



Modélisation du cycle du carbone organique le long du continuum rivière-estuaire-milieu côtier. Exemple d'un système fortement anthropisé : la Seine

Stéphanie Even

► To cite this version:

Stéphanie Even. Modélisation du cycle du carbone organique le long du continuum rivière-estuaire-milieu côtier. Exemple d'un système fortement anthropisé : la Seine. Hydrologie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2008. tel-00536260

HAL Id: tel-00536260

<https://theses.hal.science/tel-00536260>

Submitted on 16 Nov 2010

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

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

Université Pierre et Marie Curie
Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Stéphanie EVEN

Modélisation du cycle du carbone organique le long du
continuum rivière-estuaire-milieu côtier. Exemple d'un
système fortement anthropisé : la Seine.

Membres du jury :

M. Laurent MÉMERY	Rapporteur
M. Pierre REGNIER	Rapporteur
M. Patrick MEIRE	Rapporteur
M. Alain DAUTA	Examineur
M. Ghislain DE MARSILY	Examineur
M ^{me} Josette GARNIER	Examineur
M. Jean-Marie MOUCHEL	Examineur

Remerciements

Après tant d'années passées «le nez dans le guidon» cela fait du bien de relever un peu la tête et de prendre de la hauteur. La rédaction de ce mémoire a été un tel moment bienfaiteur. On mesure alors le chemin parcouru. Deux mots me viennent à l'esprit pour imaginer tout ce temps depuis ma thèse : combat et solitaire. Combat, parce que le métier de chercheur est (devenu ?) un métier difficile pour lequel on doit se battre quotidiennement pour défendre des paris difficiles à tenir ; essayer de joindre non pas les deux bouts mais les multiples bouts des cordes qui nous lient. Le métier du chercheur est éminemment solitaire. Car ce qu'on attend du chercheur c'est quelque chose d'essentiel, non un savoir faire. On en revient au vieux débat autour de Socrate et les sophistes. Le chercheur se donne dans son métier. Mais il en attend forcément un retour. Quel est le prix de ce savoir ? La reconnaissance . . .

*« En ce lieu de simple rencontre et de détente, sorte d'agora du tout-venant, se renouent les fils d'un tissu social usé ; c'est en même temps que renaissent un sentiment d'honneur, le sens d'une civilité presque cérémonielle, [. . .], et la certitude que, cette dignité ressentie, c'est la reconnaissance que l'on s'accorde les uns aux autres. » **

Cependant solitaire ne rime pas avec solitude. J'ai donc de nombreux remerciements à adresser. En tout premier lieu, à Ghislain DE MARSILY, pour sa grande sincérité, son humanité, lui qui a déterminé mon premier choix. En second lieu, Ronan KERYELL, ce chercheur dans l'âme, dans toutes les choses de la vie, les plus grandes et les plus petites, avec qui j'ai tant appris de l'être chercheur.

À l'issue de ma thèse, un poste m'a été proposé à l'École des Mines qui a ainsi soutenu mon travail, et ce, malgré un contexte personnel difficile. J'y retrouve quotidiennement une équipe sympathique et pleine d'entrain : Jan VAN DER LEE, Vincent LAGNEAU, Laurent DE WINDT, Sabine LIORZOU, . . .

Mes rencontres et collaborations furent nombreuses et multiples au sein des programmes de recherche PIREN SEINE et SEINE-AVAL. Je ne peux vraiment pas nommer toutes les personnes que j'y ai croisées, au risque d'en oublier et d'en froisser quelques uns/unes ; à des degrés divers, depuis la collaboration étroite jusqu'aux discussions de café, tous les moments que j'ai passé en leur présence participent de la «connaissance». Je remercie plus particulièrement les directeurs successifs de ces deux programmes pour avoir toujours soutenu mon travail : Ghislain DE MARSILY, Gilles BILLEN, Jean-Marie MOUCHEL, Axel ROMANA, Jean-Claude DAUVIN, Christian LÉVÊQUE. Une pensée particulière pour Josette GARNIER avec qui nos chemins se sont si souvent croisés et recroisés.

Et puis il y a des rencontres dans un cercle plus large. Alain DAUTA était déjà dans mon jury de thèse. Nous avons souvent eu l'occasion de nous rencontrer par la suite et j'ai toujours apprécié nos discussions. J'ai beaucoup appris avec les personnes du LEMAR (Olivier RAGUENEAU, Laurent MÉMERY). Les bons arrangements font parfois les bons amis. Grâce à Yannis HARALAMBOUS j'ai pu exercer mes talents d'enseignante en informatique, expérience qui m'est aujourd'hui très chère.

Il m'est souvent arrivé d'avoir besoin d'informations. J'ai à de multiples reprises eu l'occasion d'apprécier la grande disponibilité et la gentillesse des personnes au sein des organismes détenteurs de ces données (SIAAP, CGE, SNS, SAGEP). Je ne les nommerai pas toutes ; de plus certaines sont parties. Mais je tiens à leur dédier une pensée toute particulière.

À tous les membres du jury ; qu'ils soient des collaborateurs de longue date que j'ai souhaité associer à ce moment parce qu'ils sont les mieux à même d'évaluer le travail accompli ; qu'ils soient des personnes plus extérieures qui verront ce travail avec un oeil neuf ; pour leur lecture attentive, un grand merci.

Il me reste maintenant toutes ces personnes nouvelles qui croisent actuellement mon chemin et avec qui, j'espère, des collaborations vont pouvoir se monter.

À ma famille, Ronan, Elouan, Maiwenn, Mael, pour le meilleur et pour le pire.

* Marcel HÉNAFF, 2001. *Le prix de la vérité. Le don, l'argent et la philosophie*. Seuil. 552 pages.

Table des matières

I	Activités de recherche : bilan et perspectives	9
1	Introduction	13
1.1	Intérêt et cadre général de la recherche	13
1.1.1	La qualité des eaux de surface	13
1.1.2	Le contexte de la Seine	13
1.1.3	Le rôle de la matière organique	15
1.2	Méthodologie de la recherche	15
1.2.1	L'approche déterministe	15
1.2.2	Le choix du modèle	16
1.3	Projets de recherche	16
1.3.1	Historique	16
1.3.2	L'impact des rejets urbains	18
1.3.3	Les pollutions diffuses d'origine agricole	18
1.3.4	L'estuaire de Seine	19
1.3.5	Les modèles de gestion	19
1.3.6	Le plan du mémoire	19
1.3.7	Travaux publiés sur lesquels se fonde le mémoire	19
2	Les cours d'eau amont	23
2.1	Introduction	23
2.2	Le bassin du Grand-Morin	23
2.2.1	Le site	23
2.2.2	Les apports anthropiques	24
2.3	Le modèle de biofilm benthique	24
2.4	Résultats	26
2.5	Conclusion	27
3	La Seine fluviale	29
3.1	Introduction	29
3.2	La Seine fluviale entre Paris et Poses	30
3.2.1	La Seine fluviale	30
3.2.2	Les apports anthropiques	30
3.3	Les développements de modèle	32
3.3.1	Le modèle explicite de transport particulaire	33
3.3.2	La sédimentation	33
3.3.3	L'érosion	33
3.3.4	Le modèle de réactions dans la vase	33
3.4	Résultats	34
3.4.1	La dynamique sédimentaire	34
3.4.2	Les impacts de rejets urbains de temps de pluie	36
3.5	Conclusion	37

4	L'estuaire « réacteur » et le milieu côtier	39
4.1	Introduction	39
4.2	Le site et le contexte	39
4.3	Les bases de données et les modèles	40
4.4	Résultats	41
4.5	Conclusion	42
5	Les modèles de bassin pour la gestion	43
5.1	Introduction	43
5.2	Modélisation spatialisée du bassin du Grand-Morin	44
5.2.1	Le modèle couplé CawaQS	44
5.2.2	Résultats	45
5.2.3	Les apports diffus de nitrates	45
5.2.4	La spatialisation des pertes de nitrates	45
5.3	Modélisation spatialisée du bassin de la Seine	46
5.3.1	La chaîne de modélisation SENEQUE/PROSE/SIAM1D-RIVE/SIAM3D-ELISE	46
5.3.2	Résultats	46
5.4	Les interfaces utilisateurs	47
5.4.1	Le principe	47
5.4.2	Description schématique de l'outil GABI	47
5.4.3	Le bilan	48
5.5	Discussion et conclusion	48
5.5.1	Les enjeux futurs sur le bassin de la Seine	48
5.5.2	Le retour d'expérience	48
6	Conclusions et perspectives	51
6.1	Les processus biogéochimiques	51
6.2	La généralisation des processus	51
6.2.1	La rade de Brest et le cycle de la silice	51
6.2.2	Le bassin Amazonien et les échanges avec les zones humides connexes	51
6.3	Le « bon état/potentiel » écologique	52
6.4	Les changements globaux	52
6.5	Les approches globales	53
6.6	Le couplage entre différentes approches de modélisation	53
6.7	Les couplages chimie-biochimie	54
6.7.1	Les enjeux	54
6.7.2	En estuaire de Seine	54
6.7.3	En Seine fluviale	55
II	Notice individuelle	69
7	Curriculum Vitae	71
7.1	Situation	71
7.2	Formation	71
8	Activités pédagogiques	73
8.1	Encadrements	73
8.1.1	Les stages que j'ai co-encadrés	73
8.1.2	Les thèses que j'ai co-encadrées	75
8.2	Enseignements	75
9	Activités de recherche	77
10	Les études contractuelles et expertises	81

III Bibliographie personnelle

Résumé

Les déficits chroniques en oxygène et l'eutrophisation, conséquence des nombreux apports résultant des activités humaines, ont été mes principales thématiques de recherche. En effet les déterminismes de ces phénomènes ou la quantification des relations de causes à effet restent mal connus. Ma méthode de travail se base sur le développement et l'utilisation de modèles mathématiques déterministes. Le nécessaire couplage avec des approches de terrain et en laboratoire a été rendu possible par mon intégration dans des programmes nationaux interdisciplinaires, PIREN SEINE et SEINE-AVAL. Le système étudié, la Seine, est un fleuve modeste pour lequel les impacts des activités humaines sont particulièrement importants.

À la suite de ma thèse, mes recherches ont eu pour objectif de mieux comprendre les relations quantitatives entre les rejets urbains de temps de pluie (RUTPs) et les déficits en oxygène observés. Partant du constat que des modèles simplifiés étaient peu aptes à les caractériser, l'objectif a été d'analyser les processus responsables de ces déficits. Des mesures *in situ* ont été exploitées avec le modèle PROSE, développé pendant ma thèse, couplant un modèle hydrodynamique basé sur les équations de Saint-Venant avec le modèle de processus biochimiques RIVE et un modèle de transport sédimentaire en transitoire. Ainsi les déficits en oxygène immédiats sont déterminés par la charge en carbone organique dissous biodégradable (CODB) tandis que la fraction particulaire est responsable d'effets rémanents à grande échelle de temps (20 % du flux d'oxygène consommé en période estivale sur 50 km dans Paris). La mise en évidence de ce phénomène, dû aux dépôts riches en carbone organique en aval des RUTPs, est tout à fait originale. Par ailleurs une partie non négligeable du déficit en oxygène est due à la couverture nuageuse responsable d'une baisse de l'activité phytoplanctonique.

Les observations montrent en outre que la fraction biodégradable du carbone organique dissous (COD) est anormalement élevée à l'amont de Paris (70 %). Le site atelier «rivières amont» du PIREN SEINE sur le Grand-Morin, nous a permis de montrer le rôle majeur de l'eutrophisation. Le résultat le plus original est que la contribution du périphyton aux flux de COD à l'exutoire du bassin est du même ordre de grandeur que les apports directs anthropiques et que le produit de la lyse du phytoplancton.

La question de l'impact des rejets de l'agglomération parisienne m'a conduit à étendre mes travaux à l'estuaire dans le cadre du programme SEINE-AVAL. Ces rejets sont responsables de teneurs en carbone organique élevées dans les matières en suspension dans la zone du maximum de turbidité. Une modélisation spatialisée à l'aide du modèle SIAM3D-RIVE, a, en outre, permis de mettre en évidence des flux importants de carbone organique en provenance du milieu côtier. Les conséquences de ce phénomène sur le recyclage des éléments nutritifs et le développement de l'eutrophisation côtière doivent encore être étudiées.

Le développement d'approches du fonctionnement biogéochimique des hydrosystèmes à l'échelle des bassins reste actuellement un enjeu. Pour caractériser l'évolution sur le long terme de la contamination des hydrosystèmes par les nitrates et comprendre les processus de transformation de cette variable, le modèle PROSE a été couplé à une représentation par SIG de l'occupation des sols, au modèle agronomique STICS (INRA) et à une modélisation multicouches des aquifères (modèle NEWSAM, Mines ParisTech). Le modèle couplé (CaWaQS) a été appliqué sur l'ensemble du bassin du Grand-Morin. Il a permis d'établir que les cours d'eau y sont alimentés, en moyenne et du point de vue hydrologique, à 20 % par l'Oligocène et à 80 % par l'Éocène. Les deux aquifères ont, par ailleurs, des concentrations moyennes en nitrates et des tendances d'évolution très différentes. La modélisation multicouches a permis de représenter explicitement le phénomène de contamination des cours d'eau par des aquifères ayant des niveaux de contamination différents ; ce phénomène est rarement pris en compte ce qui conduit à une mauvaise interprétation des observations et des processus. Finalement les pertes de nitrates par dénitrification ont été estimées à près de 20 % du flux de nitrate infiltré à partir de la zone sous-racinaire. Les recherches doivent se poursuivre pour spatialiser ces pertes.

La chaîne de modèles SENEQUE (UMR SISYPHE)/PROSE/SIAM1D-RIVE (IFREMER/MINES PARIS-TECH)/SIAM3D-ELISE (IFREMER) a par ailleurs été mise en œuvre sur l'ensemble du bassin de la Seine afin de mettre en évidence les enjeux futurs de la gestion environnementale sur ce bassin. D'après les modèles, les désoxygénations chroniques seront fortement réduites d'ici 2015 suite à l'amélioration des traitements aux stations d'épuration ; l'eutrophisation et la maîtrise des pollutions diffuses d'origine agricole, tant pour les nitrates que pour les orthophosphates, restent par contre des enjeux importants.

Première partie

Activités de recherche : bilan et perspectives

Sigles utilisés

Sigle	Signification
AESN	Agence de l'Eau Seine-Normandie
CGE	Compagnie Générale des Eaux
COA	Carbone Organique Assimilable
COD	Carbone Organique Dissous
CODB	Carbone Organique Dissous Biodégradable
COP	Carbone Organique Particulaire
DBO ₅	Demande Biologique en Oxygène à 5 jours
COPB	Carbone Organique Particulaire Biodégradable
IAURIF	Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île de France
DCE	Directive Cadre Européenne sur l'Eau
GIZC	Gestion Intégrée des Zones Côtières
LESA	Laboratoire d'Écologie des Systèmes Aquatiques
MES	Matières En Suspension
MPI	Message Passing Interface
PK	Point Kilométrique
RUTP	Rejets Urbains de Temps de Pluie
SAGEP	Société Anonyme de Gestion des Eaux de Paris
SEDIF	Société des Eaux d'Île de France
SIAAP	Syndicat Interdépartemental de l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
SIG	Système d'Information Géographique
SNS	Service de Navigation de la Seine
STEP	STation d'Épuration
US-EPA	United State Environmental Protection Agency
ZMT	Zone du Maximum de Turbidité

Chapitre 1

Introduction

1.1 Intérêt et cadre général de la recherche

1.1.1 La qualité des eaux de surface

Mes travaux de recherche se sont focalisés sur les eaux de surface, qui sont des systèmes fortement impactés par les activités humaines. La capacité d'épuration de certains fleuves est épuisée par les nombreux rejets qui y sont déversés. L'absence chronique d'oxygène (hypoxies, anoxies) compromet la vie des poissons (Boët *et al.*, 1998) et de beaucoup d'autres formes de vie aquatique. L'excès d'apport en éléments nutritifs est le principal responsable du phénomène d'eutrophisation. Les marées vertes et l'apparition des algues toxiques, observées partout dans le monde depuis plusieurs décennies, compromettent de nombreuses activités (Hoagland *et al.*, 2002); la capacité d'épuration de certains milieux côtiers commence à être saturée (de Jonge *et al.*, 2002). Outre ces dysfonctionnements, les niveaux de contamination pour un certain nombre de composés tant organiques que métalliques deviennent préoccupants (Abarnou *et al.*, 1999; Chiffolleau *et al.*, 1999).

Le premier souci des politiques menées depuis les années 70 dans les pays industrialisés a été de réduire les rejets urbains directs. Cependant certaines formes de dysfonctionnement telles que l'eutrophisation, continuent de perdurer (de Jonge et Elliot, 2001); de nouveaux phénomènes tels l'impact de rejets transitoires de temps de pluie sont devenus préoccupants (Marsalek et Kok, 1997). Les politiques de réduction des rejets ont montré leurs limites (Garnier *et al.*, 2005) et d'autres formes d'action beaucoup plus complexes doivent aujourd'hui être définies. Or les déterminismes de certains phénomènes ou la quantification des relations de causes à effet restent mal connus.

1.1.2 Le contexte de la Seine

Le fleuve Seine est long de 776 kilomètres et son bassin versant couvre d'une superficie d'environ 75 000 km² (14 % du territoire français) (Fig. 1.1). Il est le cinquième fleuve français par sa longueur totale, le deuxième pour la longueur de son parcours sur le territoire français, après la Loire. La population du bassin de la Seine représente près de 30 % de la population française, dont 10 millions d'habitants pour la seule agglomération parisienne, deuxième agglomération urbaine en Europe après Londres.

La Seine est navigable sur la majeure partie de son cours (jusqu'à Montereau), y compris sur ses principaux affluents (Marne, Oise, Yonne). De Poses à Paris, sept barrages permettent de maintenir les tirants d'eau suffisants pour les péniches. Le régime hydrologique de la Seine est assez régulier avec un débit moyen annuel de 328 m³/s à Paris, calculé sur une quarantaine d'années. Les débits de crue peuvent cependant dépasser les 1600 m³/s. Quatre grands barrages réservoirs ont été construits sur la Seine, la Marne, l'Aube et l'Yonne entre 1950 et 1990 afin d'écarter les crues sur la Seine et ses affluents majeurs. Ils sont également utilisés pour soutenir les débits en étiage. Le débit à la traversée de Paris descend donc rarement en dessous de 80 m³/s.

