau 6 : Valeurs de l'indicateur d'eutrophisation potentielle (ICEP) vis-à-vis de l'azote et du phosphore pour chacune des 3 années, ainsi que la moyenne des 3 années, pour les scénarios, incluant la référence.

Scénarios		Le Havre	
		N-ICEP kgC/km ² /j	P-ICEP kgC/km ² /j
Référence	2011	15.9	-1.7
	2012	18.7	-3.0
	2013	28.2	-5.5
	m	20.9	-3.4
Grand Paris 2040	2011	10.1	-2.9
	2012	12.5	-4.1
	2013	19.7	-6.5
	m	14.1	-4.5
Agriculture duale	2011	8.0	-2.9
	2012	9.6	-4.1
	2013	15.2	-6.5
	m	10.9	-4.5
Autonome-Bio-Demitarrien	2011	3.5	-3.1
	2012	3.9	-4.0
	2013	6.0	-6.1
	m	4.5	-4.4
Retour aux années 80's	2011	34.1	4.0
	2012	44.1	3.5
	2013	73.0	-0.2
	m	50.4	2.5
Pristine	2011	-3.0	-4.1
	2012	-3.6	-5.1
	2013	-6.1	-7.9
	m	-4.2	-5.7

5.3.3 Influence des 5 scénarios sur la dynamique du phytoplancton en milieu marin

Les différences d'exports de nutriments depuis l'estuaire vers le milieu marin sont contrastées pour les divers scénarios et affectent la dynamique du phytoplancton en Baie de Seine de manière variable.

Les résultats des simulations de la biomasse des diatomées (Figure 30) montrent qu'en moyenne annuelle les blooms algaux atteignent les concentrations les plus importantes en situation de référence, à proximité de l'estuaire. Les deux scénarios -Grand Paris, et agriculture biologique autonome- montrent en revanche des concentrations moyennes de diatomées moindres que pour la situation de référence actuelle.

Les biomasses sont les plus faibles pour le scénario Autonome-Bio-Demitarrien, le plus en rupture avec la situation actuelle. La comparaison de la situation de référence avec la condition Pristine, permet de mesurer clairement l'impact actuel de l'activité anthropique (Figure 30).

Les dinoflagellés avec une biomasse bien plus faible que celle des diatomées peuvent provoquer des nuisances par leur toxicité (présence possible de Dinophysis). Elles apparaissent en général quand la silice a été consommée par les diatomées et que celle-ci devient limitante. De nouveau la comparaison entre la situation de référence et le scénario Pristine permet de mesurer l'impact de l'activité humaine (Figure 31).

Diatomées, moyenne annuelle

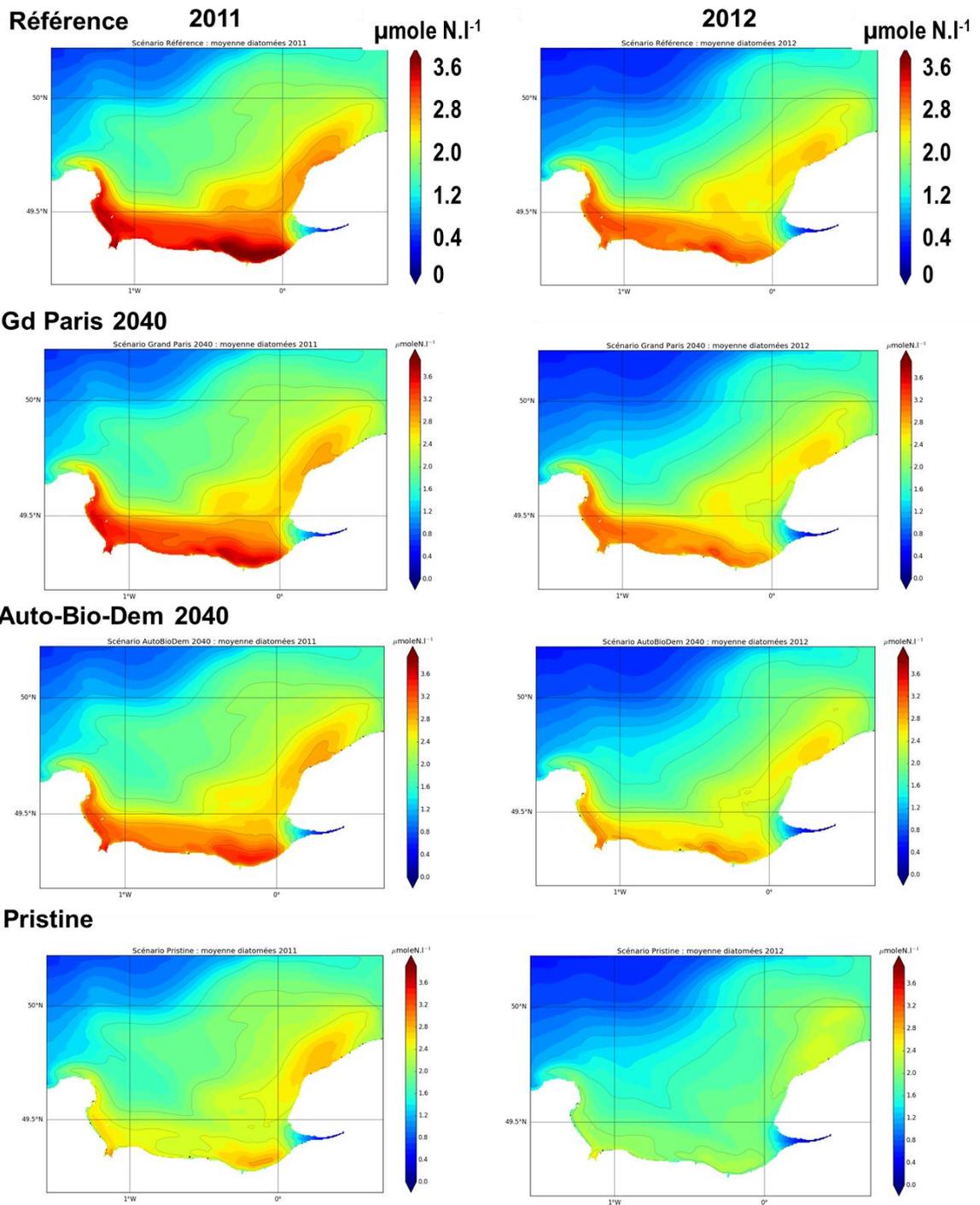


Figure 30 : Cartographie des biomasses moyennes (en $\mu\text{mole. l}^{-1}$) des diatomées simulées en Baie de Seine pour les 3 scénarios comparés à la référence, en moyenne annuelle pour les années 2011 et 2012

Dinoflagellés, moyenne annuelle

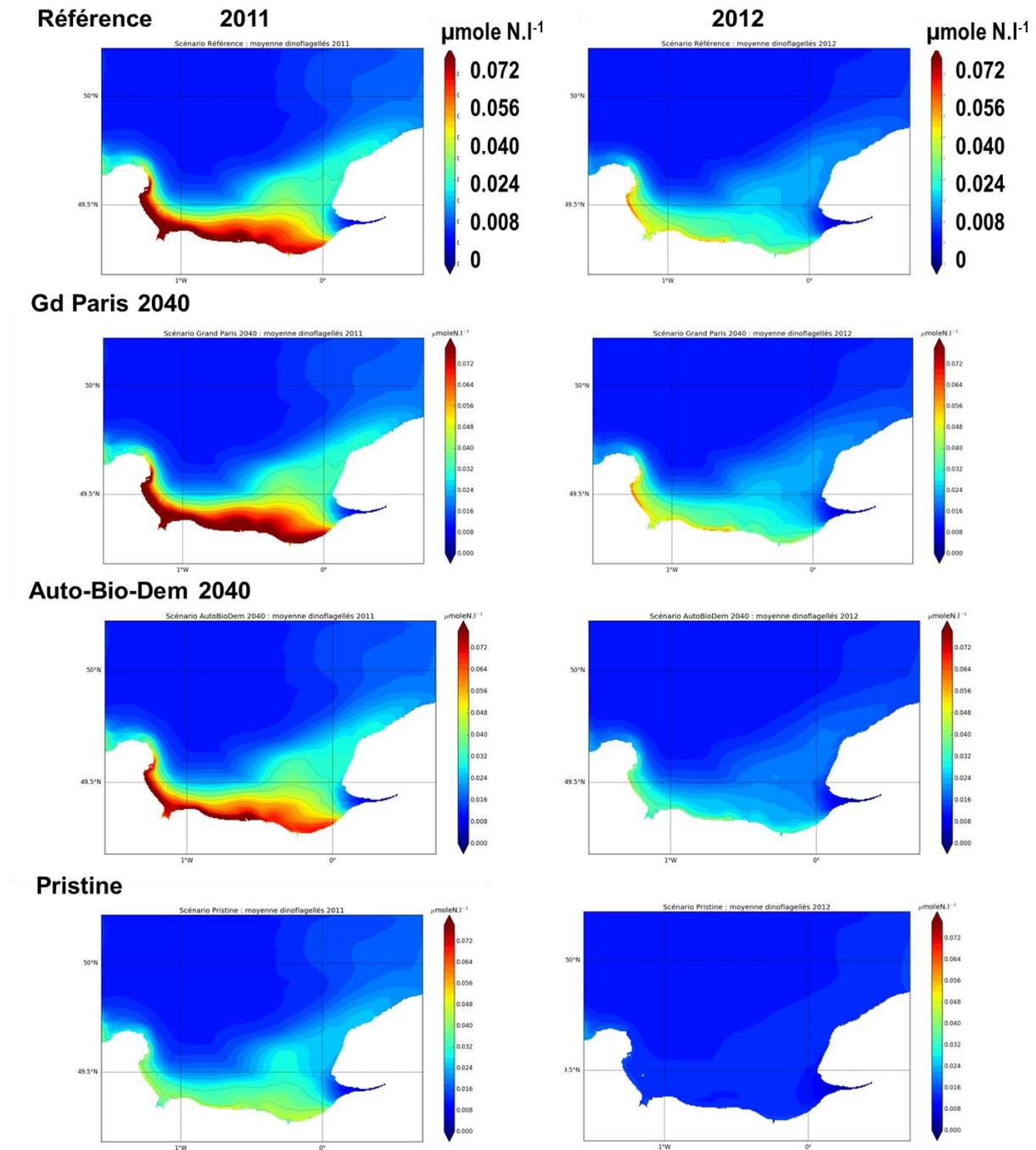


Figure 31 : Cartographie des biomasses moyennes de dinoflagellés (en $\mu\text{mole. l}^{-1}$) simulées en Baie de Seine pour 3 scénarios comparés à la référence, en moyenne annuelle pour les années 2011 et 2012

La situation de référence met ainsi en évidence des concentrations importantes en dinoflagellés, et leur toxicité observée de manière récurrente en Baie de Seine conduit à des interdictions de pêche, particulièrement en ce qui concerne les mollusques filtreurs. Le phénomène de toxicité, observé de façon plus prégnante pour les années récentes que pour les années 1980, pourrait s'expliquer par un déséquilibre nutritionnel, l'augmentation du rapport N/P étant plus lié tant à l'augmentation des flux d'azote, qu'à la réduction du flux de phosphore. Cette tendance au développement des dinoflagellés diminue néanmoins pour les

scénarios du Grand Paris, et plus encore pour le scénario Autonome-Bio-Demitarrien, qui ne permet toutefois pas d'écarter le risque d'efflorescences toxiques, même s'il est réduit.