La présence de la navigation et des ports (Rouen, le Havre) sont liés au développement d'une importante activité industrielle, essentiellement localisée en aval de Paris et dans l'estuaire. Aux pressions urbaines et

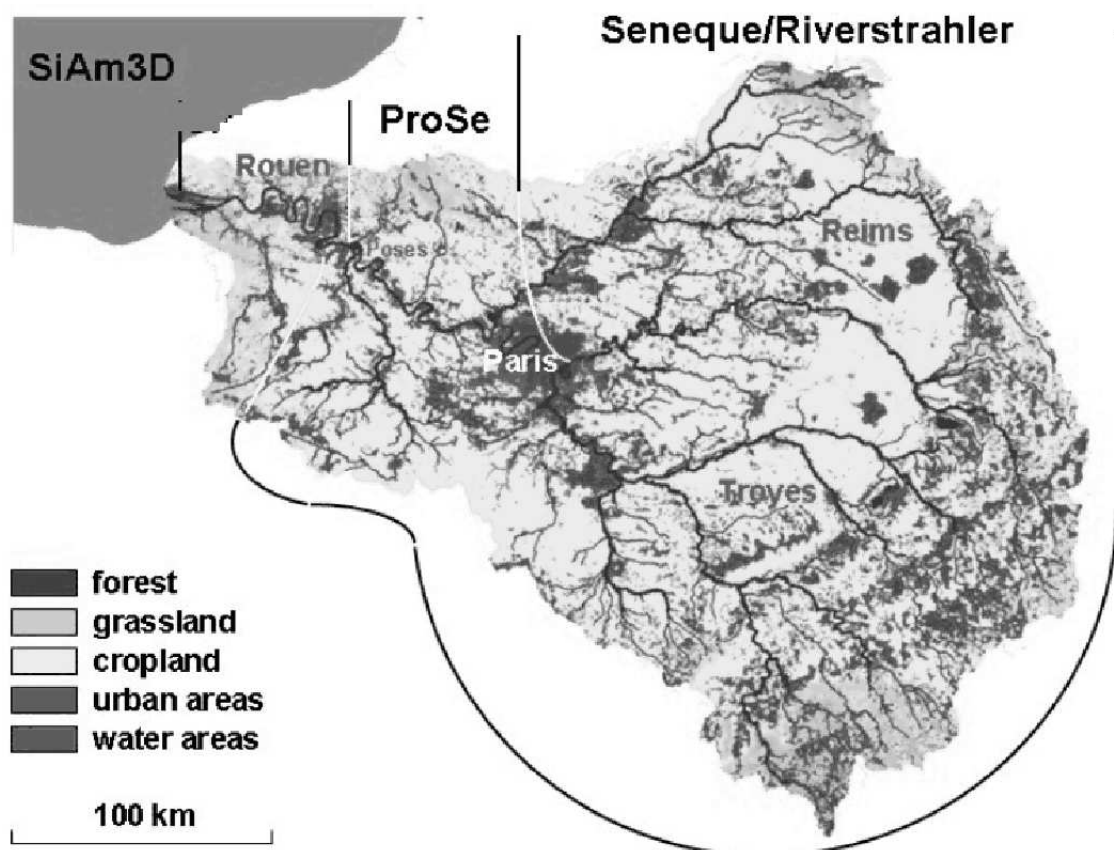


FIG. 1.1 – Usages des sols sur le bassin de la Seine (Agence Européenne de l'Environnement (1996); Corine Land Cover (CLC90), <http://dataservice.eea.eu.int/dataservice/metadetails.asp?id=188>); extension géographique des quatre modèles utilisés pour simuler le bassin de la Seine jusqu'au milieu côtier. Tiré de Even et al, 2007.

industrielles particulièrement fortes, s'ajoute une agriculture intensive dans les riches plaines de la Beauce, du Vexin et du Gâtinais. Compte tenu de ces pressions, les problèmes environnementaux sont multiples sur la Seine (Billen *et al.*, 2004). Nous retiendrons les problèmes d'oxygénation et d'eutrophisation qui ont été les axes centraux de mes recherches.

1.1.3 Le rôle de la matière organique

La matière organique est au cœur des processus qui contrôlent les impacts tels que les anoxies et l'eutrophisation. L'oxygène est un oxydant puissant utilisé dans le processus de respiration de nombreux organismes. Ainsi la matière organique (mortalités algales, rejets urbains) est dégradée par les bactéries hétérotrophes et quand elle se trouve en excès est responsable d'hypoxies, voire d'anoxies. L'ammoniaque produit lors de la dégradation de la matière organique est lui-même un élément toxique. Qui plus est, l'oxydation de l'ammoniaque (nitrification) par les bactéries autotrophes est un processus consommateur d'oxygène. Les éléments nutritifs, azotés ou phosphorés, produits lors de la dégradation de la matière organique, supportent en grande partie le phénomène d'eutrophisation. Sous sa forme particulière la matière organique est stockée et participe donc à la rémanence de certains impacts.

1.2 Méthodologie de la recherche

1.2.1 L'approche déterministe

La restauration de la qualité des eaux nécessite de comprendre les mécanismes en jeu et de quantifier les relations de causes à effets. Les modèles sont des outils particulièrement intéressants pour réaliser la synthèse des interactions entre des processus nombreux et complexes, pointer du doigt les processus majeurs selon les contextes, voire mettre en évidence les limites de la connaissance.

Je me suis intéressée aux modèles déterministes dans le but d'identifier les processus et les facteurs responsables d'un effet observé. Cette question intéresse non seulement les scientifiques, mais également les gestionnaires qui ont besoin de connaître les leviers sur lesquels agir et quel sera le bénéfice de leur action. La grande complexité de la nature ne pouvant être rendue dans un modèle unique qui serait alors inopérant, une grande partie de l'activité du modélisateur, et c'est son art, consiste à faire des choix pour simplifier. Dans ce sens beaucoup de modèles dit déterministes ne sont pas complètement «explicatifs» et le caractère déterministe dépend beaucoup de l'échelle à laquelle on travaille. Il est ici plutôt une définition par opposition à des modèles de type «boîte noire» dans lesquels soit on ne s'intéresse pas vraiment à la nature de la relation entre les entrées et les sorties, soit le souci de disposer de modèles «simples» se fait au détriment de la qualité des relations de causalité. Il n'en demeure pas moins que dans les modèles faisant appel à l'intelligence artificielle tels que les réseaux de neurones (Lek et Guégan, 1999), les relations entre variables sont parfois complexes. Quant aux modèles statistiques c'est le souci de représenter une nature dont on ne connaît *a priori* pas tous les déterminismes qui prévaut à leur utilisation (Harremoes *et al.*, 1996). Les deux types d'approches ont des objectifs très différents et l'on a souvent tendance à les opposer. Dans le premier cas on s'intéresse à concevoir un modèle à caractère «général» capable d'aider à comprendre les interactions entre les variables ; la qualité de la restitution des observations n'est pas l'objectif unique et des écarts importants entre résultats de modèle et observations restent souvent une source très intéressante de questions qui est le moteur même de la recherche. Dans le second cas l'objectif principal est la restitution la plus fidèle possible d'observations dans un cadre de gestion ; corrélativement la simplicité et la rapidité sont des critères importants. Si la restitution des observations est meilleure, ces approches passent parfois complètement à côté de vraies questions de compréhension qui restent masquées par les ajustements de paramètres. Cependant j'aurais tendance aujourd'hui à penser davantage en terme de complémentarité et de bénéfice réciproque des deux approches. Dans le même temps les modèles «boîte noire» basés sur l'intelligence artificielle cherchent de plus en plus à développer leur capacité explicative qui est perçue comme un enjeu en écologie (Olden et Jackson, 2002). Il n'en reste pas moins que les modèles déterministes sont majoritaires encore aujourd'hui (Jorgensen, 2008).

1.2.2 Le choix du modèle

À l'instar des évolutions législatives qui ont organisé le passage d'une vision locale à une vision globale, les modèles ont évolué pour intégrer progressivement les différentes composantes des écosystèmes. Ainsi depuis les travaux célèbres de STREETER et PHELPS (Streeter et Phelps, 1925) qui avaient réussi à calculer les déficits en oxygène en aval d'un rejet urbain défini en terme de DBO_5 , les modèles ont par la suite évolués en deux temps : i) intégration de variables plus nombreuses en réponse à des questions nouvelles (eutrophisation) dans les années 1970 (Brown et Barnwell, 1987) ; ii) à partir des années 1980 l'amélioration des connaissances du fonctionnement des micro-organismes (Fuhrman et Azam, 1982; Dauta, 1983; Lancelot *et al.*, 1986) ont permis de concevoir de nouveaux schémas conceptuels (BETURE-SETAME, 1988; Servais, 1989; Lancelot *et al.*, 1991). Le modèle RIVE (Billen *et al.*, 1994; Garnier *et al.*, 1995) appartient à cette dernière catégorie de modèles, parmi les plus aboutis. Cependant pour simplifier et parce que les données (biomasses et activités bactériennes, fractions de la matière organique) sont rarement disponibles, il reste classique de ne prendre en compte que la concentration de substrat pour représenter les processus de transformation (cinétique du premier ordre) et d'utiliser des variables intégrées mais suivies depuis très longtemps telles que la DBO_5 . Le modèle QUAL2E de l'US-EPA appartient à cette catégorie de modèles (Brown et Barnwell, 1987). Après avoir utilisé le modèle QUAL2E en Seine, j'ai publié dans Even *et al.* (1998) des explications sur le caractère peu prédictif d'une telle approche. Par ailleurs d'autres auteurs considèrent que les degrés de liberté pour pouvoir ajuster les paramètres sont tels que ces modèles sont généralement non conservatifs (Rauch *et al.*, 1998) et que l'utilisation des variables intégratrices telles que la DBO_5 posent le problème de la cohérence des processus représentés (Servais *et al.*, 1998; Rauch *et al.*, 1998).

Finalement j'ai choisi d'utiliser le modèle RIVE qui présente en outre l'avantage d'être conservatif. Mon objectif était d'en explorer le potentiel. D'autre part j'ai eu la chance de pouvoir travailler avec les équipes qui développent ce modèle et qui réalisent les mesures nécessaires à la détermination de ses paramètres. Les mesures dont on dispose pour mettre en œuvre un modèle sont un autre facteur de choix. Le concept sous-jacent au modèle RIVE est de décrire les processus de transformation à l'aide du fonctionnement intrinsèque des micro-organismes qui ne font que s'adapter au milieu physique. Tout l'enjeu est donc de reproduire ces processus d'adaptation et de faire en sorte que toutes les variables dépendant du milieu physique sont externalisées. Par la suite un tel modèle se doit d'être couplé avec différents modèles décrivant les milieux physiques en fonction des particularités de chaque système étudié et des échelles d'analyse.

1.3 Projets de recherche

Mes travaux de recherche se sont essentiellement déroulés dans le cadre des programmes nationaux PIREN SEINE pour la partie fluviale et SEINE-AVAL pour la partie estuarienne. Le premier programme a débuté en 1989. Le programme SEINE-AVAL a débuté en 1995. Ils ont pour ambition de comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes en interaction avec les activités humaines du bassin versant. Ces deux programmes fédèrent des équipes de recherche émanant de nombreux organismes (CNRS, CEMAGREF, universités et grandes écoles, ...) et reçoivent leurs financements d'institutions publiques et privées (Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), régions, DIREN, industriels, ...). Mais mes travaux de recherche ont également été nourris par les études et expertises que j'ai menées, tant en ce qui concerne l'acquisition des données que des questions qui sont nées de l'exigeante confrontation des résultats des modèles avec la réalité des observations.

1.3.1 Historique

Au cours de ma thèse (1990-1995), qui s'est déroulée dans le cadre du PIREN SEINE, je me suis intéressée à la problématique de l'impact des rejets permanents de l'agglomération parisienne jusqu'à Poses. Le modèle RIVERSTRAHLER en développement dans le cadre du PIREN SEINE (Billen *et al.*, 1994; Garnier *et al.*, 1995) consistait en un couplage du modèle de processus bio-chimiques RIVE avec une description idéalisée des cours d'eau sur la base des ordres de STRAHLER (Strahler, 1957). L'écoulement dans les grands axes du bassin y était décrit succinctement en forçant des valeurs constantes de sections

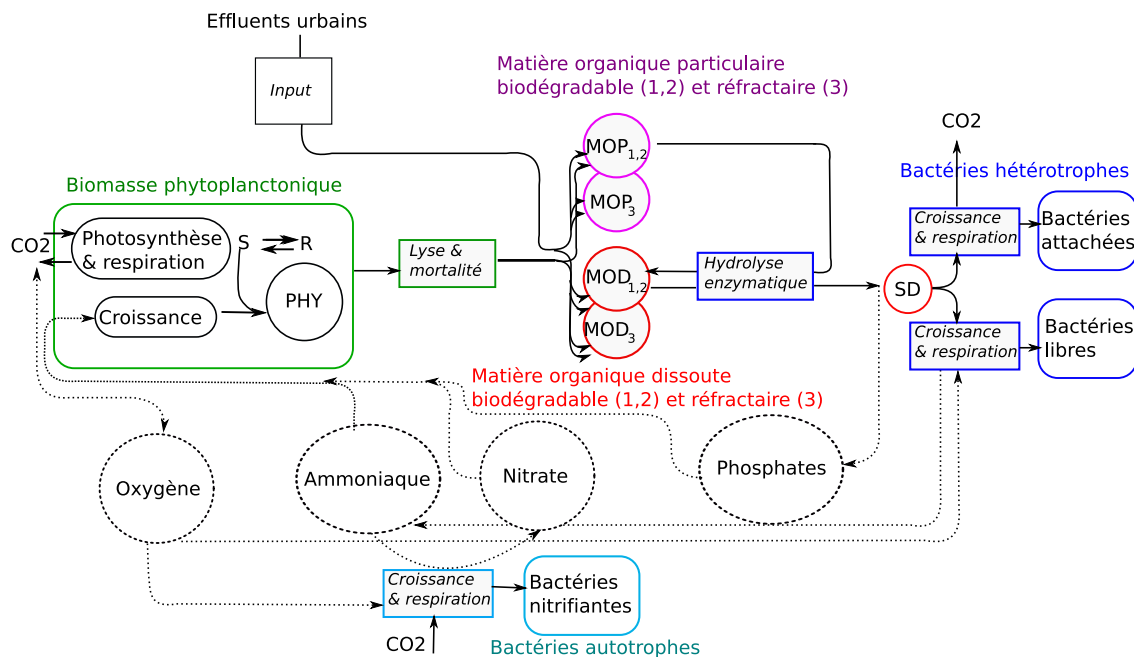


FIG. 1.2 – Schématisation du modèle RIVE d'après Garnier et al., 2008. En traits pleins, transformation de la matière organique; en traits pointillés, transformation des variables associées (oxygène, éléments nutritifs).

mouillées. J'ai donc développé un modèle hydrodynamique complet basé sur les équations de SAINT-VENANT monodimensionnelles, modèle qui a servi à calculer les caractéristiques de l'écoulement de la Seine à partir de la description de la bathymétrie et des valeurs du débit mesuré en amont de l'agglomération parisienne. La description des cours d'eau utilise une représentation en réseau maillé. Les îles et l'effet sur la dispersion ou le dépôt de sédiments sont ainsi pris en compte. Les seuils qui contrôlent tant la répartition des débits que les cotes de plan d'eau pour la navigation sont représentés. Le couplage d'un modèle de SAINT-VENANT avec le modèle RIVE a été appelé PROSE (Even, 1995). Tous les détails sur le modèle hydrodynamique et les méthodes de résolution numérique tant pour l'hydraulique que pour le transport, sont publiés dans ma thèse (Even, 1995). La notice utilisateur de PROSE contient également la description détaillée des concepts (Even, 2008). Outre son utilité en tant que modèle de recherche, le développement d'une modélisation explicite de l'écoulement et du transport dans PROSE a répondu à une demande de connaissance de la part des gestionnaires. C'est pourquoi ce travail a aussi donné lieu à de nombreuses études et expertises, mentionnées dans ma notice individuelle.

Le modèle RIVE décrit les processus de transformation de la matière organique sous différentes formes et dans la colonne d'eau (Fig. 1.2) (Garnier *et al.*, 1995; Billen *et al.*, 2001). Il résulte du couplage du modèle HSB (Servais, 1989) décrivant la dégradation de la matière organique fractionnée en trois classes selon son niveau de biodégradabilité (Servais *et al.*, 1987) par les bactéries hétérotrophes, et du modèle AQUAPHY (Lancelot et Mathot, 1987; Lancelot *et al.*, 1991) décrivant le fonctionnement interne des cellules phytoplanctoniques (Lancelot et Mathot, 1985) afin de rendre compte des découplages pouvant affecter sensiblement le processus de croissance. Il représente également la transformation des éléments majeurs liés au cycle de la matière organique (oxygène, éléments nutritifs). En Seine les paramètres pour les bactéries autochtones ou allochtones ont été déterminés (Garnier *et al.*, 1992); des identifications d'algues ont été réalisées (Garnier *et al.*, 1995). Le modèle RIVE a été développé dans le cadre du PIREN SEINE et est depuis lors appliqué à de nombreux systèmes (la Seine : (Billen *et al.*, 1994; Garnier *et al.*, 1995; Even *et al.*, 1998), le Danube (Garnier *et al.*, 2002), l'Escaut (Billen *et al.*, 2005), les rivières sub-arctiques, Lulea et Kali : (Sferratore *et al.*, 2008), la rivière rouge subtropicale : (Garnier et Billen, 2002; Le *et al.*, 2008)). Ma contribution personnelle sur les processus a été la détermination de la réaération à l'interface air-eau. Ces travaux ont été publiés dans Thibodeaux *et al.* (1994), article auquel je suis associée.

La description fine de l'écoulement à l'aide du modèle PROSE m'a permis de confronter les résultats du modèle à des mesures de plus en plus fréquentes (pas de dix minutes) en plusieurs sites. Les premiers résultats obtenus à la fin de ma thèse ont permis de réaliser une analyse des facteurs qui contrôlaient l'impact des rejets de l'agglomération parisienne. À l'issue de ces travaux plusieurs pistes de recherche se sont ouvertes :

1. la dynamique des matières en suspension (MES), riches en matière organique et bactéries, n'était pas bien représentée en aval des rejets où ces variables contrôlent la consommation d'oxygène. Le modèle RIVE ne prenait en compte qu'un taux net de disparition qui plus est constant dans le temps et dans l'espace pour toutes les variables particulières de la colonne d'eau. De plus il était couplé à un modèle diagénétique stationnaire. Or, les travaux relatifs aux cycles biogéochimiques dans les écosystèmes ont débutés dans les lacs et les milieux marins. Si dans ces milieux les hypothèses stationnaires pour les couches benthiques sont valides, l'application à des contextes fluviaux obligeait à repenser ces hypothèses ;
2. la confrontation des résultats du modèle avec les mesures fines à la traversée de Paris (six sites sur quarante kilomètres) ont mis en évidence l'incapacité du modèle à reproduire les déficits en oxygène observés ;

De plus l'impact catastrophique des rejets urbains par temps de pluie (RUTPs) a été révélé en Seine en juin 1990 et mai 1992 (Paffoni et Krier, 1996). Pendant ces années particulièrement sèches ils ont été à l'origine de mortalités piscicoles massives. Dans un contexte d'amélioration de la qualité des eaux suite à la réduction des rejets permanents et l'amélioration des traitements depuis les années 1970, l'impact des RUTPs apparaissait soudain comme un nouvel enjeu. Le modèle PROSE basé sur un vrai modèle hydrodynamique permettait d'aborder la problématique de rejets transitoires.

Parmi les pistes de travail, l'introduction de la dynamique sédimentaire explicite et non stationnaire semblait nécessaire i) dans le contexte des rivières où les débits et les caractéristiques spatiales sont variables ; ii) pour améliorer la dynamique de développement des processus en aval des rejets permanents ; iii) pour aborder la problématique émergente de l'impact des RUTPs.