Les cartes des maximums annuels des deux années, conduisent aux mêmes conclusions qu'il s'agisse des dinoflagellés ou des diatomées (Figure 32 & Figure 33). A noter toutefois que les maximums de biomasse des diatomées représentent environ 2.5 fois les moyennes annuelles et les différences sont d'un facteur 6 pour les dinoflagellés. On remarquera aussi que lors des blooms, les diatomées mais aussi les dinoflagellés augmentent leur distribution spatiale dans la baie de Seine.

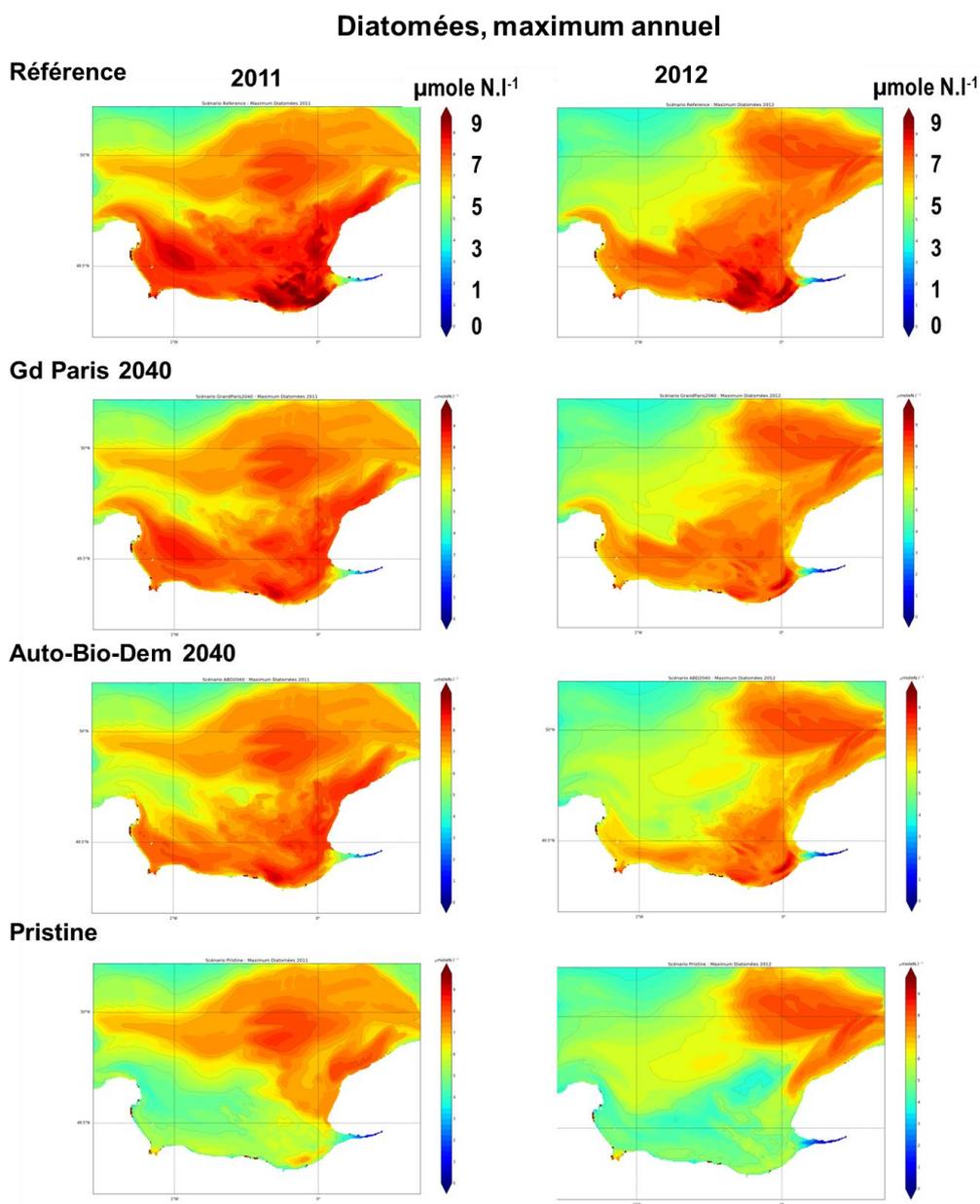


Figure 32 : Cartographie des biomasses maximales de diatomées (en µmole. l-1) simulées en Baie de Seine pour 3 scénarios comparés à la référence, en moyenne annuelle pour les années 2011 et 2012

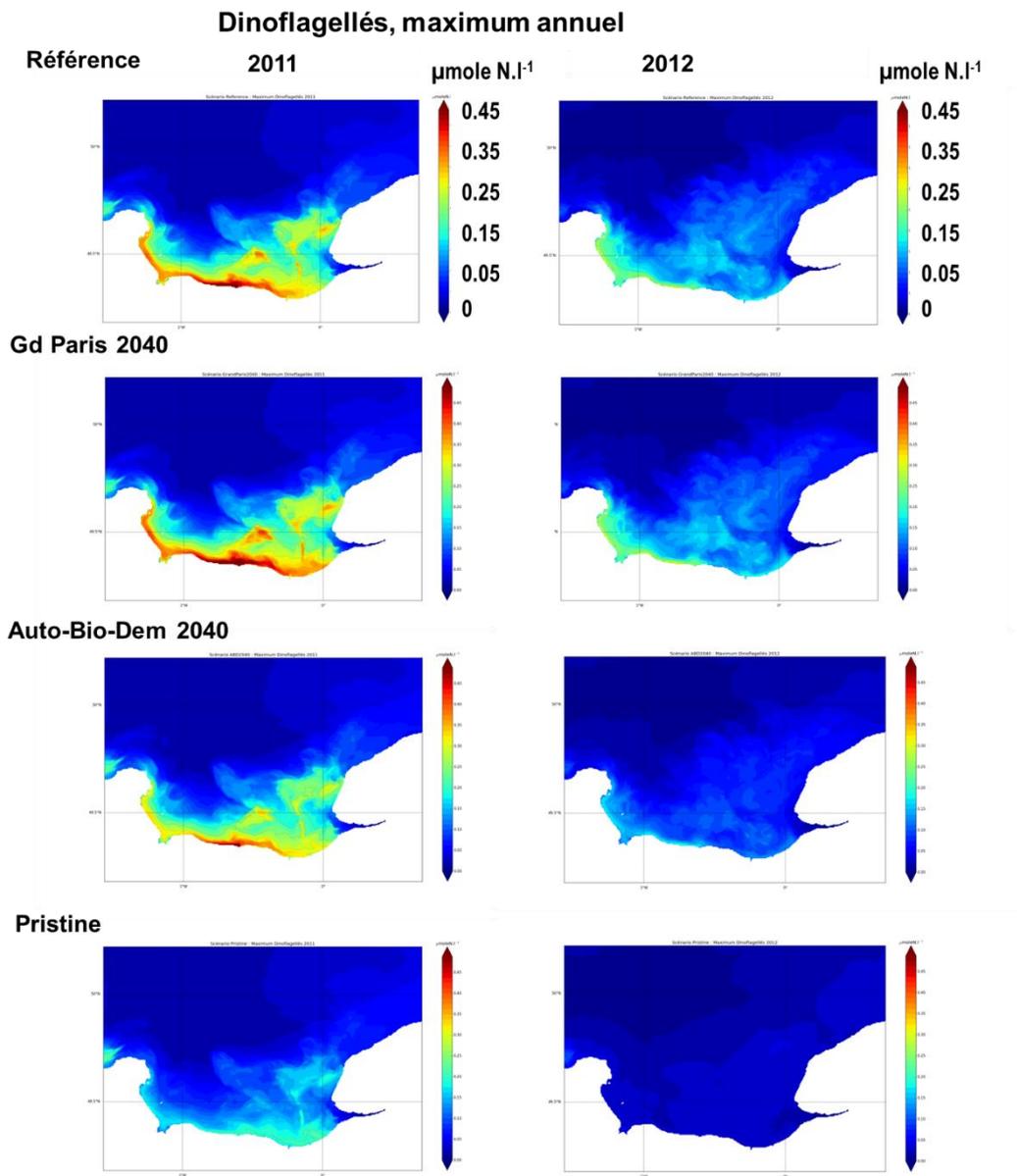


Figure 33 : Cartographie des biomasses maximales de dinoflagellés (en $\mu\text{mole. l}^{-1}$) simulées en Baie de Seine pour 3 scénarios comparés à la référence, en moyenne annuelle pour les années 2011 et 2012

Conclusion

La reconstitution de la trajectoire hydro-agro-alimentaire de la région Normandie, à cause des interactions qu'entretient ce territoire avec ses voisins (Ile de France, Bretagne, Hauts de France), se devait d'être étendue à une échelle plus large, englobant l'ensemble du bassin Parisien et nécessitant de mobiliser l'analyse de statistiques à l'échelle nationale (SITRAM, AGRESTE). Si l'impact de l'agglomération parisienne à travers les effluents qu'elle déverse dans la Basse Seine, avec les détériorations de la qualité de l'eau qui en résultent étaient bien connus, les interactions du système agroalimentaire Normand dans un contexte de marchés nationaux et internationaux n'avaient pas encore été étudiées. En outre, l'étude prévue sur 4-5 décennies, période pendant lesquelles les données sont disponibles sous forme de bases de données numérisées, a été élargie temporellement jusqu'au début du XX^{ème} siècle voire jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, par l'étude d'archives. Le projet RESET était donc ambitieux et novateur.

Avec la construction inédite d'une chaîne de modélisation : GRAFS- Riverstrahler- EcoMars3D estuaire- EcoMars3D-Zone côtière, permettant de quantifier les flux d'eau et de nutriments sur les problèmes d'eutrophisation côtière, le projet RESET était un projet à risques. Le défi de relier la reconstitution du métabolisme territorial historique à la qualité de l'eau a été pleinement relevé grâce au développement de cette chaîne de modélisation. Par contre, la reconstitution passée du fonctionnement hydro-morpho-écologique de la Seine, n'a pas pu être réalisée, faute d'un modèle hydro-sédimentaire déjà calé sur les morphologies du siècle passé dans un contexte d'aménagement portuaire continu et soutenu. Même sans cela, cette chaîne de modélisation n'en a pas moins nécessité d'importants développements numériques du modèle Eco-Mars 3D pour en permettre l'application à l'estuaire de Seine avec une résolution spatiale suffisante et permettre la simulation de la qualité de l'eau pour une période de référence actuelle pluriannuelle (2010-2014). Ce développement nous a permis d'évaluer le rôle filtre de l'estuaire vis-à-vis de l'azote, relativement faible (13% en moyenne, dans les conditions actuelles dites de référence). Un effet bénéfique est attendu en réduisant à la source le flux d'azote pour le contrôle de l'eutrophisation côtière, caractérisée par le développement des dinoflagellés potentiellement toxiques. Dans ces conditions le flux de phosphore est peu affecté et le développement des diatomées à la base du réseau trophique est maintenu (Cugier et al., 2005b ; Lancelot et al., 2011 ; Passy et al., 2016). Notons que la résolution spatiale des outils développés ne permet pas leur utilisation pour évaluer l'effet d'éventuelles opérations de restauration des zones humides ripariennes ou de vasières. On peut toutefois s'attendre à ce que tels milieux augmentent le rôle filtre de l'estuaire, quand le temps de renouvellement des eaux sur ces surfaces réactives est suffisamment court pour fournir des nutriments et quand le temps de contact est suffisamment long pour la réalisation des processus physico-chimiques (P : e.g., adsorption/désorption), biologiques et microbiologiques (N : e.g. dénitrification ; C : e.g. minéralisation ; Si : dissolution)

La reconstruction des trajectoires du passé, a permis d'identifier deux régimes socio-écologiques en Normandie.