1.3.2 L'impact des rejets urbains

Dès la fin de ma thèse, mes recherches dans le cadre du PIREN SEINE ont eu pour objectif de mieux comprendre les relations quantitatives entre les différents rejets urbains de l'agglomération parisienne, qu'ils soient permanents ou transitoires, et les déficits en oxygène observés. Outre les conclusions de ma thèse, la justification de ces travaux repose sur les résultats obtenus pendant la thèse de Marc DELBEC (Delbec, 1997-2000) (non publiée), dirigée par Jean-Marie MOUCHEL (CEREVE, École des Ponts et Chaussée) et que j'ai co-encadrée. Un de ses résultats a été de montrer que les modèles simplement basés sur la DBO_5 étaient inadaptés pour représenter correctement les déficits en oxygène en aval de rejets urbains de temps de pluie. Mes travaux se sont également appuyés sur les recherches sur la dynamique sédimentaire en rivière réalisées dans le cadre de la thèse de Laurent MARTIN (1999-2001) (Martin, 2001), dirigée par Michel POULIN (MINES PARISTECH) et que j'ai co-dirigée.

1.3.3 Les pollutions diffuses d'origine agricole

Les éléments nutritifs, responsables de l'eutrophisation, sont soit directement apportés par les rejets urbains, soit par les pollutions diffuses d'origine agricole. L'objectif des travaux de recherche auxquels j'ai contribué sur le site atelier du PIREN SEINE sur le bassin versant du Grand-Morin était de quantifier les apports d'origine agricole et leur devenir dans les cours d'eau. Pour ce faire, dans le cadre du stage de DEA de Nicolas FLIPO, dirigé par Michel POULIN et que j'ai co-dirigé, un modèle original de périphyton a été développé dans PROSE avec pour objectif d'évaluer l'impact à grande échelle de ce compartiment en se basant sur des campagnes de terrain et une recherche bibliographique (Flipo, 2001). Dans un second temps le modèle PROSE a été couplé à une modélisation multicouches des aquifères réalisée à l'aide du modèle MODCOU (MINES PARISTECH) afin d'explicitier la contamination diffuse par les nitrates par des couches géologiques ayant des niveaux de contamination différents. Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Nicolas FLIPO (Flipo, 2005), dirigée par Michel Poulin (MINES PARISTECH) et que j'ai co-dirigée.

1.3.4 L'estuaire de Seine

La question de l'impact des rejets de l'agglomération parisienne, du devenir de la matière organique particulaire et du développement de l'eutrophisation m'a conduit à poursuivre mes travaux dans l'estuaire, dans le cadre du programme SEINE-AVAL. Dans la première phase du programme au sein du thème « *Microbiologie et oxygénation* » coordonné par Gilles BILLEN (UMR Sisyphe), j'ai contribué à analyser les processus responsables des désoxygénations chroniques dans l'estuaire amont. Dans les phases suivantes, j'ai participé au thème « *Dynamique sédimentaire et contaminants associés* » et au sein du groupe de travail sur la matière organique, coordonné par Josette GARNIER (UMR SISYPHE), nous avons cherché à comprendre les processus de transformation du carbone dans la zone du maximum de turbidité (ZMT) pour trouver les causes de teneurs élevées en carbone organique dans les MES et leur rôle dans la dynamique de contaminants métalliques ou organiques. Au-delà des questions posées par l'ensemble de la communauté scientifique du programme SEINE-AVAL, je me suis personnellement intéressée à la question du rôle de la transformation du carbone organique sur le cycle des éléments nutritifs dans le secteur du bouchon vaseux. En effet ce sont les rapports relatifs entre les différents éléments nutritifs qui déterminent en premier lieu les espèces d'algues qui se développent et notamment l'apparition des algues toxiques (Officer et Ryther, 1980; Conley *et al.*, 1991; Cugier *et al.*, 2005a). La ZMT étant une zone de stockage prolongé pour les éléments particuliers, les éléments nutritifs, en fonction de leur affinité pour les particules, subiront des transformations différenciées.

1.3.5 Les modèles de gestion

Le cadre législatif (loi sur l'eau du 16 décembre 1964, loi du 3 janvier 1992, directive 2000/60/CE dite Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) a permis d'organiser, par étapes successives, le passage d'une vision locale et sectorielle des impacts à une vision globale (bassin) qui est l'échelle des enjeux actuels de la gestion des systèmes et notamment celle des milieux côtiers (Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC)). Or la compréhension des impacts à grande échelle et le développement d'outils d'aide à la décision pour répondre à ces objectifs restent encore aujourd'hui un enjeu. Un de mes objectifs a donc été de contribuer, dans le cadre du PIREN SEINE et du programme SEINE-AVAL, à développer une modélisation du continuum terre-mer intégrant la spécificité du fonctionnement de chaque sous système.

1.3.6 Le plan du mémoire

Les chapitres suivants font une synthèse des principaux résultats obtenus selon un gradient amont-aval :

chapitre 2 Les cours d'eau amont et les films benthiques ou «les sources de carbone organique naturel»

chapitre 3 Le fleuve et les impacts urbains ou «devenir des sources anthropiques de carbone organique»

chapitre 4 La transformation du carbone organique dans l'estuaire de Seine

Les modèles n'en restent pas au stade de la recherche et sont également intéressants comme outils d'aide à la décision. Compte tenu des échelles des enjeux actuels, l'objectif visé est de faire le lien entre les activités humaines du bassin et les impacts. Cet objectif est atteint en couplant différentes modélisations de sous-systèmes et des approches de type SIG. Au **chapitre 5** je montrerai en quoi mes travaux m'ont permis de contribuer à cette démarche sur le bassin de la Seine et je ferai état de ma réflexion concernant l'apport des modèles de recherche. Je terminerai par quelques conclusions et perspectives de mon travail recherche (**chapitre 6**).

1.3.7 Travaux publiés sur lesquels se fonde le mémoire

La synthèse de mes travaux de recherche qui suit s'appuie sur les travaux suivants :

1.3.7.1 Articles

Tous les articles, listés ici, sont joints en annexe.

1. Thibodeaux, L., M. Poulin, et S. Even, 1994. A Model for enhanced aeration of streams by motor vessels with application to the River Seine. *J. Hazardous Materials* **37** : 459–473.
2. Even, S., M. Poulin, J. Garnier, G. Billen, P. Servais, A. Chesterikoff, et M. Coste, 1998. River ecosystem modelling : application of the PROSE model to the Seine river (France). *Hydrobiologia* **373** : 27–37.
3. Even, S., J.-M. Mouchel, M. Seidl, P. Servais, et M. Poulin, 2004b. Oxygen deficits in the Seine river downstream of combined sewer overflows : importance of the suspended matter transport. *Ecological modelling* **173**(2-3) : 177–196.
4. Flipo, N., S. Even, M. Poulin, M.-H. Tusseau-Vuillemin, T. Améziane, et A. Dauta, 2004a. Biogeochemical modelling at the river scale : plankton and periphyton dynamics : Grand Morin case study, France. *Ecological Modelling* **176** : 333–347.
5. Even, S., G. Billen, N. Bacq, D. Ruelland, J. Garnier, M. Poulin, S. Thery, et S. Blanc, 2007b. New tools for modelling water quality of hydrosystems : An application in the Seine River Basin in the frame of the Water Framework Directive. *Sciences of the Total Environment* **375**(1-3) : 274–291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.019>.
6. Even, S., J. M. Mouchel, P. Servais, N. Flipo, M. Poulin, S. Blanc, M. Chabanel, C. Paffoni, et S. Duchesnes, 2007d. Modeling the impacts of Combined Sewer Overflows on the river Seine water quality. *Sciences of the Total Environment* **375**(1-3) : 140–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007>.
7. Even, S., B. Thouvenin, N. Bacq, G. Billen, J. Garnier, L. Guézennec, S. Blanc, A. Ficht, et P. L. Hir, 2007. An integrated modeling approach to forecast the impact of Seine basin managements on the Seine estuary. *Hydrobiologia* **588** : 13–29. doi 10.1007/s10750-007-0649-y.
8. Flipo, N., S. Even, M. Poulin, et E. Ledoux, 2007a. Modelling the nitrates fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Sciences of the Total Environment* **375**(1-3) : 69–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007>.
9. Flipo, N., N. Jeannée, M. Poulin, S. Even, et E. Ledoux, 2007b. Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France) : combined use of geostatistics and physically-based modelling. *Environmental Pollution* **146**(1) : 98–109.
10. Flipo, N., C. Rabouille, M. Poulin, S. Even, et M.-H. Tusseau, 2007c. Primary production in head-water streams of the Seine basin : the Grand Morin river case study. *Sciences of the Total Environment* **375**(1-3) : 140–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007>.
11. Garnier, J., G. Billen, S. Even, H. Etcheber, et 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. YECSS2481.
12. Even, S., B. Thouvenin, J. Garnier, P. Servais, et N. Bacq, 2008. Modeling the organic matter sources and fate in a macro-tidal estuary (Seine, France) for a multi-scale analysis. *Estuaries and Coasts*. Soumis.
13. Even, S., L. Martin, M. Poulin, et J. M. Mouchel. Influence of navigation on sediment transport in the Seine (France). *Aquatic Science*. À re-soumettre.

1.3.7.2 Autres documents

1. Billen, G., J. Garnier, P. Servais, N. Brion, A. Ficht, S. Even, T. Berthe, et M. Poulin, 1999. Programme scientifique Seine Aval. L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique, Volume 5. IFREMER.
2. Cugier, P., G. Billen, S. Even, et M. Poulin, 2004. Réponse de l'eutrophisation de la baie de Seine au scénario tendanciel 2015. Rapport technique, PIREN Seine.
3. Even, S., 1995. Modélisation d'un écosystème fluvial : la Seine. Le modèle ProSe. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, Centre de Géologie Informatique.

4. Even, S., 2008. Notice d'utilisation du logiciel ProSe. Un logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique. Version 4.1. Mise à jour mars 2008. Rapport technique, Centre de Géosciences. Mines ParisTech. Rapport SE080331.
5. Even, S., 2004. Développement et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel. Thème : Développement de modules opérationnels. Rapport technique, Programme Seine Aval.
6. Even, S., N. Bacq, B. Thouvenin, J. Garnier, P. Servais, et R. Lafite, 2006a. Modélisation de la MO en estuaire de Seine : sources et transformation ; analyse multi-contextuelle. Séminaire Seine Aval ; 6-7 septembre 2006.
7. Even, S., N. Bacq, B. Thouvenin, J. Garnier, et P. Servais, 2007a. Étude de scénarios pour la mise en place d'un assainissement intra-estuarien. Modélisation des cycles biogéochimiques majeurs en estuaire de Seine. Rapport technique, GIP Seine Aval. Actions opérationnelles du GIP Seine Aval.
8. Even, S., G. Billen, P. Servais, C. Paffoni, S. Legruel, S. Duchesne, O. Rousselot, et F. Lamy, 2007c. Validation du modèle PROSE sur l'année 2003 et simulation prospective de programmes de mesures à l'horizon 2012 entre Paris et Poses. Rapport technique, PIREN Seine.
9. Even, S. et N. Flipo, 2005. Gestion des bases de données, développement et transfert des outils de modélisation. Développements autour des logiciels PROSE, version 5/CAWAQS. Création d'une interface intégrée et couplage avec les SIG. Rapport technique, PIREN Seine. Contribution au rapport Piren Seine 2004.
10. Even, S., N. Flipo, M. Poulin, S. Bonniez, et R. Keryell, 2002. Développements opérationnels des outils de modélisation de l'eau de la Seine : ProSe à tubes de courant, version 3. Rapport technique, Piren Seine, rapport d'activité 2002.
11. Even, S., R. Keryell, N. Flipo, et M. Poulin, 2003. Développements et interfaçages de PROSE 3.5. Rapport technique, Piren Seine, rapport d'activité 2003.
12. Even, S., R. Keryell, N. Flipo, et M. Poulin, 2004a. Développements et interfaçages de PROSE 3.5, Contribution du Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris au programme de recherche Piren Seine. Rapport technique, École des Mines de Paris.
13. Even, S. et M. Poulin, 1999a. Extension du modèle PROSE vers les secteurs amont : application à la Seine entre Troyes et Montereau. Contribution du Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris au Programme de recherche PIREN SEINE. Rapport technique, CIG - ENSMP.
14. Even, S., M. Poulin, et B. Thouvenin, 2004d. Evolution prospective de la qualité des eaux de surface. Scénario tendanciel de la Directive Cadre Européenne de l'agglomération parisienne à l'estuaire. Rapport technique, PIREN Seine. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
15. Even, S., M. Poulin, et B. Thouvenin, 2004d. Scénario tendanciel 2015. Application de siAM1D à l'estuaire de la Seine de Poses à Honfleur. Rapport technique, École des Mines de Paris - Agence de l'Eau Seine Normandie.
16. Even, S. et B. Thouvenin, 2007. Modélisation et bilans de carbone en estuaire de Seine (synthèse CYMES). Le modèle MOSES (Modèle de Matière Organique Simplifié en Estuaire de Seine). Thème Morpho-dynamique, cycle des vases et contaminants associés. Rapport d'activité 2006. Rapport technique, Programme Seine Aval.
17. Flipo, N., S. Even, M. Poulin, et E. Ledoux, 2004a. Hydrological part of CAWAQS (Catchment Water Quality Simulator) : fitting on a small sedimentary basin. Dans Verh. Internat. Verein. Limnol., Volume 29, pp. 768–772.
18. Garnier, J., G. Billen, M. Sébilo, J. Némery, A. Martinez, M. Desruelle, S. Pinault, A. Cébron, A. d'Ayguesvives, P. Servais, P. Mercier, A. Anzil, E. Parlant, L. Vacher, G. Abril, R. D. Wit, E. Le-maire, H. Etcheber, S. Mounier, C. Garnier, D. Février, S. Even, et A. Ficht, 2003. Fonctionnement du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine. Transformation des éléments biogènes (C, N, P, Si). Rapport de synthèse, thème 3. Rapport technique, Programme scientifique Seine Aval.
19. Martin, L., S. Even, M. Poulin, et J. M. Mouchel, 2005. Influence of navigation on sediment transport in the Seine (France). Dans INTERCOH, Japan, 20-24 september 2005.

20. Thouvenin, B., D. Auger, B. Averty, B. B. ans Jean-François Chiffolleau, D. Cossa, A. Cozic, J.-L. Gonzales, K. Héas-Moisand, D. Ménard, J. Radford-Knoery, E. Rozuel-Chartier, A. Santini, P. Sargian, I. Truquet, M. Olivier, S. Even, P. Le Hir, N. Bacq, et C. Fisson, 2007a. Contribution à l'étude de la dynamique et de la spéciation des contaminants. Rapport technique, Programme de recherche Seine Aval. Seine-Aval 3 : L'analyse et la gestion environnementales « recherche appliquée ». Thème : « Morphodynamique, cycle des vases et contaminants associés ».
21. Thouvenin, B., G. Billen, S. Even, J.-C. Fischer, J.-L. Gonzalez, P. Le Hir, V. Loizeau, J.-M. Mouchel, C. Olivier, et R. S. Jacinto, 1999. Programme scientifique Seine Aval. Les modèles outils de connaissance et de gestion, Volume 16. IFREMER.
22. Thouvenin, B., J.-L. Gonzalez, P. Sargian, et S. Even, 2007b. Contribution au fascicule CYMES : liens entre la matière organique et les contaminants chimiques. Rapport d'activité 2007. Thème « Morphodynamique, cycle des vases et contaminants associés ». Rapport technique, Programme Seine Aval-III.

1.3.7.3 Sujets auxquels se rapportent les documents

Introduction les articles 1.3.7.1/1* et /2* (Thibodeaux *et al.*, 1994; Even *et al.*, 1998) et mon mémoire de thèse 1.3.7.2/3 (Even, 1995) se rapportent à des travaux réalisés pendant ma thèse et sont cités dans l'introduction (paragraphe 1.3.1 et 1.2.2 respectivement), voire dans la partie introductive des différents chapitres. Plusieurs versions de la notice utilisateur ont été écrites successivement pour le logiciel PROSE. Dans la partie introductive je cite la dernière version (document 1.3.7.2/4) comme référence pour la description des concepts utilisés dans le logiciel (Even, 2008).

chapitre 2 les articles 1.3.7.1/4* et /10* (Flipo *et al.*, 2004b, 2007c) et le rapport 1.3.7.2/13 (Even et Poulin, 1999) se rapportent au chapitre 2 relatif au fonctionnement des cours d'eau amont ;

chapitre 3 les articles 1.3.7.1/3*, /6* et /13* (Even *et al.*, 2004b, 2007d, 2008a), le rapport 1.3.7.2/7 (Even *et al.*, 2007a) et les présentations orales 1.3.7.2/6 et /19 (Even *et al.*, 2006a; Martin *et al.*, 2005) se rapportent au chapitre 3 relatif à la dynamique de la matière organique dans le secteur fluvial de la Seine ;

chapitre 4 les articles 1.3.7.1/7*, /11* et /12* (Even *et al.*, 2007e; Garnier *et al.*, 2008; Even *et al.*, 2008b), les fascicules 1.3.7.2/1 et /21 (Billen *et al.*, 1999; Thouvenin *et al.*, 1999) et les rapports 1.3.7.2/5 et /18 (Even, 2004; Garnier *et al.*, 2003) se rapportent au chapitre 4 relatif aux travaux sur l'estuaire de Seine ;

chapitre 5 les articles 1.3.7.1/5*, /8* et /9* (Even *et al.*, 2007b; Flipo *et al.*, 2007a,b) et les rapports 1.3.7.2/2, /8, /9, /10, /11, /12, /14, /15 et /17 (Cugier *et al.*, 2004; Even *et al.*, 2007c; Even et Flipo, 2005; Even *et al.*, 2002, 2003, 2004a,d,c; Flipo *et al.*, 2004a) se rapportent au chapitre 5 relatif aux applications ;

chapitre 6 les rapports 1.3.7.2/16, /20 et /22 (Even et Thouvenin, 2007; Thouvenin *et al.*, 2007c,a) font référence à des travaux prospectifs mentionnés dans le chapitre conclusif ainsi que dans les conclusions de certains chapitres (Chap. 3).

* joint en annexe

Chapitre 2

Les cours d'eau amont ou les sources de carbone organique naturel

2.1 Introduction

Après que le secteur aval de la Seine depuis Paris ait été le point central des recherches menées dans le cadre du PIREN SEINE dans sa première phase, la question du fonctionnement des «petites rivières amont» a été abordée à la fin des années 1990. Le Grand-Morin a été choisi comme site atelier et a servi à fédérer plusieurs actions dont l'analyse de la contamination des aquifères et des cours d'eau par les nitrates d'origine agricole (thème « *Hydrologie et agriculture* » (2003-2005) coordonné par Emmanuel LEDOUX (MINES PARISTECH).