Déjà avant 1960 se produit une certaine spécialisation régionale des cycles biogéochimiques agricoles dans un contexte de dépopulation locale et de croissance des besoins de la capitale. L'analyse du système agro-alimentaire de 1929 montre en effet que la Seine Maritime est un département où les transformations de produits agro-alimentaires sont

importantes, associées à des flux d'imports et d'exports que l'on pense déjà élevés. Les autres départements, même si les débouchés restent locaux, révèlent déjà des spécificités dans leurs exportations (Eure : produits végétaux ; Manche : produits animaux). A cette époque, la valorisation des excreta urbains est progressivement abandonnée de sorte que les rejets domestiques des villes, et en particulier de l'agglomération parisienne, atteignent les eaux de surface (Barles, 2005). Avant 1960, la collecte n'est pas encore généralisée de sorte que si certaines petites rivières urbaines sont fortement polluées, la qualité de l'eau du Grand Axe Seine reste dans la gamme du bon état écologique (en termes de nutriments responsables de l'eutrophisation).

Un second régime socio-écologique monte en puissance à partir des années 1960 ; il est marqué par l'industrialisation, la spécialisation et l'internationalisation de l'agriculture normande, la sectorisation des activités, l'essor de la grande distribution qui accroît la distance entre consommateurs et producteurs et favorise la déterritorialisation de l'alimentation. Les exploitations augmentent en taille, les travaux des champs se mécanisent, l'utilisation de fertilisants de synthèse augmente. L'impact des villes sur la qualité de l'eau s'accroît avec une collecte des eaux usées qui se développe alors que les traitements en stations d'épuration ne suivent pas (Mouchel et al., 1998 ; Billen et al., 2001). Il s'y ajoute désormais les pollutions agricoles, les concentrations en nitrate augmentent régulièrement de 7% par an jusqu'à la fin des années 2000. La législation environnementale (DCE, EU-WFD, 2000) ne permet pas d'endiguer ce processus, bien qu'elle conduise à une réduction assez spectaculaire des impacts urbains, conduisant à une réduction de la contamination ammoniacale et phosphatée, et une amélioration de l'oxygénation dans l'estuaire. La législation environnementale permet le maintien du régime en place par la correction de ses externalités négatives. La Directive Nitrate (EU-Nitrate Directive, 1991) n'a, en revanche, pas eu d'effet significatif sur la contamination nitrique des eaux de surface, ni des eaux souterraines destinées à la fabrication de l'eau potable. A la zone côtière, l'augmentation des concentrations en nitrate et la diminution des teneurs en phosphates, ont accentué le déséquilibre nutritionnel des algues (Billen & Garnier, 2007) responsable, en Baie de Seine, d'épisodes toxiques (Cugier et al., 2005b ; Passy et al., 2016).

Il n'est pas possible d'évaluer aujourd'hui l'effet des signaux faibles détectés depuis quelques années. Il semble pourtant que les concentrations en nitrate cessent d'augmenter depuis la fin des années 2000. Cette tendance, que l'on peut attribuer tant aux réglementations (bandes enherbées, implantation d'intercultures et conseils de fertilisation), qu'à la volonté des agriculteurs de réduire les coûts de production et de protéger leur santé, peut aussi dépendre de l'hydrologie, ce qui nécessite des observations sur un plus long terme. Par certains aspects, ces signaux faibles semblent témoigner d'une ébauche de transition socio-écologique, mais rien ne dit que ces niches d'innovation (voire de contestation) conduiront à de nouvelles tendances, voire à des bifurcations.

Nous avons résumé, dans la frise chronologique (Figure 15), un ensemble d'évolutions et de transformations du système agro-alimentaire au cours de cette période en regard des faits marquants en termes de politiques sectorielles structurantes et de traitements des eaux usées dans les stations d'épuration. Bien que les faits marquants ne soient pas exhaustifs, nous montrons que les périodes clé de l'évolution de la qualité de l'eau de la Basse Seine jusqu'à son estuaire sont en phase avec les changements de la chaîne agro-alimentaire.

La reconstruction par le projet RESET des trajectoires du passé devait aussi constituer un socle de connaissance pour l'élaboration de scénarios prospectifs. Cette approche prospective a non seulement mobilisé l'ensemble du consortium RESET aux compétences disciplinaires variées, mais également d'autres partenaires, acteurs ou scientifiques dans le bassin de la Seine et du territoire estuarien de Normandie. RESET a aussi constitué un support de dialogue pédagogique pour l'interdisciplinarité, en y faisant participer des formations Universitaires (Niveau M2 de l'UPMC et de Paris-Créteil).

En perspectives, il reste à court terme à valoriser les travaux réalisés, tant par des publications scientifiques que par des interventions auprès des acteurs. A moyen terme l'analyse du système agro-alimentaire, réalisé dans le cadre de RESET pourrait être étendue aux flux de phosphore, carbone et d'énergie et la trajectoire du système agroalimentaire élargie au système industriel avec une même approche d'écologie territoriale. Il reste encore des vérifications à effectuer sur la modélisation de l'impact de certains scénarios sur le milieu marin (le retour aux années 80 notamment) qui n'était pas le cœur de ce projet focalisé sur l'estuaire (cf. Annexe 11). A plus long terme, la chaîne de modélisation devrait pouvoir prendre en compte des scénarios climatiques qui pourraient être croisés avec le fonctionnement biogéochimique.