Au centre de Géosciences, nous avons initié des travaux sur les cours d'eau amont dès 1997 avec le stage de DEA de Laurent MARTIN qui avait pour objectif de mettre en œuvre le couplage entre le modèle RIVERSTRAHLER et le modèle PROSE sur la Marne (Martin, 1997). En 1998 et 1999, les stages ingénieur de Jean-Philippe RENAUD (Renaud, 1998), Jean-Baptiste PELLETIER (Pelletier, 1999) et Kristel AUBERT (Aubert, 1999) ont permis de développer des modélisations d'hydrodynamique et de transport sur plusieurs rivières à caractère naturel. Une étude d'impact urbain en zone rurale a été réalisée dans le secteur de la ville de Troyes (Even et Poulin, 1999) avant que le Grand-Morin ne soit choisi comme site atelier du PIREN SEINE. Les travaux s'y sont poursuivis en 2000 avec le stage de DEA de Sylvain BOURLANGE (Bourlange, 2000) qui a permis de mettre en place la modélisation hydraulique. Afin de compléter les processus dans les rivières peu profondes, un modèle original de périphyton a été développé dans PROSE puis validé à partir de campagnes de mesures spécifiques. Ce travail a fait l'objet du stage de DEA de Nicolas FLIPO (Flipo, 2001), stage dirigé par Michel POULIN et que j'ai co-encadré. Suite à ces travaux, deux articles ont été publiés : Flipo *et al.* (2004b), Flipo *et al.* (2007c) auxquels j'ai contribué.

2.2 Le bassin du Grand-Morin

2.2.1 Le site

Le Grand-Morin s'écoule sur 120 km de long. C'est un affluent majeur de la Marne, qui draine un bassin de 1200 km² agricole à plus de 70 % (la Brie). L'activité agricole y est essentiellement constituée d'une agriculture intensive tournée vers la production céréalière. Le Grand-Morin est, et depuis longtemps, fortement aménagé. Dans sa partie aval (quarante derniers kilomètres) trente trois seuils (anciens moulins) ont été répertoriés (Bourlange, 2000) (Fig. 2.1). La ville la plus importante est Coulommiers (13 400 habitants) (Fig. 2.1) et le bassin subit l'influence majeure de la ville nouvelle de Marne-La-Vallée. La population totale sur le bassin est de l'ordre de 100 000 habitants.

Le débit moyen inter-annuel (calculé sur vingt-six ans) à Montry (Fig. 2.1) non loin de la confluence avec la Marne est de 7,61 m³/s ; en étiage le débit minimal pendant trois jours consécutifs (VCN3) peut descendre à 2 m³/s pour un étiage quinquennal sec ; le débit d'une crue décennale est de 110 m³/s. Le débit

spécifique est de $6,4 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^{-2}$; il vaut $8 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^{-2}$ pour la Seine à Poissy (80 % du bassin versant de la Seine). En aval de la confluence avec l'Aubetin, le Grand-Morin est d'ordre 5 ; la Seine avant son entrée dans l'estuaire est d'ordre 7.

2.2.2 Les apports anthropiques

Le bassin du Grand-Morin a également servi de zone atelier pour étendre la caractérisation des apports urbains sur un large panel de stations d'épuration (STEPS) au-delà de celles de l'agglomération parisienne (thème «*Rejets et contaminations urbaines*» (2000-2001) coordonné par Marie-Hélène TUSSEAU (CEMAGREF)) et Pierre SERVAIS (Université Libre de Bruxelles).

Les données de carbone organique dissous (COD) et particulaire (COP), biodégradable ou réfractaire ainsi que les biomasses bactériennes, nécessaires pour forcer le modèle RIVE, y ont été déterminées (Tusseau-Vuillemin *et al.*, 2001). Ces mesures ont permis de généraliser les corrélations entre DBO_5 et MES et les variables carbonées du modèle RIVE (Servais *et al.*, 1999; Servais et Billen, 2007). Pour les simulations réalisées avec le modèle PROSE sur le Grand-Morin, soit les mesures directes ont été retenues quant elles existent (les STEPS échantillonnées représentent 70 % de la charge totale (Flipo, 2005)), soit les flux spécifiques moyens calculés à partir des données précédentes ont permis d'extrapoler des charges à partir d'équivalents habitants fournis par le recensement de l'IAURIF.

2.3 Le modèle de biofilm benthique

Dans les cours d'eau amont, naturels et peu profonds, les biofilms peuvent représenter des biomasses carbonées importantes (Biggs et Stokseth, 1996; Améziane, 2000) et être déterminants pour la transformation de l'azote. Le modèle RIVE décrit les processus dans la colonne d'eau. Il devait donc être complété par un modèle de biofilm benthique. Cependant la question de l'importance réelle de ces biofilms dans le fonctionnement des systèmes à grande échelle était posée. En effet la plupart des travaux publiés sur le sujet, ayant pour objectif de renseigner sur le fonctionnement de ce compartiment, ont un caractère très local ou trop fin (voir revue bibliographique dans Flipo (2005)).

Le modèle de biofilm que nous avons spécifiquement développé pour réaliser ce travail est conceptuellement cohérent avec le modèle RIVE. Il représente l'ensemble des micro-organismes susceptibles de s'y développer : bactéries hétérotrophes, algues, bactéries nitrifiantes. Les groupes qui s'y trouvent sont de deux types : i) les organismes venant de la colonne d'eau et qui se retrouvent piégés dans le biofilm suite à la sédimentation ; ii) les organismes spécifiques aux biofilms. Pour les constituants présents dans la colonne la sédimentation dans le biofilm ou dans la vase sont répartis en fonction d'un taux de recouvrement, considéré comme constant à ce stade. Le biofilm est érodé par arrachage. Nous prenons en compte un arrachage permanent (de Angelis *et al.*, 1995; Dent et Henry, 1999) et un arrachage en fonction du débit (Biggs et Close, 1989; Flipo *et al.*, 2004b). Pour les constituants de la colonne d'eau qui se trouvent piégés dans le biofilm, ils sont érodés mais un coefficient de rétention est pris en compte. Une fonction d'inhibition est introduite pour le phytoplancton de la colonne d'eau, supposé ne pas se développer de manière optimale quand il est piégé au fond. Les producteurs primaires benthiques sont quant à eux inhibés à la surface. Le modèle (processus, paramètres) et initialisation sont décrits dans Flipo *et al.* (2004b), article auquel je suis associée. Les résultats de validation pour le carbone y sont également présentés ainsi que dans Flipo *et al.* (2007c). Le modèle a été implémenté dans le modèle PROSE.

Les quarante derniers kilomètres du Grand-Morin ont plus particulièrement été étudiés et modélisés (Fig. 2.1) (Flipo *et al.*, 2004b, 2007c). Plusieurs campagnes de terrain à Pommeuse et La Bretonnière au cours de l'été 2001 ont permis d'échantillonner tant le biofilm benthique à plusieurs périodes que la colonne d'eau. Les campagnes ont été organisées dans le cadre du PIREN SEINE par le Centre de Géosciences (MINES PARIS TECH) et le CEMAGREF (Fig. 2.2).

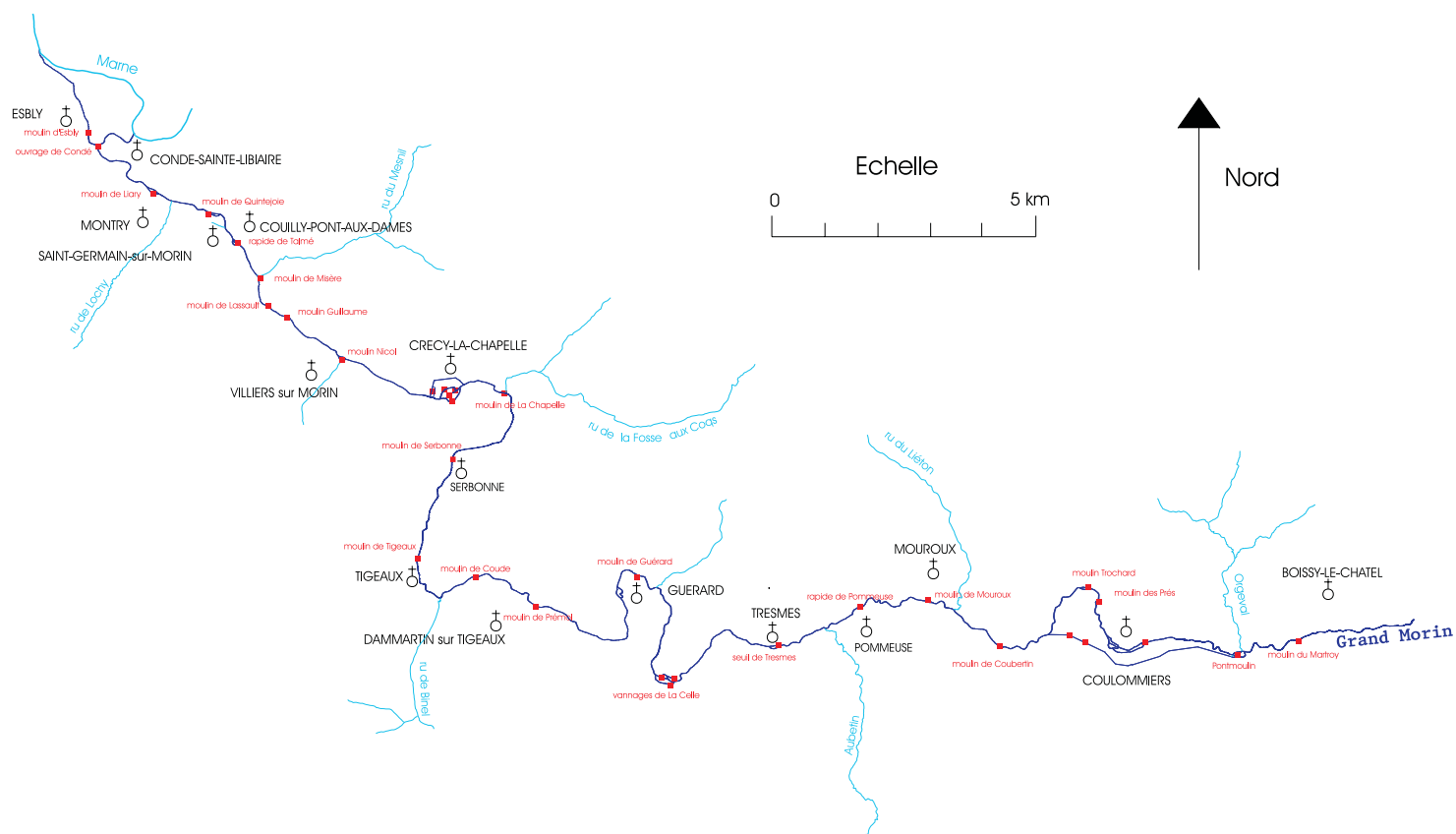
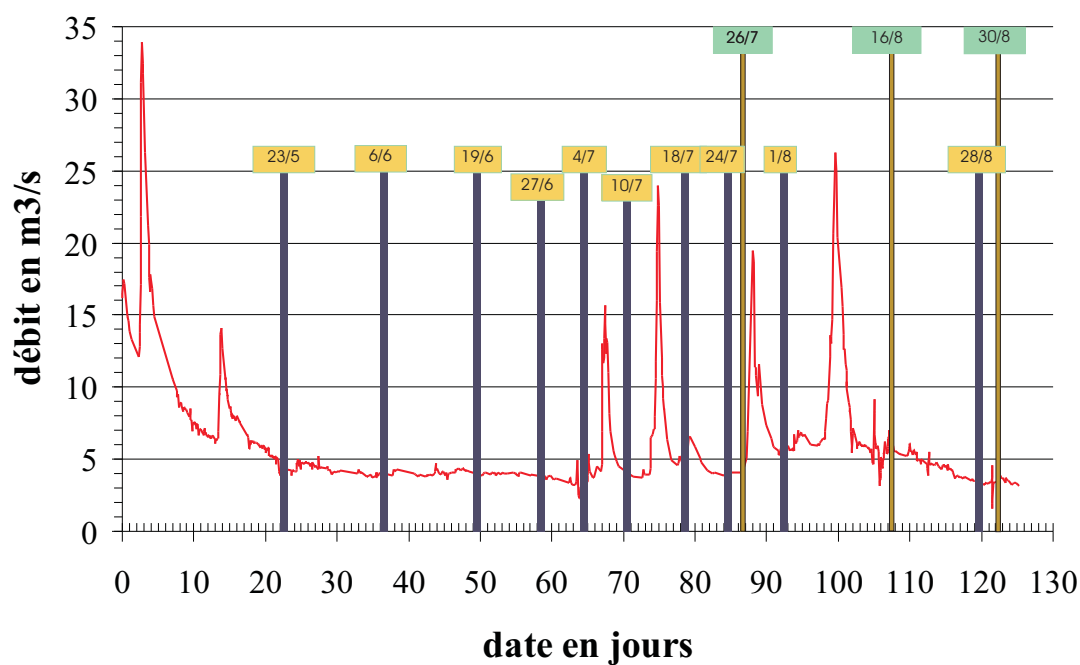


FIG. 2.1 – Secteur aval du Grand-Morin modélisé à l'aide du logiciel PROSE.

FIG. 2.2 – Hydrogramme à Pommese (le 0 est le 1^{er} mai 2001) et dates d'échantillonnage. Barres bleues (10) : échantillonnage dans la colonne d'eau (MES, nitrate, ammoniacque, orthophosphates, oxygène dissous, chlorophylle *a*, COP, COD) ; barres jaunes (3) : échantillonnage du biofilm benthique. Tiré de Flipo (2005).

2.4 Résultats

La comparaison des valeurs de poids sec de masse carbonée et de chlorophylle *a* mesurées sur le Grand-Morin avec des valeurs publiées sur de nombreux sites montre que c'est un cours d'eau ayant un biofilm très productif (Flipo *et al.*, 2004b, 2007c). Le modèle distribué PROSE avec le module «biofilm» a été utilisé pour extrapoler les données ponctuelles à l'ensemble des quarante kilomètres aval du Grand-Morin. Selon le modèle, seuls les vingt-deux kilomètres à l'amont du secteur sont colonisés par le biofilm. Plus à l'aval, l'inhibition de la production primaire due à des profondeurs d'eau supérieures à un mètre est importante. Durant les trois mois et demi mois simulés à partir de mi-mai 2001, le stockage de COP dans le biofilm a été estimé entre 0,5 et 3,8 tC. En régime stationnaire, les pertes permanentes de COP représentent 91 kgC/j et sont équivalentes aux apports intermédiaires (effluents, affluents) cumulés (87 kgC/j). Concernant le COD produit par la lyse et échangé par diffusion, il représente 118 kgC/j, soit 42 % des apports intermédiaires. Il est du même ordre de grandeur que les apports anthropiques (130 kgC/j) ou que le COD produit par la lyse algale dans la colonne d'eau (148 kgC/j). Cette dernière valeur représente une valeur maximale pour la période en régime stationnaire. En crue, le COP arraché ne représente plus que 50 % des apports intermédiaires ; les flux de COD deviennent négligeables. Dans un second article, Flipo *et al.* (2007c) ont pu montrer que l'importance du biofilm s'explique par des biomasses de producteurs primaires dans le biofilm supérieures au phytoplancton dans la colonne d'eau, pour lequel les temps de séjour sont faibles (quelques jours). La production nette spécifique dans le biofilm est quant à elle inférieure à celle du phytoplancton dans la colonne d'eau (0,33 et 0,84 j⁻¹ respectivement).

La réactivité du COP dans la colonne d'eau reste faible. En effet, il est d'abord hydrolysé pour être transformé en COD avant de servir de substrat aux bactéries. L'hydrolyse est lente. Dans le cas du Grand-Morin et pour le secteur étudié, cette transformation concerne 1 % du stock de COP en régime permanent. C'est dans l'estuaire de Seine que j'ai plus particulièrement étudié la transformation du COP. Par contre le COD est la variable carbonée la plus réactive tout au long du linéaire fluvial. Nos résultats montrent que la contribution du biofilm au flux de COD produit dans le bief est de l'ordre de 30 %, à hauteur des deux autres sources (rejets anthropiques, phytoplancton). Si l'on inclut les épisodes de crue, la contribution du biofilm à l'exportation de COD domine (Flipo *et al.*, 2004b). Notre conclusion publiée dans Flipo *et al.* (2004b) était notamment que ces flux de COD pouvaient expliquer des niveaux élevés de carbone organique dissous biodégradable (CODB) à l'entrée de Paris. J'aimerais ici développer davantage cet aspect qui me semble important.

Les estimations de CODB effectuées par Servais *et al.* (1989) en Seine à l'amont de Paris, selon un protocole cohérent avec les concepts du modèle RIVE, sont de l'ordre de 65-70 % du COD. Par ailleurs, la Compagnie Générale des Eaux (CGE) effectue des suivis hebdomadaires de COD et carbone organique assimilable (COA) sur la Seine et sur la Marne en amont de Paris (Choisy le Roy et Neuilly sur Marne). Pour les mesures entre 1994 et 1998 les fractions moyennes annuelles de COA/COD sont de l'ordre de 40 %, avec des valeurs maximales pouvant atteindre 60 %. Or il est admis que le CODB, tel que caractérisé par Servais *et al.* (1989), inclut le COA, qui représente les fractions les plus labiles du COD (Escobar et Randall, 2001). Le CODB présente donc des concentrations généralement plus élevées (Charnock et Kjonno, 2000; Servais *et al.*, 1989). Les mesures de Servais *et al.* (1989) sont donc sans doute représentatives de ce qui se trouve en Seine amont et en Marne au moins jusqu'au début des années 2000. Cette valeur est particulièrement élevée au regard des valeurs dans d'autres rivières belges telles que l'Escaut (38 % en moyenne, 46% au maximum), la Ruppel (34 % en moyenne, 54% au maximum) ou la Meuse (27 % en moyenne, 34% au maximum) Servais *et al.* (1989). L'Escaut et la Ruppel sont très impactées par les rejets urbains (concentrations en COD variant de 7 à 13 mgCL⁻¹) et présentent des caractéristiques similaires. Les concentrations en COD dans la Seine ou la Marne à l'amont de Paris sont de l'ordre de celles de la Meuse (3 mgCL⁻¹). C'est le niveau moyen de COD dans les rivières en zone tempérées (Spitzzy et Leenheer, 1991). Il apparaît donc que la biodégradabilité du COD de ces deux rivières en amont de Paris est importante. Nos résultats expliquent ces teneurs par le phénomène d'eutrophisation (phytoplancton + producteurs primaires benthiques).

Les origines du COD dans les rivières naturelles sont généralement recherchées dans les sols (érosion) et les plantes qui produisent un carbone organique plutôt réfractaire ; les évolutions saisonnières pour le COD sont alors une augmentation en fonction du débit (Spitzzy et Leenheer, 1991). C'est ce qui est généralement observé. Le COA en Seine et en Marne suit quant à lui une courbe inverse avec des concentrations

maximales en période estivale, cohérente avec nos résultats.

2.5 Conclusion

Dans les études qui s'intéressent aux bilans de carbone à très grande échelle, la production autochtone (dans la colonne d'eau elle-même) de COD est généralement négligée car considérée comme très labile (Meybeck, 2004). Il n'en reste pas moins que dans notre cas, le CODB arrivant à l'entrée de l'agglomération parisienne en grandes quantités va contribuer à influencer les consommations d'oxygène à la traversée de l'agglomération parisienne et à fragiliser le système en période estivale, période la plus sensible du point de vue de la qualité de l'eau. En effet la déconnexion spatiale entre la production d'oxygène par les producteurs primaires du biofilm et la consommation d'oxygène liée à la dégradation du CODB produit implique donc vis à vis des secteurs aval une consommation nette de carbone. Ce n'est pas le cas du phytoplancton. De plus Meybeck (2004) constate que les évolutions actuelles des activités humaines conduisent à un appauvrissement relatif des sources «traditionnelles» par les sols contrairement aux sources autochtones (producteurs primaires). Or la dynamique de ces dernières et leurs implications environnementales sont multiples (oxygène, eutrophisation, dynamique de contaminants) et complexes. La quantification des différentes origines du COD dans les hydrosystèmes en fonction des activités humaines reste donc une nécessité.

Le rôle du compartiment benthique vis à vis du cycle de l'azote, plus particulièrement son élimination par dénitrification, a également été analysé dans le cadre d'une modélisation intégrée du bassin du Grand-Morin. Ces travaux sont présentés au chapitre 5.

Chapitre 3

La Seine fluviale ou le devenir du carbone organique d'origine anthropique

3.1 Introduction

Pendant de nombreuses années l'objectif de mes recherches a été de mieux comprendre les relations quantitatives entre les différents rejets urbains de l'agglomération parisienne et les déficits en oxygène observés. J'ai tout particulièrement mis l'accent sur les RUTPs après que leur importance ait été mise en lumière à partir des années 1990 suite à l'amélioration globale de la collecte des eaux usées et des traitements (Marsalek et Kok, 1997). Une partie de mes travaux dans le PIREN SEINE se sont déroulés dans le cadre des thèmes « *Les outils de modélisation et leurs applications* » (2002), « *Développements méthodologiques et scénarios tendanciels* » (2003-2004) coordonnés par Gilles BILLEN et Michel POULIN. Ce cadre qui a permis de poursuivre les développements et mises au point du modèle PROSE et, plus généralement, les nombreuses études et expertises que j'ai menées (Chap. 10) avec le Syndicat Interdépartemental de l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), la ville de Paris ou l'AESN ont largement alimenté les bases de données pour le modèle PROSE et ma réflexion sur les impacts des activités humaines. En effet, ce sont des nombreuses et constantes confrontations des résultats du modèle PROSE avec des observations, réalisées dans le cadre d'exercices de validation, que sont nés mes questionnements sur l'existence de processus ignorés jusqu'à présent et qui finalement m'ont permis d'obtenir des résultats originaux sur l'impact des RUTPs (Even *et al.*, 2004b, 2007d). Je me suis également appuyée sur des travaux de stage que j'ai co-encadrés : le stage ingénieur de Serge MASCARO qui a réalisé les premiers scénarios d'impact de pluies d'orage sur Paris (Mascaro, 1995) ou le stage de master ISIGE (MINES PARISTECH) de Guillaume STORME (Storme, 2004) sur l'impact du panache de l'usine Seine Amont pendant une mise en chômage. La collaboration avec Martin SEIDL pour l'exploitation des mesures qu'il a réalisées pendant sa thèse a également été très riche (Seidl, 1997).

Les recherches sur l'impact des RUTPs très transitoires nécessitaient l'amélioration des connaissances concernant le transport particulaire. Les recherches sur le transport de sédiments en rivière ont en partie été réalisées dans le cadre de la thèse de Laurent MARTIN (Martin, 2001), dirigée par Michel POULIN (MINES PARISTECH) et que j'ai co-encadrée. Ces travaux ont donné lieu à un résumé accepté pour une présentation au congrès INTERCOH en 2005 (Martin *et al.*, 2005) et un article qui doit être re-soumis (Even *et al.*, 2008a). Les adaptations réalisées par moi-même dans le modèle PROSE à partir de 1996 se sont nourries d'une part de ces travaux, d'autre part des observations et résultats obtenus par de nombreuses équipes du PIREN SEINE dans le cadre des thèmes « *Transport, érosion et dépôt des particules* » (1998-2001) puis « *Rôle du transport particulaire sur le transfert des pollutions* » (2002-2006) du PIREN SEINE, coordonnés par Jean Marie MOUCHEL et Philippe BONTÉ.

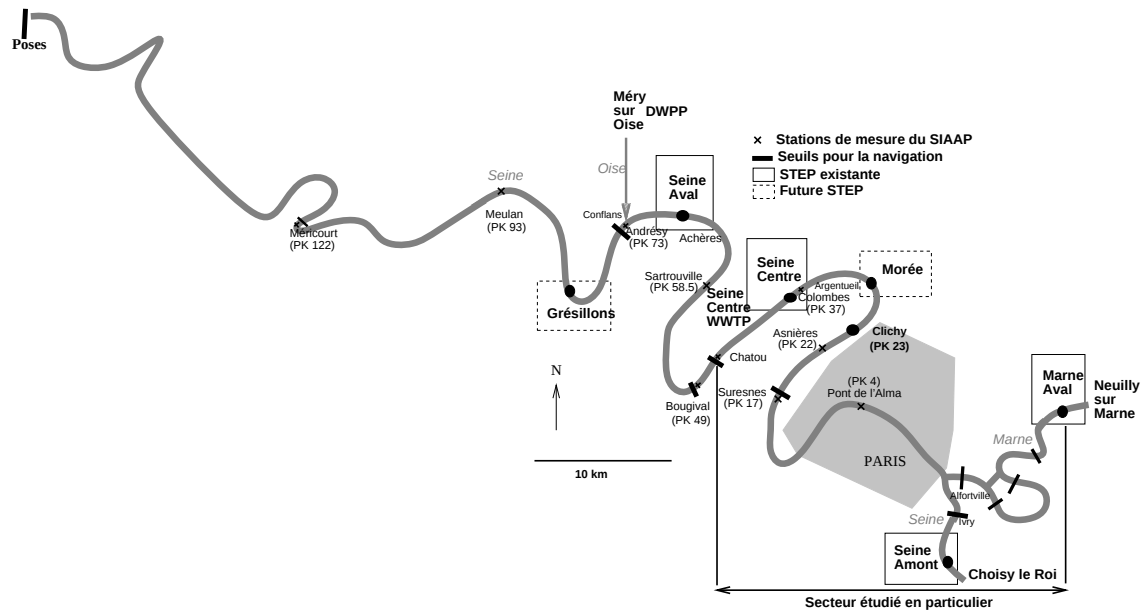


FIG. 3.1 – La Seine fluviale entre Paris et Poses modélisée à l'aide du logiciel PROSE. PK : Point Kilométrique avec référence 0 au Pont Marie dans Paris.

3.2 La Seine fluviale entre Paris et Poses

3.2.1 La Seine fluviale

Le secteur de la Seine fluviale considéré intègre l'agglomération parisienne dans son ensemble jusqu'au barrage de Poses. ce dernier constitue la limite avec la zone estuarienne. Entre Paris et Poses, la distance est de 200 km. Six barrages de navigation y régulent les tirants d'eau. La confluence entre la Seine et la Marne se trouve juste à l'entrée de Paris. Les sites de Choisy-le-Roi sur la Seine et Neuilly-sur-Marne à l'amont de Paris ainsi que Méry-sur-Oise à l'aval sont des sites de prélèvement de la CGE pour lesquels existent des suivis fréquents pour un grand nombre de variables ; ils ont été choisis comme points limites pour forcer le modèle PROSE. Pour plus de détails sur les données utilisées pour forcer le modèle ou pour le valider, se reporter à Even *et al.* (2004b) et Even *et al.* (2007d).

3.2.2 Les apports anthropiques

Les eaux usées de l'agglomération parisienne (10 millions d'habitants) sont traitées à cinq stations d'épuration : Marne Aval à Noisy-Le-Grand (30 000 m³/j en temps sec), Seine Amont à Valenton (600 000 m³/j en temps sec, 1 500 000 m³/j en temps de pluie), Seine Centre à Colombes (240 000 m³/j en temps sec) et Seine Aval à Achères (1 700 000 m³/j en temps sec et jusqu'à 2 300 000 m³/j en temps de pluie) (Fig. 3.1).

En temps de pluie, les eaux ne pouvant transiter dans le système sont déversées aux exutoires d'orage. Il y en a plus de deux cents répartis dans l'agglomération parisienne, le plus important étant celui de Clichy (Fig. 3.1). Le débit y est suivi en continu où des pointes supérieures à 40 m³/s sont fréquemment observées (en moyenne cinq événements par an). À Achères, le débit maximum pouvant être déversé en temps de pluie est de 70 m³/s, ce qui représente un excédent de débit de l'ordre de 45 m³/s par rapport au temps sec. Sachant qu'en Seine en été, le débit moyen est de 100 m³/s, le rapport entre débit «naturel» et débit déversé conduit parfois à des effets catastrophiques (Fig. 3.2). Les scénarios simulés, les bases de données de rejets permanents ou en temps de pluie sont décrits dans Even *et al.* (2004b) et Even *et al.* (2007d).

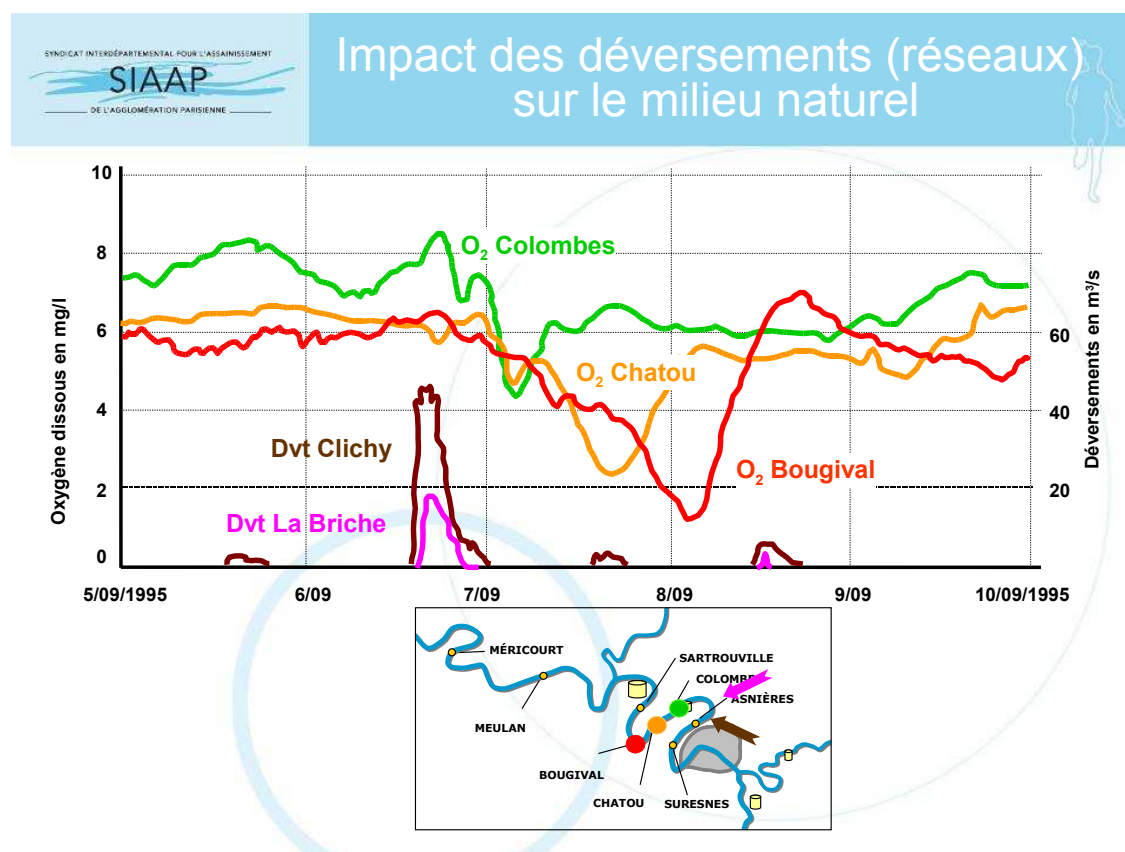


FIG. 3.2 – Impact en Seine après des déversements à Clichy et la Briche lors d'un évènement orageux en septembre 1995. Le déversement de Clichy, le plus amont, est repéré sur la carte par la flèche marron et est représenté en trait plein marron (couleur la plus foncée) sur la courbe du haut ; le déversement de la Briche, le plus aval, est repéré par la flèche rose et trait plein rose (couleur la plus claire). D'après un document de la Commission Particulière du Débat Public saisie en 2007 dans le cadre du projet de refonte de la STEP Seine Aval.

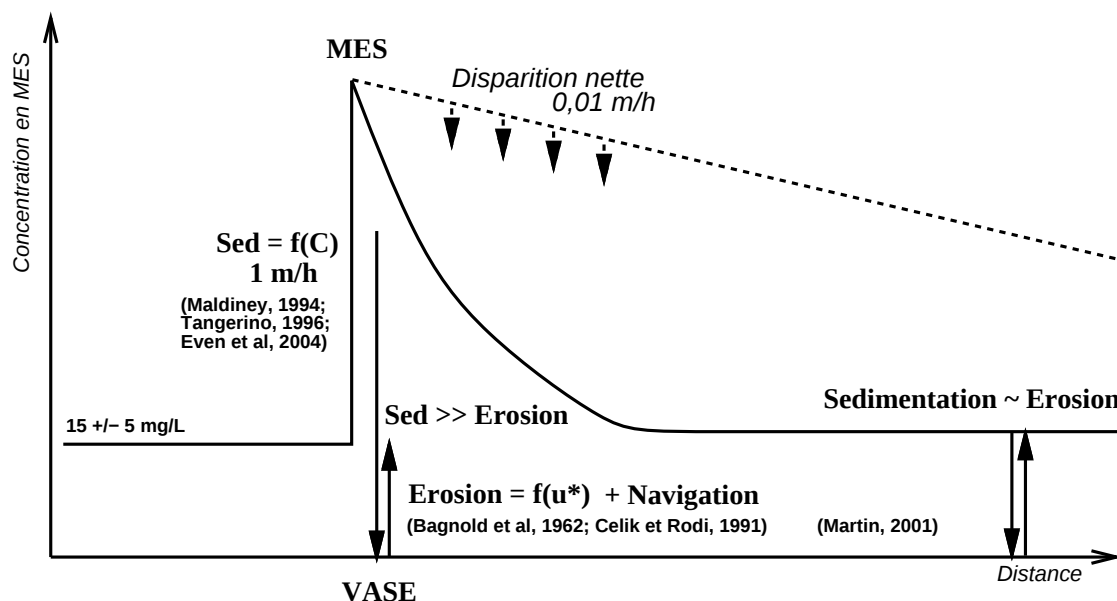


FIG. 3.3 – Schématisation de la courbe de disparition des MES en aval d'un rejet pour deux modèles conceptuels : i) avec une explicitation des flux de sédimentation et d'érosion (traits pleins). Utilisation d'un modèle énergétique et hypothèse d'un équilibre entre flux de sédimentation et flux d'érosion en situation stationnaire. Vitesse de chute de 1 m/h^{-1} déterminée expérimentalement (Tangerino 1994 ; Maldiney 1994) et validée par la modélisation (Even et al. 2004a) ; ii) avec un taux de disparition net constant (trait pointillé). Taux de disparition de $0,01 \text{ m/h}^{-1}$ calibré pour le modèle RIVERSTRAHLER (Even 1995 ; Garnier et al. 1995).

3.3 Les développements de modèle

Outre le transport à la vitesse moyenne de l'eau, les constituants particuliers sédimentent et sont remis en suspension. Dans les modèles de qualité d'eau il est classique de ne représenter que le flux net de dépôt à l'aide d'un taux constant de disparition (RIVERSTRAHLER : Garnier *et al.* (1995) ; QUAL2E : Brown et Barnwell (1987)) ; en Seine, une valeur moyenne de $0,01 \text{ m/h}$ a été calibrée (Garnier *et al.*, 1995 ; Even, 1995). De fait ces modèles ne prévoient pas la possibilité de remises en suspension. Dans le cas du modèle RIVERSTRAHLER, le couplage avec un modèle diagénétique stationnaire qui, *via* une solution analytique des équations, relie directement le flux de carbone sédimenté aux flux d'éléments inorganiques (azote, phosphore, oxygène) échangés à l'interface eau-sédiment, permet même de s'affranchir de la modélisation explicite de la couche de vase (Billen, 1982).

Or, les observations en aval de rejets ont montré une disparition rapide des MES et les vitesses de chute estimées sont plutôt de l'ordre de 1 m/h (Maldiney, 1994 ; Tangerino, 1994 ; Even *et al.*, 2004b) (Fig. 3.3). En dehors des zones d'apport, les concentrations en MES varient peu autour de $15 \pm 5 \text{ mg/L}^{-1}$. En second lieu, d'autres travaux ont montré une contamination permanente de la Seine à partir de dépôts originaires de temps de pluie, mettant en évidence une remobilisation constante des sédiments (Estèbe *et al.*, 1998).

Ces constats ont motivé le développement d'un modèle hydro-sédimentaire explicite dans le modèle PROSE tel que la variabilité des conditions hydrodynamiques en rivière puisse être représentée. En chaque maille de rivière le bilan sédimentaire est alors calculé à partir du bilan (sédimentation - érosion) avec une hypothèse de simultanéité des flux de sédimentation et d'érosion plutôt qu'une représentation classique utilisée pour les sédiments cohésifs, basée sur les seuils critiques d'érosion (Partheniades, 1965). Le schéma conceptuel que j'ai utilisé est très largement basé sur les travaux de Marianne MALDINEY (Maldiney, 1994) qui a réalisé sa thèse dans le cadre PIREN SEINE et qui a été encadrée par Jean-Marie MOUCHEL (CEREVE, ENPC). Les travaux de la thèse de Laurent MARTIN pour leur part ont contribué à expliciter un des facteurs responsables de cette remobilisation et à distinguer différentes zones du fleuve avec des bilans

sédimentaires très contrastés (Martin, 2001). Ce nouveau modèle nécessitait également une représentation explicite de la couche benthique. Tous ces développements se sont révélés très intéressants pour l'analyse de l'impact de RUTPs pour lesquels la question du devenir des dépôts apportés de manière épisodique était posée.

3.3.1 Le modèle explicite de transport particulaire

3.3.2 La sédimentation

La formulation classique $\frac{V_{sed}}{h} C$ pour exprimer le terme de sédimentation a été retenue ; V_{sed} désigne la vitesse de chute [LT^{-1}], h la hauteur d'eau et C la concentration de particules. En l'absence d'une connaissance et d'une quantification précise des facteurs agissant sur le dépôt ou non des particules, on suppose que toute particule qui sédimente, se dépose au fond.