BIBLIOGRAPHIE

- Agreste Basse-Normandie, 2012. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R1112C02.pdf>
- Anglade J. (2015). Agriculture biologique, qualité de l'eau et gouvernance. Ph-D Univ. Paris 6 (UPMC), ED " Géosciences et Ressources Naturelles". 286pp + annexes
- Attali J. (2010). Paris et la mer. La Seine est capitale. Ed. Fayard. 193 p.
- Barles S. 2005. L'invention des déchets urbains. France, 1790-1970. Seyssel, Champ Vallon.
- Barles S. (2010). Society, Energy and Materials: What are the Contributions of Industrial Ecology, Territorial Ecology and Urban Metabolism to Sustainable Urban Development Issues? *Journal of Environmental Planning and Management*, 53(4): 439-455.
- Barles S. (2015). The Main Characteristics of Urban Socio-Ecological Trajectories: Paris (France) from the 18th to the 20th Century. *Ecological Economics* 118, p. 177-185.
- Barles S., Bognon S., 2010. Synthèse de l'enquête sur la provenance des produits alimentaires consommés en ville. In : Rapport de recherche pour le projet ANR CONFLUENT. Champs-sur-Marne, LATTIS.
- 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>
- Beyer A. (2015). Le transport fluvial, élément-clé de compétitivité de la filière européenne du blé. Le cas du Bassin parisien. *Le Déméter*, n° 22 p. 281-301.
- Billen G., J. Garnier, P. Hanset (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks - the Riverstrahler model applied to the Seine River system. *Hydrobiologia* 289: 119-137.
- Billen G., Garnier J., Berthe T. Servais P. Brion N., Ficht A., Even S., Poulin M. (1999). L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbologique. Programme SEINE AVAL, fascicule N°5 (Billen G. & Poulin M. coordinateurs), IFREMER & Région Hte Normandie, Eds. ISBN 2-84433-030-4. 30 p.
- Billen G., Garnier, J. (2000). Nitrogen transfers through the Seine drainage network: a budget based on the application of the 'Riverstrahler' model. *Hydrobiologia* 410, 139-150.
- Billen G., Garnier J., Ficht A., Cun C. (2001). Modelling the response of water quality in the Seine Estuary to human activity in its watershed over the last 50 years. *Estuaries*, 24(6) : 977-993.
- Billen, G., Garnier, J. (2007). River basin nutrient delivery to the coastal sea: assessing its potential to sustain new production of non siliceous algae. *Mar. Chem*, 106: 148-160. doi: 10.1016/j.marchem.2006.12.017
- Billen G., Garnier, J., Lassaletta L. (2013). Modelling the nitrogen cascade from watershed soils to the sea: from regional to global scales. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2013 368, 20130123. DOI: 10.1098/rstb.2013.0123
- Bréchet A. 1924. Hygiène publique et industrielle. Paris.
- Brenon I., Le Hir, P., 1999. Simulation du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Seine: capacité et limites d'un modèle bidimensionnel horizontal. *CR Acad Sci II A* 328, 327–332.
- Budget des familles 2006. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/s1339>.
- Budget des familles 2011. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/s1340>

- CA, Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie (2006). 2020 : Que mangerons-nous? www.normandie.chambagri.fr/eco_prosp.asp
- CCI de Rouen. S. d. Le grand port maritime de Rouen. www.rouen.cci.fr/grandrouen/fr/pdf/FR_TR_trafic_maritime_port_Rouen.pdf
- Concato F., Thuillier J.-P., 1980. La pénétration étrangère dans l'industrie haut-normande. *Études normandes*, vol. 1980, n° 3, p. 5-23.
- Cugier P., and P. Le Hir. 2002. Development of a 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River (France). *Estuarine Coastal Shelf Sci* 55: 673-695.
- Cugier P., A. Menesguen, J. F. Guillaud. 2005a. Three-dimensional (3D) ecological modelling of the Bay of Seine (English Channel, France). *J Sea Res* 54: 104-124.
- Cugier P., Billen, G., Guillaud, J.F., Garnier, J., Ménesguen, A.(2005b). Modelling the eutrophication of the Seine Bight (France) under historical, present and future riverine nutrient loading. *Journal of Hydrology* 304, 381-396.
- Cugier P., C. Struski, M. Blanchard, J. Mazurie, S. Pouvreau, F. Olivier, J. R. Trigui, E. Thiebaut (2010). Assessing the role of benthic filter feeders on phytoplankton production in a shellfish farming site: Mont Saint Michel Bay, France, *J Mar Syst*, 82(1-2), 21-34.
- Dionnet M.-C. (1987). Évolution de la production de camembert en France, *in Histoire et géographie des fromages : actes du colloque de géographie historique*, Caen, 1985, Centre de recherches sur l'évolution de la vie rurale, Caen : Université de Caen, p. 109-117.
- Direction régionale de l'Agriculture et de la Forêt de Haute Normandie, 2013. *Atlas agricole et rural de Haute-Normandie. L'agriculture et le monde rural en cartes et en chiffres*. Rouen, Agreste Haute-Normandie.
- 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.
- Dupont, J.P. (2001). Matériaux fins: le cheminement des particules en suspension. Éditions Quae, Rouen.
- EU-Nitrate Directive, 1991. Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources OJ L 375, 31.12.1991, 1–8.
- EU-WWTD (Urban wastewater treatment Directive), 1991. 91/271/CEE du Conseil, du 21 mai 1991, relative au traitement des eaux urbaines résiduaires. JO L 135 du 30.5.1991, pp. 40e52.
- EU-WFD (Water Framework Directive), 2000. OJ L327/1, 22.12, pp. 1–72.
- Fischer-Kowalski M., Rotmans, J. (2009). Conceptualizing, observing, and influencing socio-ecological transitions. *Ecol. Soc.* 14, 3.
- Foulquier E. (2015). « Transport maritime sous régime de froid. Mondialisation des circulations des marchandises périssables », *Le Déméter*, n° 22, p. 259-279.
- Frémont A. (1957). « L'agriculture dans la partie occidentale du pays de Caux (région du Havre) », *Études normandes*, vol. 22, n° 1, p. 157-184.

- Garnier J., Billen G., Coste M. (1995). Seasonal succession of diatoms and Chlorophyceae in the drainage network of the river Seine: Observations and modelling. *Limnol. Oceanogr.* 40: 750-765.
- Garnier J., Servais P., Billen G., Akopian M. & Brion N. (2001). The oxygen budget in the Seine estuary: balance between photosynthesis and degradation of organic matter. *Estuaries* 24(6) : 964-977.
- Garnier J., Billen G., Hannon E., Fonbonne S., Videnina Y., Soulie M. (2002). Modeling transfer and retention of nutrients in the drainage network of the Danube River. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 54: 285-308.
- Garnier J., G. Billen, A. Cébron (2007). Modelling nitrogen transformations in the lower Seine river and estuary (France): impact of wastewater release on oxygenation and N₂O emission. *Hydrobiologia*, 588: 291-302.
- Garnier J., G. Billen, S. Even, H. Etcheber, P. Servais (2008). Organic matter dynamics and budgets in the maximum turbidity zone of the Seine Estuary (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 77 : 150-162. doi:10.1016/j.ecss.2007.09.019
- Garnier J., Billen G., Némery J., Sebilo M. (2010). Transformations of nutrients (N, P, Si) in the turbidity maximum zone of the Seine estuary and export to the sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (2010), 90: 129-141. doi:10.1016/j.ecss.2010.07.012.
- Garnier J., Le Gendre R., Passy P., Paris F., Billen G., Callens J., Cugier Ph., Tronquart O., Romero E., Nedelec F., Riou Ph., Mercier B., Martinez A., Amsaleg C., Laverman A. (2012). Nutrient Export Role on Eutrophication. Indicators and model scenarios. RA de fin de projet NEREIS (2010-2011), Seine-Aval, 47p.
- 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
- Grasso F., Verney R., Le Hir P., Thouvenin B., Schulz E., Kervella Y., Khojasteh Pour Fard I., Lemoine J.-P., Dumas F., Garnier V. (soumis) Suspended sediment dynamics in the macrotidal Seine estuary 1 (France) - Part 1: In situ measurement analysis and numerical modeling of turbidity maximum dynamics. *Journal of Geophysical Research*
- HAROPA (2015). Projets stratégiques HAROPA 2030. http://www.haropaports.com/projets_strategiques/
- Hill A.R., Shabaga J.A. (2010). Groundwater-fed surface flow path hydrodynamics and nitrate removal in three riparian zones in southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology* 388, 52 – 64.
- INSEE (1983). Recensement général de la population de 1982. Composition communale des unités urbaines. Paris, Imprimerie nationale.
- INSEE (1990). Annuaire rétrospectif de la France. Séries longues. 1948-1988. Paris, Imprimerie nationale.
- Joulot A. (1946). Les ordures ménagères : Composition, collecte, évacuation, traitement. Paris.
- 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., Souchere, 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), pp. 60.

- Lachiver M. (1959). « Le Havre, port importateur de coton et de café », *Études normandes*, n° 116, p. 225-243.
- Lamine C. (2008). Les AMAP : un nouveau pacte entre les producteurs et les consommateurs. Gap : Y. Michel, 163 p.
- Lamblin V., Theys J. (2003). Radioscopie de la France en mutation, 1950-2030. Rapport pour le compte du ministère de l'Équipement. Paris, Futuribles.
- Lancelot C, Thieu V., Polard A., Garnier J., Billen G., Hecq W., Gypens N. (2011). Ecological and economic effectiveness of nutrient reduction policies on coastal Phaeocystis colony blooms in the Southern North Sea: an integrated modeling approach. *Sciences of the Total Environment* 409: 2179–2191. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.02.023.
- Laroque L. (2001). Le ravitaillement des Havrais de 1939 à 1949. Mémoire de Maîtrise d'Histoire Contemporaine, Lenemorel A. (dir.) Université du Havre.
- 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.
- Lazure P., Dumas F. (2008). An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 31: 233-250.
- Le Hir, P., F. Cayocca, Waeles B. (2011). Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modelling strategy. *Cont Shelf Res* 31: S135-S149.
- Lemarchand N. (1992). Commerce et structure urbaine. Thèse de doctorat, Université de Rouen.
- Le Noë J., Billen G., Garnier J. (2017). Nitrogen, phosphorus and carbon fluxes through the French Agro-Food System: an application of the GRAFS approach at the territorial scale. *Sci. Tot. Env.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.040>
- Malassis L. (1973). Économie agro-alimentaire, tome 1. Économie de la consommation et de la production agro-alimentaire. Paris : Cujas, 437 p.
- Mazoyer, M., Roudart, L. (1997). Histoires des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine. Paris, Seuil.
- Ministère de l'Agriculture (1936). Statistique agricole de la France. Résultats généraux de l'enquête de 1929. Paris, Imprimerie nationale.
- Ministère de l'Agriculture (1938). Statistique agricole de la France. Annexe à l'enquête de 1929. Monographie départementale du département du Calvados. Paris, Imprimerie nationale.
- Muller C. (1972). Les marchés de gros de consommation de fruits et légumes en Normandie. *Norois*, vol. 73, n° 1, p. 47-65.
- Mouchel J-M, Boët P, Hubert G, Guerrini M-C (1998) Un Bassin et des Hommes. Une histoire tourmentée. Chapitre 16. In: De Marsily D, Fustec E, Meybeck M (eds) La Seine en son bassin Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Elsevier, Paris, pp 77–125.
- Passy, P., R. Le Gendre, J. Garnier, P. Cugier, J. Callens, F. Paris, G. Billen, P. Riou, E. Romero (2016), Eutrophication modelling chain for improved management strategies to prevent algal blooms in the Bay of Seine, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 543, 107-125.
- Rastoin J.-L., Bouquery J.-M. (dir.) (2012). Les industries agroalimentaires en France. Paris, La Documentation Française.