3.3.3 L'érosion

Dans un contexte général prenant en considération le transport de sédiments dans la colonne d'eau, la théorie de la capacité de transport Bagnold (1966), cherche à caractériser la quantité de particules pouvant être transportée par l'écoulement sur la base d'un calcul énergétique. L'hypothèse de base consiste à considérer qu'une partie infime ζ de la puissance P_{hyd} dissipée par l'écoulement est utilisée pour maintenir en suspension des particules :

$$\zeta P_{hyd} = V_{sed} C g \frac{\rho - \rho_{eau}}{\rho} \quad (3.1)$$

où V_{sed} désigne la vitesse de chute, C est la concentration des particules, ρ est la masse volumique des particules, g est l'accélération de la pesanteur. En écoulement permanent, une situation d'équilibre a été mise en évidence expérimentalement pour laquelle la concentration de MES dans l'eau est stable ($C_{équilibre}$). Elle se traduit par l'égalité des flux de sédimentation et d'érosion (F_{ero})

$$F_{ero} = V_{sed} C_{équilibre} \quad (3.2)$$

La combinaison des équations 3.1 et 3.2 pour une situation à l'équilibre conduit à l'expression «énergétique» du flux d'érosion : $F_{ero} = \zeta \frac{\rho_A P_{hyd}}{g(\rho_A - \rho_{eau})}$. Suivant les résultats de Celik et Rodi (1988), P_{hyd} s'exprime simplement en utilisant la formulation de STRICKLER $P_{hyd} = \rho g J U = \rho g \frac{U^3}{K^2 R_H^{4/3}}$; les notations précédentes ont été reprises ; J désigne la pente d'énergie de l'écoulement, U est la vitesse moyenne, K est le coefficient de STRICKLER, R_H est le rayon hydraulique. On suppose que le flux d'érosion calculé pour une situation d'équilibre est également valable en situation transitoire. L'extension de ce modèle à plusieurs classes de particules (désignées par l'indice i) a été réalisé par Maldiney (1994) :

$$F_{ero,i} = \chi_i \zeta \frac{P_{hyd}}{g \sum_i \chi_i \frac{\rho_i - \rho_{eau}}{\rho_i}}$$

où χ_i est la fraction massique du constituant i dans le dépôt. En effet, dans le couplage avec le modèle RIVE, les classes de particules sont le COP (trois classes), les bactéries, le phytoplancton, les MES inorganiques. Chaque classe possède une vitesse chute spécifique (Even *et al.*, 2004b).

3.3.4 Le modèle de réactions dans la vase

Dans les cours d'eau de profondeur importante, le compartiment benthique est davantage constitué de vase. De plus en Seine, les apports sont enrichis en matière organique, conférant des propriétés cohésives à ces sédiments. Cependant, suivant la classification de Mehta *et al.* (1995), qui considère trois types de sédiments : i) les sédiments fluides soumis à l'action permanente de la houle et de cohésion nulle, ii) les

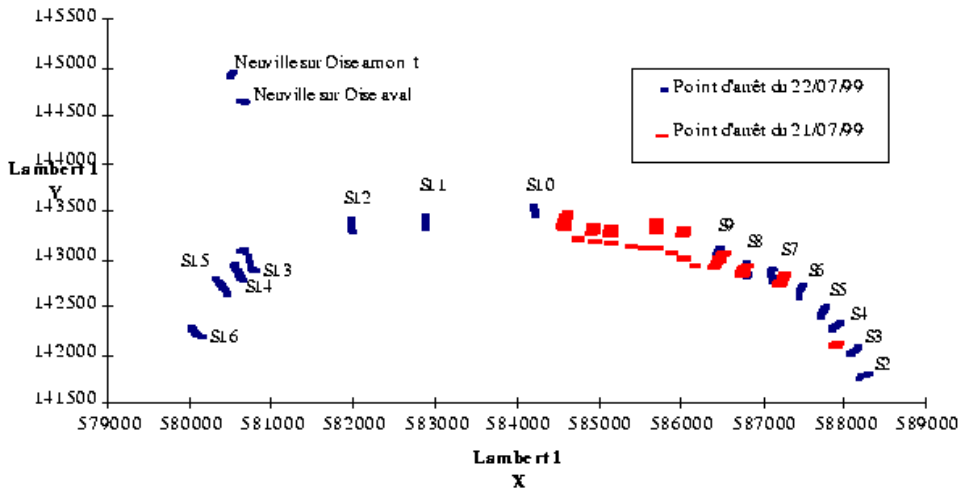


FIG. 3.4 – Positionnement des sites échantillonnés en Seine entre Achères et Andrésy les 21 et 22 juillet 1999; canaux de fuite de la STEP Seine Aval (AchI+II, AchIII et AchIV) après la section S2, entre les sections S3 et S4 et entre les sections S4 et S5; île d’Herblay entre les sections S9 et S10; confluence avec l’Oise entre les sections S13 et S14.

sédiments non consolidés ayant une cohésion non nulle qui apparaît dès que les sédiments ont un âge proche de un jour ; iii) les sédiments consolidés correspondant aux sédiments très anciens, j’ai considéré que l’action permanente des bateaux entretient un stock de vase superficielle fluide. Cette hypothèse a par la suite été confirmée par les résultats de Laurent MARTIN (Martin, 2001). Le sédiment est donc représenté par une seule couche considérée comme homogène et alimentée par la sédimentation des variables particulières de la colonne d’eau (phytoplancton, bactéries, matière organique). Les processus sont identiques à ceux du modèle RIVE ; l’inhibition de certaines réactions par l’absence d’oxygène y est seulement plus fréquente. Le phytoplancton ne se développe pas dans la vase.

Les flux dissous échangés entre la phase aqueuse de la vase «fluide» et la colonne d’eau prennent en compte un terme de diffusion proportionnel au gradient des concentrations entre l’eau interstitielle et l’eau surnageante. La théorie du transfert de masse Christy et Thibodeaux (1982); Boudreau (1997) exprime le fait que la diffusion à la couche limite est la phase limitante de la diffusion à l’interface eau-sédiment. Le flux diffusif à cet interface s’exprime alors sous la forme $\beta(C_{vase} - C_{eau})$, où β est le coefficient de transfert, homogène à $[LT^{-1}]$; il intègre l’épaisseur de la couche limite fonction des caractéristiques de l’écoulement. Une formulation proposée dans la littérature est $\beta = Au_*Sc^n$ où A et n sont des paramètres adimensionnels, à déterminer; u_* est le vitesse de cisaillement au fond $[LT^{-1}]$ et Sc est le nombre de SCHMIDT (adimensionnel). L’échange d’eau liée aux agrégats qui sédimentent ou qui sont érodés a été estimé. Il s’est avéré être négligeable et n’est donc pas pris en compte dans le calcul.

3.4 Résultats

3.4.1 La dynamique sédimentaire

Pendant sa thèse, Laurent MARTIN s’est particulièrement intéressé à l’analyse de la dynamique sédimentaire à l’aval du rejet de la STEP Seine Aval (Achères) (Fig. 3.1). Le secteur étudié s’étend jusqu’au barrage d’Andrésy, près de 10 km en aval du rejet. Dans ce cadre, un suivi de masse d’eau a spécifiquement été organisé en juillet 1999, pendant lequel un échantillonnage tridimensionnel du panache du rejet a été réalisé pour la conductivité et la turbidité (Fig. 3.4) (Martin, 2001; Even *et al.*, 2008a). Les informations

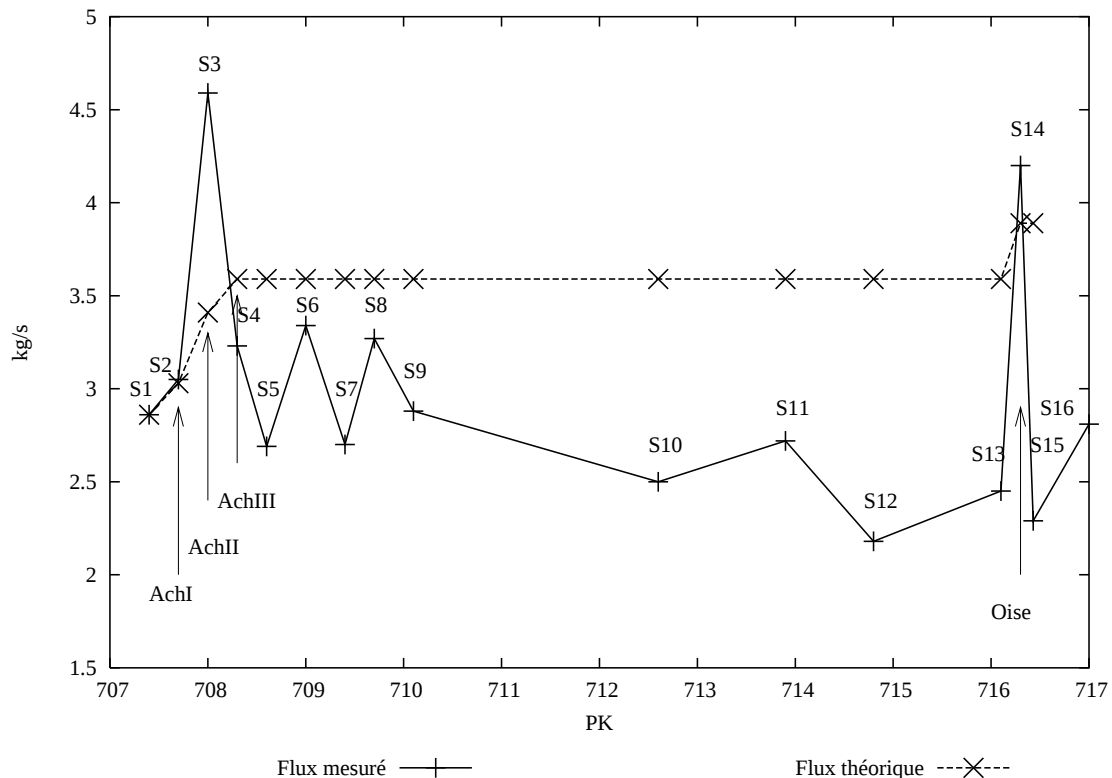


FIG. 3.5 – Flux de MES calculés à partir des suivis du 21 et 22 juillet 1999 en Seine entre Achères et Andrézy (traits pleins) ; comparaison avec le flux théorique conservatif (pas de sédimentation) et compte tenu des apports intermédiaires (Oise, apports de la STEP Seine Aval).

relatives au passage des bateaux ont été soigneusement enregistrées pendant la campagne. Une modélisation bi-dimensionnelle du secteur a été réalisée à l'aide des modèles TELEMAC2D (Hervouet et Van-Haren, 1995)/SUBIEF2D (Martin, 2001).

3.4.1.1 Rôle des bateaux sur la remobilisation des sédiments

Pour chaque section transversale, nous disposons d'une vingtaine de profils verticaux. Pour chaque verticale, une concentration moyenne a été calculée. Pour chaque surface spécifique centrée sur la verticale échantillonnée, un débit spécifique a été calculé à l'aide du modèle TELEMAC2D. L'intégration des flux spécifiques sur la section a permis de calculer des flux transitant par les seize sections échantillonnées (Fig. 3.5). Ces flux «réels» sont comparés aux flux «théoriques» considérés comme les flux conservatifs dans le panache, *i.e.* sans sédimentation ni érosion (Fig. 3.5). Le principal résultat est i) la mise en évidence de remises en suspension après le passage de bateaux (après S5 et après S7), ii) les remises en suspension sont du même ordre de grandeur que ce qui a sédimenté entre chaque passage de bateau (Fig. 3.5) (Martin, 2001; Even *et al.*, 2008a). Après la section S9, la présence de l'île d'Herblay modifie sensiblement le bilan sédimentaire (Martin, 2001).

3.4.1.2 Zonation du fleuve en fonction de la dynamique des sédiments

Le modèle de transport sédimentaire développé dans PROSE a été intégré au modèle de transport SUBIEF2D et complété pour représenter explicitement les bateaux (Martin, 2001). La dispersion a été calibrée à l'aide du signal de conductivité (Martin, 2001). Pour la calibration et la validation du modèle, se reporter également à Martin (2001). La comparaison des bilans sédimentaires dans le bief de 12 km avec, respectivement sans navigation, montre que 31 %, respectivement 72 %, du flux amont reste stocké dans le bief

pour le débit étudié ($135 \text{ m}^3/\text{s}$). Par ailleurs un tiers des dépôts ont lieu dans les bras d'île non navigués. Une autre aire de dépôt est l'aval immédiat des rejets.

3.4.1.3 Les implications

Nos résultats ont permis de mettre en évidence un facteur essentiel de la remobilisation des sédiments, à savoir la navigation. Dans PROSE, un terme énergétique supplémentaire a été ajouté. Il est considéré comme constant et permanent. La remobilisation des sédiments, quasi permanente dans les secteurs navigués, influence la dispersion des polluants qui sont liés aux MES (Even *et al.*, 2008a). Elle nous conduit à modifier la vision plus classique, introduite par le concept des seuils critiques d'érosion, avec une sédimentation en période de bas débit et une érosion en crue (Even *et al.*, 2008a). En dernier lieu, nous avons mis en évidence des zones ayant des dynamiques sédimentaires très différentes entre l'aval des rejets, les bras non navigués et les bras navigués (Even *et al.*, 2008a).

3.4.2 Les impacts de rejets urbains de temps de pluie

Après que Marc DELBEC au cours de sa thèse (non publiée) ait mis en évidence l'incapacité des modèles simplement basés sur la DBO_5 à représenter systématiquement les déficits en oxygène en aval de RUTPS, le modèle PROSE a été utilisé pour analyser les nombreux processus susceptibles d'influencer les déficits en oxygène dans le panache de RUTPS (Even *et al.*, 2004b). Le modèle PROSE, disposant d'un modèle hydrodynamique et d'une représentation explicite du transport de particules, était particulièrement adapté pour cet exercice. La question à laquelle je me suis plus particulièrement intéressée a été celle de la relation quantitative entre les rejets épisodiques par temps de pluie et les déficits en oxygène, temporaires ou chroniques, observés à la traversée de Paris. La modélisation, du fait de sa capacité d'intégration, m'a permis de creuser la question des différentes échelles de temps de ces impacts et de mettre en évidence leur nature multiple.

3.4.2.1 Les processus dans le panache d'un rejet urbain de temps de pluie

Les informations acquises par Martin SEIDL pendant sa thèse ont été particulièrement exploitées (Seidl, 1997). Elles comprennent tant les suivis *in situ* permettant de caractériser le milieu en dehors des événements pluvieux, que la qualité des eaux déversées et le suivi de la qualité de l'eau dans le panache après déversement (Seidl *et al.*, 1998c,b). Le secteur modélisé et particulièrement analysé couvre la Seine depuis Choisy-le-Roi jusqu'à Chatou et la Marne depuis Neuilly-sur-Marne.

Le déficit en oxygène dans le panache est essentiellement déterminé par la charge en CODB contrairement au COPB (Even *et al.*, 2004b) ; à l'instar de Harremoes (1982), les résultats de modélisation ont mis en évidence un effet différé dû aux dépôts de COPB visible pendant plusieurs heures, voire une journée, après le passage du panache. La charge de bactéries apportées par les rejets (Seidl *et al.*, 1998b) joue également un rôle important mais leur développement reste très fortement contrôlé par les processus de dépôt (Even *et al.*, 2004b). La consommation d'oxygène lors de la dégradation du CODB augmente de 25 % le jour de l'événement pluvieux. L'augmentation de la couverture nuageuse provoque une baisse de l'activité photosynthétique (-20 %), sachant que dans ce secteur et la veille de l'événement, la production d'oxygène par photosynthèse couvre environ 50 % de l'oxygène consommé par respiration bactérienne. L'effet toxique des rejets sur l'activité photosynthétique, mis en évidence par d'autres auteurs tels que Legovic (1997), a été quantifié par Seidl *et al.* (1998a). Cet effet a été introduit dans PROSE. L'effet simulé jusqu'à Chatou reste faible. Nous montrons cependant un développement de l'effet toxique plus lent que le développement de l'activité bactérienne. En nous limitant au secteur en amont de Chatou, nous avons donc sans doute sous-estimé cet impact. De plus, sachant que les concentrations en chlorophylle *a* étaient de l'ordre de $10\text{--}15 \mu\text{g/L}$ la veille de l'événement étudié et, étant donné que des concentrations supérieures à $100 \mu\text{g/L}$ existent à d'autres moments, nous montrons ainsi le rôle prépondérant que peuvent jouer des facteurs exogènes tels que l'activité phytoplanctonique dans le développement de déficits en oxygène en aval de RUTPS. Ces facteurs exogènes sont potentiellement très variables. En dernier lieu la qualité des eaux déversées peut également varier, comme le montre un recensement récent d'informations pour l'agglomération rouennaise

(Even *et al.*, 2007a). L'amélioration de la prédiction des déficits en oxygène en aval des rejets va donc de paire avec l'acquisition de données de plus en plus fiables sur les rejets.

3.4.2.2 Impact de plusieurs rejets urbains de temps de pluie

En 2003, lors de la mise en œuvre de la DCE sur le bassin de la Seine, l'AESN a préconisé l'utilisation des modèles développés dans le cadre du PIREN SEINE pour faire l'état des lieux de la qualité des cours d'eau. Le modèle PROSE a été utilisé pour la Seine entre Paris et Poses et les scénarios incluent tant les rejets permanents de temps sec que les RUTPs. Pour la description des scénarios et des données, se reporter à Even *et al.* (2007d). Les RUTPs y sont représentés de manière schématique mais tout à fait réaliste et statistiquement plausible. Jusqu'à la fin des années 1990, les apports en DBO₅ par les RUTPs dans Paris représentaient 35 % des apports totaux à l'échelle annuelle (situation année sèche) (Even *et al.*, 2007d).

Le résultat essentiel, et tout à fait original, est d'avoir pu montrer que les RUTPs dans leur ensemble étaient responsables de dépôts benthiques qui perdurent suffisamment de temps pour générer des consommations d'oxygène pendant toute la période estivale. De plus, leur caractère diffus leur confère une emprise spatiale importante. D'après le modèle, en juin et juillet 1996 (année sèche de référence), un déficit en oxygène moyen de 1,3 mgO₂L⁻¹ serait dû à la présence de RUTPs. Toujours d'après le modèle, 20 % de la consommation d'oxygène pendant le mois de juillet, dans le bief de 50 km étudié entre la confluence avec la Marne et Chatou, est due à la respiration benthique en présence de RUTPs (Even *et al.*, 2007d). Nous montrons également que la production nette d'oxygène par le phytoplancton couvre jusqu'à 100 % de la consommation bactérienne permanente dans la colonne d'eau. Ainsi l'eutrophisation i) masque les effets dus à des charges importantes en CODB (apports urbains, apports amont tels que décrits au chapitre 2), ii) fragilise le milieu en cas de mortalités brutales de cette biomasse. Les échanges réactifs sont importants : à l'échelle du mois de juillet 1996, les processus de production d'oxygène équilibrent les processus de consommation et, en valeur absolue, ils représentent 112 % du flux amont.