- Regnier P., S. Arndt, N. Goossens, C. Volta, G. Laruelle, R. Lauerwald, J. Hartmann (2013). Modelling Estuarine Biogeochemical Dynamics: From the Local to the Global Scale. *Aquat Geochem* (2013) 19:591–626. DOI 10.1007/s10498-013-9218-3
- Poux X, J.-B. Nancy, V. Chenat (2005). Agriculture et environnement : 4 scénarios à l'horizon 2025. Animation méthodologique ASCA. Groupe de la Bussière. MEDD, 123pp + Annexes.
- Rieucan L. (1965). Où en est le remembrement rural en France. *Études rurales* 18(1), p. 69-78.
- Riou P., Berger H., Cugier P., Le Gendre R, Menesguen A., Schapira M., Billen G., Garnier J., Passy P., Ramarson A., Théry S., Claquin P., Fauchot J., Belliot E., Mathieu Y., Vergne A. (2015). FLAM : Efflorescences microalgales en Manche - rôle des bassins versants dans le développement du phytoplancton toxique. Rapport Final 12-MUTS-LITEAU-4-CVS-016 2012 – n°CHORUS 2100 949 494, 94pp.
- Romero E., Le Gendre R., Garnier J., Billen G., Fisson C., Silvestre M., Riou Ph. (2016). Long-term water quality in the lower Seine: lessons learned over 4 decades of monitoring. *Environmental Science and Policy*, 58: 141–154.
- Rottier G., Albert J. (1959). Les consommations alimentaires et la production agricole de 1938 à 1958. *Économie rurale* 39(1), p. 117-126.
- Ruelland, D., Billen, G., Brunstein, D., Garnier, J. (2007). SENEQUE 3: a GIS interface to the RIVERSTRAHLER model of the biogeochemical functioning of river systems. *The Science of the Total Environment*, 375: 257-273. Sebilo et al, 2003
- Silvestre M., Billen G., Garnier J. (2015). Évaluation de la provenance des marchandises consommées par un territoire, pp 361-370. 1^{er} Colloque interdisciplinaire sur l'écologie industrielle et territoriale, COLEIT 2012. Junqua G. et Brulot S. coord. Presse des Mines, Alès.
- 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>
- Soumagne J. (1996). Géographie du commerce de détail dans le Centre-Ouest de la France. Poitiers, J. Soumagne.
- Streiff R. (1955). Les ports de commerce de Normandie. *L'information géographique* 19(5), p. 197 :207.
- Sutton, M.A., Howarth, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., Grizzetti, B., 2011. The Effect and Policy Perspectives European Nitrogen Assessment: Sources. Cambridge University Press, pp. 612.
- TEHN (1979-2009). Tableaux économiques de la Haute-Normandie. Paris, INSEE.
- Thieu V., Billen G., Garnier J. (2009). Nutrient transfer in three contrasting NW European watersheds: the Seine, Somme, and Scheldt Rivers. A comparative application of the Seneque/Riverstrahler model, *Water Research*, 43(6):1740- 1754
- Thuillier, Jean-Pierre (1986). « Les échanges internationaux en Haute-Normandie. Le cadre commercial et financier », *Etudes normandes*, vol. 1986, n° 4, p. 31-47.
- Villermet J.-M.(1991). Naissance de l'hypermarché. Paris : Armand Colin, 167 p.

ANNEXES

Sabine Bognon, Sabine Barles (2017). Le système alimentaire et sa trajectoire : méthodologie. Annexe 1. RESET, 13 pp.

Sabine Bognon, Sabine Barles (2017). La trajectoire du système alimentaire normand, XXe-XXIe siècles. Annexe 2. RESET, 25 pp.

Sabine Bognon, Sabine Barles (2017). Le fonctionnement actuel du système alimentaire normand : entre régime dominant et signaux faibles. Annexe 3. RESET, 36 pp.

Josette Garnier, Gilles Billen (2017). L'évolution de l'agriculture Normande de 1960 à 2010. RA Seine Aval, Annexe 4. RESET, 8pp.

Marie Silvestre (2017). Amstram, un logiciel de calcul de bilans d'approvisionnement. Application aux flux alimentaire en Normandie. Annexe 5. RESET, 25 pp.

Gilles Billen, Josette Garnier, Julia Le Noë (2017). Evolution du métabolisme territorial des régions normandes et adjacentes. RA Seine Aval, Annexe 6. RESET, 16 pp.

Josette Garnier, Gilles Billen, Antsiva Ramarson, Estela Romero, Vincent Thieu, Julia Le Noë, Sabine Barles, Sabine Bognon, Jérôme Castaing, Romain Legendre, Philippe Riou, Marie Silvestre, Sylvain Théry, Nicolas Bacq, Cédric Fisson (2017). Etablissement de scénarios contrastés du système socio-écologique normand et traduction en termes de fonctionnement biogéochimique de l'estuaire. RA Seine Aval, Annexe 7. RESET, 21pp.

Sabine Bognon, Sabine Barles (2017). Les scénarios RESET au prisme du terrain normand. RA Seine Aval, Annexe 8. RESET, 21 pp.

Gilles Billen, Antsiva Ramarson, Josette Garnier, Julia Le Noë (2017). La chaîne GRAFS-Seneque-Riverstrahler 3.7 pour la modélisation des transferts de nutriments du bassin versant à l'exutoire du réseau hydrographique, RA Seine Aval, Annexe 9. RESET, 16 pp.

Estela Romero, Josette Garnier, Gilles Billen, Romain Le Gendre, Cédric Fisson, Marie Silvestre, Philippe Riou (2017). Évolution de la qualité de l'eau dans l'estuaire et la partie basse du bassin de la Seine. RA Seine Aval, Annexe 10. RESET, 16pp.

Romain Le Gendre, Estela Romero, Philippe Riou, Jérôme Castaings, Antsiva Ramarson, Gilles Billen, et Josette Garnier (2017). Modélisation estuarienne et marine avec le modèle ECO-MARS 3D, exploration des Scénarios. RA Seine Aval, Annexe 11. RESET, 22 pp.

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115, Boulevard de l'Europe
76100 ROUEN
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

Garnier J. (coord.), Barles S., Billen G., Bognon S., Romero E., Le Gendre R., Silvestre M., Ramarson A., Thieu V., Théry S., Castaings J, Riou. P., 2018. Projet RESET : « Rôle de l'Estuaire de Seine dans l'Ecologie Territoriale de la Normandie : cycles des nutriments et systèmes hydro-agro-alimentaires », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 73 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.
Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