3.5 Conclusion

Nos résultats ont permis de mettre en lumière le rôle des échanges benthiques. De nombreux développements ont été nécessaires par rapport aux pratiques courantes dans le domaine de la modélisation de la qualité de l'eau. En retour, la prise en compte de la dynamique des contaminants liés aux particules ajoute une exigence supplémentaire quant au rendu des échanges sédimentaires. Cependant bien que les résultats obtenus aient permis des avancées dans la compréhension des processus, certaines hypothèses sont aujourd'hui mises en défaut ; ainsi en est-il de l'hypothèse d'une couche de vase fluide non consolidée considérée comme homogène. En effet, malgré le remaniement important par les bateaux, certains secteurs ont été clairement identifiés comme des zones de dépôt net permanent (aval de rejets, bras non navigués). Dans ces zones, l'accumulation importante de sédiments sur des périodes supérieures à la journée i) invalide l'hypothèse de vase non consolidée, ii) l'hypothèse de l'homogénéité. En effet, dès que les épaisseurs sont importantes, les gradients de concentrations particulièrement prononcés à la surface des sédiments sont essentiels pour les échanges. Les améliorations et travaux de validation doivent donc se poursuivre.

La dynamique de l'oxygène, constituant vital qui intervient dans de nombreux processus, a été plus particulièrement analysée. Or après le barrage de Chatou, la récupération est rapide à cause de la réoxygénation au barrage et la réaération air-eau. Or ce n'est pas le cas pour d'autres contaminants (micropolluants) apportés par les différents rejets. Les dynamiques complexes mises en évidence : remobilisation sédimentaire importante, grande quantité de matière organique naturelle biodégradable, sont autant de facteurs qui peuvent influencer la diffusion voire la toxicité des contaminants organiques ou métalliques (Gourlay *et al.*, 2005b,a; Gourlay, 2004; Thouvenin *et al.*, 2007a). Cependant, malgré la grande réactivité et capacité de récupération de l'oxygène, nous montrons que 50 km de la Seine à la traversée de Paris sont affectés. Cette emprise spatiale n'est pas négligeable à l'échelle des masses d'eau de la DCE.

Les RUTPs de l'agglomération parisienne sont en passe d'être maîtrisés d'ici les dix ans à venir. Le modèle PROSE a été utilisé en 2006-2007 par le SIAAP dans le cadre de l'optimisation des aménagements. Il est utilisé en routine par le SIAAP pour réaliser les études d'impact des mises en chômage. Il reste cependant intéressant et important de continuer l'exploitation des observations *in situ* pour continuer de

valider les processus et quantifier les relations pressions humaines/impacts. Les réseaux de mesures se complètent, les rejets sont de mieux en mieux connus. Pour l'étude réalisée en 2003, l'année 1996 était l'année sèche de référence. L'année 2003 est elle-même une année sèche intéressante prise depuis comme nouvelle année de référence. Or ces deux années qui ont des débits moyens annuels du même ordre de grandeur ($335 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1996 et $386 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2003) ont des régimes de crue très différents. Outre les facteurs humains, l'influence des variabilités naturelles doit également être étudiée.

Chapitre 4

L'estuaire « réacteur » et le milieu côtier

4.1 Introduction

Les questions relatives aux impacts des rejets de l'agglomération parisienne, au devenir de la matière organique particulaire et au développement de l'eutrophisation m'ont conduite à poursuivre mes travaux dans l'estuaire de Seine, dans le cadre du programme SEINE-AVAL. Pendant la première phase du programme (1995-1999), dans le cadre du thème « *microbiologie et oxygénation* », coordonné par Gilles BILLEN, j'ai contribué aux recherches portant sur l'analyse des processus responsables des désoxygénations chroniques dans la partie eaux douces de l'estuaire (en amont de Caudebec, Fig. 4.1). Ces travaux ont notamment donné lieu à un fascicule auquel j'ai contribué (Billen *et al.*, 1999). Je me suis basée sur le modèle *SiAM1D*, développé à l'IFREMER et auquel j'ai couplé le modèle de processus RIVE. Le modèle *SiAM1D*-RIVE est présenté dans le fascicule Thouvenin *et al.* (1999) dont je suis un des auteurs. Cependant, ce modèle monodimensionnel n'était pas valide au-delà de Caudebec, notamment dans la ZMT où l'élargissement et les gradients verticaux deviennent trop importants (Fig. 4.1). Or la ZMT constitue une zone où le temps de séjour des particules est long par rapport au temps de séjour dans le reste de l'hydrosystème. Entre Paris et Poses, le temps de transfert est d'au maximum trois semaines. Dans le modèle RIVERSTRAHLER, un temps de transfert de dix jours est compté pour les hydrosystèmes amont. J'ai pu calculer à l'aide du modèle *SiAM3D* (Cugier et Le Hir, 2000; Le Hir *et al.*, 2001) que l'âge moyen des particules à Honfleur (Fig. 4.1), où est centré la ZMT, atteint huit mois pour l'année 2001 (Even, 2004). Cette zone, où les circulations favorisent le piégeage des particules, est donc propice à leur transformation. Concernant le COP on a vu que sa faible réactivité faisait qu'il était peu transformé dans le système fluvial. Dès la deuxième phase (2000-2003), puis durant la troisième phase du programme SEINE-AVAL (2004-2007) je me suis focalisée sur la dynamique du bouchon vaseux dans le cadre du groupe de travail « *Cycle de la Matière organique en Estuaire de Seine (CYMES)* », coordonné par Josette GARNIER (UMR SISYPHE). L'objectif du groupe de travail était de rechercher les causes des teneurs élevées en carbone dans les MES de la ZMT (Garnier *et al.*, 2008) (article auquel j'ai contribué). J'ai alors spécifiquement couplé les modèles *SiAM3D* et RIVE. Au-delà des questions posées par l'ensemble de la communauté scientifique du programme Seine Aval, je me suis personnellement intéressée aux cycles des éléments nutritifs dans la ZMT. En effet ce sont les rapports relatifs entre les différents éléments nutritifs qui déterminent en premier lieu les espèces d'algues qui se développent et notamment l'apparition des algues toxiques (Officer et Ryther, 1980; Conley *et al.*, 1991; Cugier *et al.*, 2005a). Or le phosphore a une propension à s'adsorber sur les particules (Andrieux-Loyer, 1997) contrairement aux espèces azotées tandis que la silice, liée aux diatomées, subit des processus de sédimentation et reminéralisation. Il est donc important d'analyser dans quelle mesure les rapports entre les éléments nutritifs majeurs sont modifiés par le séjour dans un estuaire (Ragueneau *et al.*, 2002b).

4.2 Le site et le contexte

L'estuaire de Seine est délimité à l'amont par le barrage de Poses. La distance entre Poses et la fin des endiguements qui marquent la limite aval de la zone de divagation de la ZMT en période de bas débit, est de

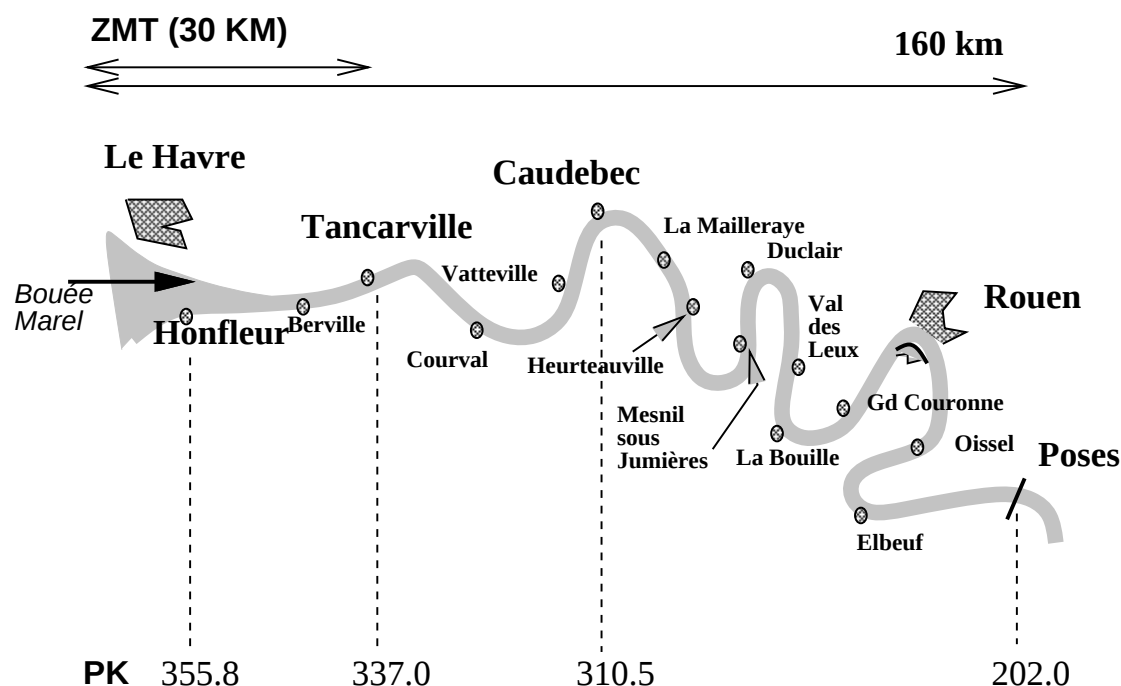


FIG. 4.1 – Carte de l'estuaire de Seine, modélisé à l'aide du logiciel siAM3D-RIVE ; ZMT : Zone de Maximum de Turbidité ; PK : Point Kilométrique avec référence 0 au Pont-Marie dans Paris.

l'ordre de 160 km. Les ports fluvial (Rouen) et maritime (Le Havre) sont des secteurs très industrialisés et ont été à l'origine de nombreux aménagements qui se poursuivent encore aujourd'hui. Ces deux urbanisations totalisent 640 000 habitants. La ZMT où se trouve également le gradient de salinité, remonte jusqu'à Caudebec pour les très bas débits. La charge annuelle moyenne de MES transitant à Poses est de 650 000 t. La concentration moyenne de MES est de 20 mg L^{-1} à Poses et atteint $1\text{-}2 \text{ g L}^{-1}$ dans la ZMT. L'amplitude des marées varie entre 3 et 7 m à Honfleur et 1 et 2 m à Poses. Le temps de résidence moyen de l'eau entre Poses et Honfleur varie de dix-sept jours à $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à six jours à $1\,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Le Hir *et al.*, 1999).

Paris est situé près de 200 km en amont de Poses ; la STEP Seine Aval est quant à elle localisée 130 km en amont de Poses, ce qui explique que les impacts de l'agglomération parisienne aient été étudiés jusque dans l'estuaire (Billen *et al.*, 1999; Garnier *et al.*, 2001).

4.3 Les bases de données et les modèles

De nombreuses mesures effectuées par le Service de la Navigation de la Seine (SNS) depuis le début des années 1970 existent à Poses, tant pour le débit que pour la qualité physico-chimique de l'eau. Depuis 1996 des sondes y suivent la turbidité et l'oxygène avec un pas de 10 mn, ainsi que la chlorophylle *a* depuis le début des années 2000. Ces informations ont servi à forcer le modèle siAM3D-RIVE à la limite amont fixée à Poses ; elles ont été complétées par des résultats du modèle PROSE pour les variables non suivies en routine (biomasses bactériennes, fractionnement de la matière organique). De nombreux autres sites sont suivis par le SNS (Fig. 4.1) à des fréquences variables. Pour plus de détail sur les informations utilisées pour valider les résultats du modèle, se reporter aux articles (Even *et al.*, 2007e, 2008b). Des campagnes de suivi relatives au cycle de la matière organique ont également été organisées dans le cadre de SEINE-AVAL entre 2001 et 2003 (Servais et Garnier, 2006; Garnier *et al.*, 2003). Ces données ont été largement exploitées.

La base de données de apports intra-estuariens a fait l'objet d'un bilan minutieux pour lequel de nombreuses sources d'informations ont été utilisées, croisées, comparées. Cela concerne tant les apports par les affluents, que les rejets permanents de temps sec venant des STEPS ou des industries (Even *et al.*, 2006b) ou

les RUTPs (Even *et al.*, 2007a). Ce dernier bilan se base essentiellement sur les travaux de stage ingénieur de Jean-François HARVIER que j'ai initié et encadré (Harvier, 2006).

Les modèles couplés *SiAM1D-RIVE* et *SiAM3D-RIVE* utilisés successivement sont décrits dans plusieurs publications personnelles ou auxquelles j'ai été associées : Thouvenin *et al.* (1999), Even *et al.* (2007e), Even *et al.* (2008b). Le modèle *SiAM1D-RIVE*, forcé à l'aval par les mesures à Honfleur n'est valide que jusqu'à Caudebec ; le modèle *SiAM3D-RIVE* finalement utilisé s'étend très au large dans la baie de telle manière que la sensibilité aux conditions limites aval soit réduite. Cette version «étendue» a été spécifiquement développée par Bénédicte Thouvenin (Thouvenin *et al.*, 2007b).

4.4 Résultats

La version tridimensionnelle du modèle couplé *SiAM3D-RIVE* a été utilisée pour étudier le cycle du carbone dans le secteur de la ZMT. Les années 2001 à 2003 ont servi à la validation puis l'analyse. Elles couvrent un large panel de contextes hydrologiques (débit moyen annuel à Poses de $890 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 2001, $386 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 2003). Les résultats de la modélisation sont présentés et discutés dans Even *et al.* (2008b). Pour les éléments nutritifs, dont la dynamique dans le panache influence fortement la dynamique du carbone organique, se reporter au rapport technique Even *et al.* (2007a).

Le comportement du carbone organique et le rôle des pressions anthropiques ont été étudiés en estuaire Seine, comme cela a été réalisé dans neuf autres estuaires (Abril *et al.*, 2002). En Seine le ratio COP/MES moyen est supérieur à 4 % quand il n'est que de 1,5 % en Gironde ou 3,3 % en Loire (Abril *et al.*, 2002; Etcheber *et al.*, 2007). Les raisons de cette valeur élevée ont été activement recherchées. Garnier *et al.* (2008) grâce à une modélisation simplifiée assimilant la ZMT à un réacteur homogène, ont montré l'importance prépondérante des apports de l'agglomération parisienne, par rapport au phytoplancton, dans les teneurs en COP des MES de la ZMT de la Seine : une réduction d'un facteur trois de la biomasse phytoplanctonique à l'entrée de l'estuaire conduirait à une réduction de 0,2 % du ratio COP/MES dans la ZMT contre 2 % pour une réduction d'un facteur deux du carbone organique non phytoplanctonique. C'est le caractère plus réfractaire de ce COP qui explique sa rémanence. La contribution des effluents urbains au flux de COP non phytoplanctonique à Poses représente près de 50 % (Even *et al.*, 2006a). Ces scénarios de réduction ne sont pas réalistes mais permettent de montrer les sensibilités relatives de différents facteurs.

La modélisation avec *SiAM3D-RIVE* a permis une intégration temporelle qui montre que la contribution du phytoplancton, importante à certaines périodes, ne perdure effectivement pas au-delà de quelques mois (Even *et al.*, 2008b) (bilans sur trois mois estivaux), ce résultat étant conforme aux observations de Servais et Garnier (2006). Le développement d'algues est cependant responsable d'un découplage entre la dynamique des MES et celle du COP. Les variations saisonnières des teneurs en COP des MES sont donc élevées (Even *et al.*, 2008b; Etcheber *et al.*, 2007). À Poses, pour les quatre années 1996, 2001, 2002 et 2003, 80 à 90 % du flux annuel de MES arrive en période de crue (débit supérieur à $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Even *et al.*, 2008b); pour les deux années 1996 et 2001 pour lesquelles les mesures de COP étaient encore réalisées, les flux hivernaux et en crue ne dépassent pas 40 % du flux annuel. Par ailleurs les flux annuels de MES varient d'un facteur dix entre l'année la plus humide et l'année la plus sèche ; le rapport n'est que de deux pour le COP. La période de bloom algal, qui se produit au printemps dès que les débits commencent à baisser, explique ce phénomène. Si l'analyse des flux à Poses est basée essentiellement sur les observations, c'est la modélisation qui a permis de quantifier un phénomène analogue à l'aval (Even *et al.*, 2008b). En période de bas débit, la ZMT est cantonnée entre Caudebec et la fin des endiguements. Les échanges de MES avec la baie sont alors réduits. Cependant le bilan des échanges entre la baie et la ZMT en présence d'algues montre une alimentation importante de la ZMT en biomasse algale ou produit de la lyse (entre 70 et 350 % du flux de COP à Caudebec pendant les trois mois de bilan) (Even *et al.*, 2008b). Les teneurs moyennes en COP/MES simulées (21 %) à l'aval de la ZMT sont du même ordre de grandeur que les teneurs observées dans le site de suivi du Réseau National de Bassin qui a été localisé dans le panache de la Seine (20 %) (Even *et al.*, 2008b).

4.5 Conclusion

Tant les bilans basés sur les campagnes que le modèle simplifié LIFT utilisé par Garnier *et al.* (2008) ne prennent pas en compte les flux échangés à l'aval, que seule une modélisation tridimensionnelle telle que celle réalisée avec SiAM3D-RIVE rend possible. Plus généralement le raisonnement est souvent orienté dans le sens des apports du fleuve au milieu côtier et le rôle des estuaires est tout simplement négligé (Delhez et Carabin, 2001; Lancelot *et al.*, 2002). Or un de mes principaux résultats est de mettre en évidence des flux importants de carbone venant du milieu côtier et piégé dans la ZMT. Outre l'importance de ce stock du point de vue du COP et des conséquences sur la dynamique d'autres variables (contaminants), son rôle sur le recyclage des éléments nutritifs doit être étudié plus avant. Ragueneau *et al.* (2002a), en rade de Brest, ont mis en avant le rôle prépondérant que pouvait jouer le recyclage *in situ* de la silice par le biais d'espèces benthiques envahissantes. Ce processus contribuerait à la prévention des effets catastrophiques de l'eutrophisation que sont les développements d'algues toxiques. Par un biais différent, le piégeage en place des biomasses algales pourrait donc jouer un rôle équivalent. Le rôle des vasières intertidales et les échanges avec la colonne d'eau doivent être mieux quantifiés. En effet Struyf *et al.* (2006) ont pu mettre en évidence le rôle important des zones humides intertidales dans le recyclage de la silice biogénique. En estuaire de Seine, Deloffre *et al.* (2006) ont quant à eux pu montrer grâce à des suivis topographiques à haute-fréquence d'une vasière intertidale que l'équivalent de 25 à 40 % du stock maximal de MES estimé dans la ZMT est régulièrement remanié sur cette vasière, mais que les échanges effectifs avec les MES de la ZMT ne sont que de l'ordre de 1 %. Cependant compte tenu de cette dynamique importante, la contribution des vasières vis à vis des espèces dissoutes reste à évaluer. De manière générale les connaissances sur le cycle de la silice doivent être améliorées, cette variable ayant été beaucoup moins étudiée que le phosphore ou l'azote. Parmi les processus intéressants, des travaux récents ont montré le rôle prépondérant de la salinité et du pH sur l'augmentation de la cinétique de dissolution de la silice biogénique, qui serait de l'ordre de cinq fois plus rapide en milieu marin (Loucaides *et al.*, 2008). Les recherches doivent se poursuivre pour valider et conforter ces résultats préliminaires et poursuivre l'analyse des conséquences sur les phénomènes d'eutrophisation côtière. Outre l'importance sur le développement des algues toxiques, les aménagements en cours à l'échéance 2015 pour la réduction des effluents devraient conduire à des seuils limitants pour le phosphore (Cugier *et al.*, 2005a; Even *et al.*, 2007e). Ces conclusions augmentent l'exigence en terme de prévision des flux en éléments nutritifs au milieu côtier. Quant à l'azote, les zones de dénitrification sont encore à rechercher (flocs, zones humides, sédiments) et à quantifier.

Chapitre 5

Les modèles de bassin pour la gestion

5.1 Introduction

Les modèles sont des outils d'analyse précieux pour l'amélioration des connaissances ; ils sont également des outils de synthèse qui permettent de diffuser les acquis scientifiques aux gestionnaires. Une position que j'ai donc occupée tant dans le cadre du PIREN SEINE que du programme SEINE-AVAL se situe à l'interface entre la recherche et la diffusion des outils vers les gestionnaires. Le continuum terre-mer est le niveau auquel se situent les enjeux actuels de la gestion des systèmes (Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC)). Depuis les années 1980, les scientifiques cherchent à développer des approches du fonctionnement biogéochimique des hydrosystèmes à l'échelle des bassins (Vannote *et al.*, 1980; Danish Hydraulic Institut (DHI), 2006; Smitz *et al.*, 1999; Rousseau *et al.*, 2000). Cet objectif reste encore un enjeu aujourd'hui (Jorgensen, 2008). En plus des modèles de processus qui doivent intégrer les spécificités de chaque sous-système, il convient de bien décrire le contexte hydrodynamique (Jorgensen, 2008). Au cours des trois chapitres précédents j'ai illustré mes contributions à l'amélioration des connaissances du fonctionnement de sous-systèmes spécifiques. Ainsi le modèle de processus RIVE, spécialement conçu pour rendre compte des variations de forçage sur les processus, a été complété par des compartiments benthiques et couplé à des modèles hydrodynamiques et de transport sédimentaire spécifiques aux rivières et estuaires. Au panel des modèles PROSE et SIAM3D-RIVE il convient d'ajouter le modèle RIVERSTRAHLER (Billen *et al.*, 1994; Garnier *et al.*, 1995; Billen et Garnier, 1999; Billen *et al.*, 2001) développé dans le cadre du PIREN SEINE par les équipes conceptrices du modèle RIVE, basé sur la description idéalisée des cours d'eau par ordre de STRAHLER (Strahler, 1957). Cette représentation permet de simuler simplement un réseau hydrographique et, en remontant très à l'amont, de s'affranchir des conditions limites amont. Les résultats ne sont cependant significatifs qu'à l'exutoire de bassins importants. L'homogénéité des concepts adoptés entre les modèles développés dans le PIREN SEINE et le programme SEINE-AVAL leur permet d'échanger des informations et a contribué au développement d'une chaîne de modélisation tout à fait originale.

Il est également nécessaire dans un contexte de gestion de remonter aux activités humaines responsables des impacts. Or elles ne se limitent pas à des apports ponctuels d'effluents urbains ou d'industries, mais elles intègrent également l'occupation des sols (imperméabilisation, zones agricoles). Le modèle SENEQUE est donc le modèle RIVERSTRAHLER couplé à un SIG permettant d'intégrer l'occupation des sols (Ruelland et Billen, 2002; Ruelland *et al.*, 2007). Dans ce chapitre je discute les apports et les enseignements de deux approches de modélisation spatialisée auxquelles j'ai contribué, à l'échelle du bassin du Grand-Morin d'une part (Flipo *et al.*, 2007c,b), à l'échelle du bassin de la Seine d'autre part (Cugier *et al.*, 2004; Even *et al.*, 2004c,d, 2007e,b). Ces modélisations permettent de révéler les enjeux futurs de la gestion des écosystèmes.

L'utilisation quotidienne de l'outil PROSE par moi-même ou par des organismes extérieurs (Chap. 10) m'a fortement sensibilisée à l'enjeu que représentent les interfaces utilisateurs. Dans ce cadre j'ai contribué à initier un projet original de développement d'un Générateur Automatique de (Belles) Interface (GABI) à partir de l'analyse des grammaires des programmes de lecture de données en collaboration avec TÉLÉCOM BRETAGNE. Outre les développements que j'ai moi-même réalisés, j'ai co-encadré deux stages : Paquin

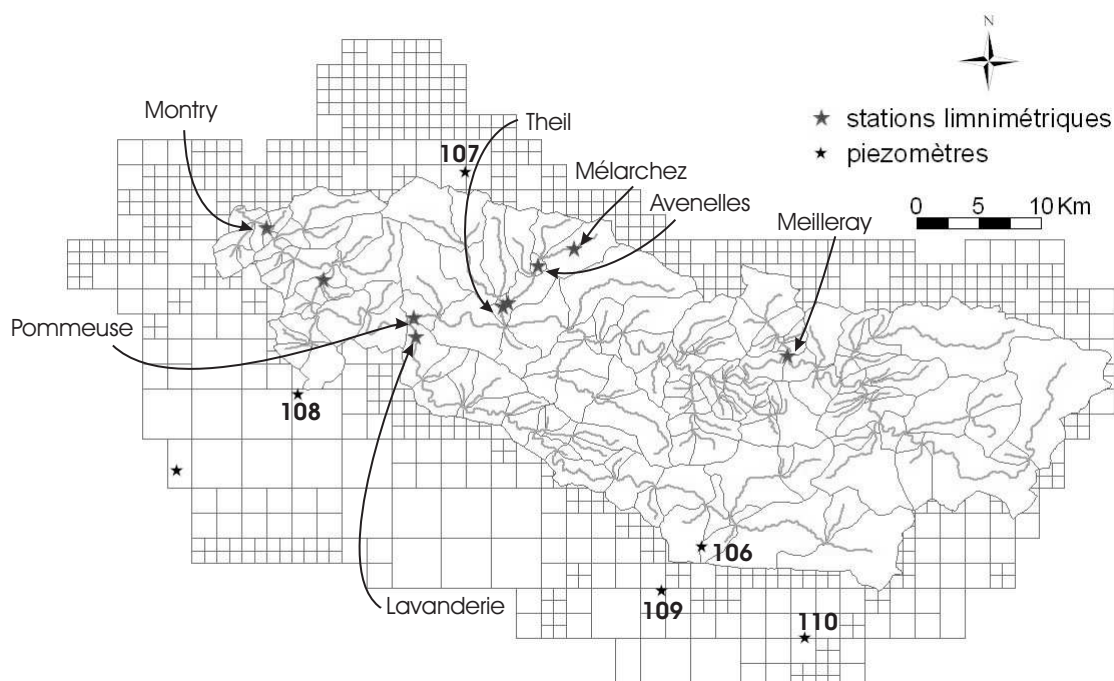


FIG. 5.1 – Points de contrôle (stations hydrométriques et piezométriques) sur le bassin de Grand Morin.

(2005), Eldine (2006).

5.2 Modélisation spatialisée du bassin du Grand-Morin

Les nitrates sont la principale forme d'azote qui soutienne l'eutrophisation. Les travaux de thèse de Nicolas FLIPO avaient pour objectif d'estimer i) l'évolution sur le long terme de la contamination des hydrosystèmes (aquifères, rivières) par les nitrates, ii) localiser et comprendre les processus de transformation de cette variable.

5.2.1 Le modèle couplé CawaQS

Pour la description du modèle couplé NEWSAM (Ledoux *et al.*, 1984; Levassor et Ledoux, 1996)/STICS (Brisson *et al.*, 1998)/PROSE (Even *et al.*, 1998; Even, 2008), nommé CawaQS, voir (Flipo, 2005; Flipo *et al.*, 2007a, 2004a). L'ensemble du bassin du Grand-Morin, décrit au chapitre 2, a été modélisé (Fig. 5.1). Le calage du modèle hydrologique a été réalisé pour la période 1977-1996; la validation a été effectuée pour la période 1996-2001 (Flipo, 2005; Flipo *et al.*, 2004a). Le modèle de nitrates dans les aquifères a été initialisé et validé en utilisant la technique géostatistique de krigeage (Flipo *et al.*, 2007b). La validation a eu lieu sur la période 1976-1989 (initialisation avec les données krigées en 1977 et validation avec la situation 1988). Les évolutions des concentrations de nitrates ont été caractérisées entre 1988 et 1996.

5.2.2 Résultats

5.2.3 Les apports diffus de nitrates

La modélisation multicouches des aquifères devait permettre de rendre compte de la contamination des cours d'eau par des aquifères ayant des niveaux de contamination différents. D'après Puckett (2004), ce phénomène étant rarement explicité cela conduit à une mauvaise interprétation des observations et des processus. Ainsi le principal résultat de notre modélisation hydrologique à l'aide du modèle couplé CawaQS a été de montrer que les infiltrations dans chaque couche géologique (Oligocène, Éocène) sont du même ordre de grandeur. Par contre les cours d'eau sont alimentés en moyenne à 22 % (38 % au maximum en année humide) par l'Oligocène et à 78 % (98 % au maximum en année sèche) par l'Éocène (Flipo, 2005). Les simulations incluant les nitrates montrent de plus que les deux aquifères ont des concentrations moyennes différentes : 11 mgN L^{-1} pour l'Oligocène et $8,9 \text{ mgN L}^{-1}$ pour l'Éocène. Sur la période considérée (1988-1996), la contamination en nitrates de l'Oligocène augmente plus vite ($0,2 \text{ mgN L}^{-1} \text{ an}^{-1}$) que dans l'Éocène ($0,09 \text{ mgN L}^{-1} \text{ an}^{-1}$) (Flipo, 2005). Ces résultats sont tout à fait cohérents avec ceux obtenus par Gomez (2002) qui a travaillé sur l'ensemble du bassin de la Marne.

Pour la période 1988-1996, le flux moyen de nitrates infiltré sous la zone racinaire est estimé à $2\,500 \text{ kgN km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (Flipo, 2005). Entre 1991 et 1996 nous disposons des suivis intensifs de nitrates réalisés par la CGE tant dans les cours d'eau (de l'ordre de 250 échantillons par station sur cinq ans) que dans les aquifères. Une simulation de toute la période ne prenant en compte que le transport passif des nitrates dans les cours d'eau a été réalisée. La comparaison avec les observations met en évidence des pertes globales en nitrates de l'ordre de 30 % du flux exporté à l'exutoire du bassin. Sur la totalité du bassin, les pertes moyennes sont ainsi estimées à $670 \text{ kgN km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (770 tN an^{-1}), soit 20 % du flux infiltré à partir de la zone sous-racinaire (Flipo *et al.*, 2007a). Étant donné que la dilution dans l'aquifère est faible et que les prélèvements par les producteurs primaires dans les cours d'eau sont négligeables, ces pertes de nitrates sont essentiellement attribuées à la dénitrification (Flipo *et al.*, 2007a).

5.2.4 La spatialisation des pertes de nitrates

Les localisations possibles de la dénitrification sont multiples : zones humides, zones hyporhéiques, plaines alluviales, dénitrification dans les cours d'eau. La difficulté de caractériser séparément et de quantifier le rôle de chaque compartiment conduit beaucoup d'auteurs à attribuer la totalité du flux de dénitrification non explicité à un compartiment mal défini, soit associé aux cours d'eau eux-mêmes (Seitzinger *et al.*, 2002) soit à la zone riparienne (Billen et Garnier, 1999). De nombreux travaux ont été réalisés dans le cadre du PIREN SEINE sur cette question. Le raisonnement présenté ici est intégralement tiré de (Flipo *et al.*, 2007a) :

la dénitrification dans les aquifères Grâce à des marqueurs isotopiques, Sebilo (2003) a montré que la dénitrification dans les aquifères était négligeable ;

la dénitrification dans les zones ripariennes Les observations montrent une décroissance des concentrations en nitrates mesurées dans la rivière entre Pommeuse et Villiers (Fig. 2.1) de l'ordre de $0,2 \text{ mgN L}^{-1}$. Cette décroissance est expliquée par la dilution des eaux du Grand-Morin (concentrations entre 5 et 6 mgN L^{-1}) avec les eaux de l'aquifère drainé dans ce secteur dont les concentrations sont particulièrement faibles ($0,2$ à $0,5 \text{ mgN L}^{-1}$ selon les mesures de nitrates dans l'aquifère réalisées par la CGE). Ces mesures mettent en évidence un potentiel de dénitrification important dans la nappe alluviale ;

la dénitrification dans les cours d'eau Le modèle PROSE permet de représenter le prélèvement d'azote par les producteurs primaires et prend en compte les rejets d'azote par les rejets urbains, la transformation de l'ammoniaque en nitrate et la dénitrification. La comparaison des concentrations observées et simulées pour l'ammoniaque montre la capacité du modèle à rendre compte de la nitrification, essentiellement benthique, importante dans ce secteur (Flipo, 2005). Cependant la production de nitrates simulée par le modèle y est trop importante. L'excédent de nitrates calculé par le modèle équivaut aux nitrates produits par nitrification. Le modèle sous-estime donc l'élimination de ces nitrates au niveau benthique. En effet des mesures *in situ* avec une micro-sonde ont permis de mettre en

évidence la présence de la dénitrification dans le biofilm (Flipo *et al.*, 2007c). Nous pouvons avancer que l'équivalent des nitrates produits par la nitrification sont consommés dans le biofilm. Quant au flux de nitrates apporté directement par les STEPS, il est très faible (1 % du flux infiltré).

la dénitrification dans les zones hyporéiques Sebilo (2003) a montré que la dénitrification par filtration à travers un milieu poreux est plus importante que par diffusion; compte tenu des résultats expérimentaux obtenus par certains auteurs (Sjodin *et al.*, 1997; Sheibley *et al.*, 2003), ce processus est susceptible de jouer un rôle important, sans doute plus important que la dénitrification benthique. Les recherches doivent se poursuivre pour quantifier ce processus.

Finalement, ces bilans font état d'un flux total d'azote (apports diffus à 95 % et rejets de STEPS à 5 %) de 4245 tN an⁻¹ dont 37,4 % sont stockés dans les aquifères, 40,4 % exportés par la rivière et 22,2 % sont dénitrifiés (15 % de dénitrification benthique) (Flipo, 2005). Le reste (85 %) du flux de dénitrification reste à caractériser, soit dans les zones hyporéiques, soit dans les nappes alluviales ou les zones humides.

5.3 Modélisation spatialisée du bassin de la Seine

5.3.1 La chaîne de modélisation SENEQUE/PROSE/sIAM1D-RIVE/sIAM3D-ELISE

La chaîne de modèles SENEQUE/PROSE/sIAM1D-RIVE/sIAM3D-ELISE (Cugier et Le Hir, 2002) a été mise en œuvre en 2003 sur le bassin de la Seine sous l'égide de l'AESN dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE (Cugier *et al.*, 2004; Even *et al.*, 2007e,b) (Fig. 1.1). sIAM3D-ELISE a été développé pour étudier l'eutrophisation en baie de Seine (Cugier, 1999; Cugier *et al.*, 2005a,b). Les états actuel (année 2001) et futur (échéance 2015) des systèmes aquatiques ont été simulés et comparés (Cugier *et al.*, 2004; Even *et al.*, 2007b). Le modèle SENEQUE simule la qualité des eaux à l'exutoire des principaux bassins Seine en Amont de Paris, Marne, Oise et Eure, en fonction des usages du sol, des rejets de STEPS et d'industries; le modèle PROSE simule la qualité de la Seine fluviale entre Paris et Poses en fonction des rejets de STEPS et des RUTPs ainsi que des rejets industriels; le modèle sIAM1D-RIVE simule la qualité de l'estuaire entre Poses et Caudebec et le modèle sIAM3D-ELISE simule le développement des algues en baie de Seine. Pour l'exercice de validation, chaque modèle est forcé par les mesures. Par contre les situations théoriques actuelles et futures qui doivent être comparées sont entièrement reconstituées et les résultats des modèles servent à forcer successivement les modèles en aval : les résultats du modèle SENEQUE forcent le modèle PROSE; les résultats du modèle PROSE servent à forcer les modèles sIAM1D-RIVE et sIAM3D-ELISE à Poses. Les hypothèses, les bases de données, les scénarios et la validité des informations propagées dans la chaîne des modèles sont décrits et discutés dans (Even *et al.*, 2007b).

5.3.2 Résultats

5.3.2.1 Les atouts de la chaîne de modélisation

Dans une approche originale, le couplage de ces quatre modèles nous a permis de calculer des états théoriques en fonction des aménagements sur l'ensemble du bassin (Cugier *et al.*, 2004; Even *et al.*, 2007b). C'est souvent une des limites des modèles que de ne pas connaître les forçages futurs à leurs limites. De plus, de par leur conception, chacun des modèles garantit la prise en compte des spécificités des sous-systèmes considérés. D'une part les réponses qui ont été apportées ont considéré les impacts à grande échelle tels que ceux des pollutions agricoles sur l'eutrophisation côtière, échelle qui généralement justifie des simplifications locales importantes. D'autre part la qualité des masses d'eau intermédiaires définies dans le cadre de la DCE a pu être évaluée.

5.3.2.2 La qualité des cours d'eau

Concernant l'ammoniaque et les orthophosphates, le scénario futur prévoit une amélioration sensible sur tout le bassin relativement à la situation actuelle comme résultat des efforts consentis pour le traitement des effluents (Even *et al.*, 2007b). À l'aval de Paris les orthophosphates dépasseront cependant encore le seuil critique «moyen», contrairement à l'ammoniaque (Even *et al.*, 2007e,b). Des résultats précédents

de Garnier *et al.* (2005) tendent à montrer que la maîtrise des orthophosphates nécessite désormais de s'attaquer à la pollution diffuse d'origine agricole. La réduction importante des charges en ammoniacque est responsable de l'amélioration de l'oxygénation à l'aval d'Achères et jusque dans l'estuaire (Even *et al.*, 2007e). La contamination des nitrates se poursuit (Even *et al.*, 2007e) en réponse à une extension des zones arables, tendance observée sur le bassin depuis les trois dernières décennies (Mignolet *et al.*, 2007). L'inertie des aquifères du bassin de la Seine a par ailleurs été estimée à plus de trente ans (Gomez, 2002). À Poses les nitrates sont originaires à plus de 90 % des bassins amont (Seine en amont de Paris, Marne et Oise) (Even *et al.*, 2007e) où les apports agricoles dominent (Flipo, 2005). L'effet sur l'eutrophisation des cours d'eau et côtière, exprimée en biomasse totale, est faible (Cugier *et al.*, 2004; Even *et al.*, 2007b,e). En effet les concentrations en éléments nutritifs restent élevées par rapport aux seuils de limitation (constantes de demi-saturation) pour les diatomées qui constituent l'essentiel de la biomasse algale. Par contre le seuil pour une limitation du développement des algues toxiques en baie de Seine sera probablement atteint pour le phosphore (Cugier *et al.*, 2004, 2005a; Even *et al.*, 2007e).

5.3.2.3 L'apport pour la gestion

Les exercices de modélisation ont été renouvelés à plusieurs reprises en tenant compte des améliorations des modèles, des processus mais également des bases de données (Billen *et al.*, 2001; Even *et al.*, 2007c; Billen *et al.*, 2007). Un des résultats intéressants de l'utilisation des modèles dans le cadre de la gestion a été de confronter les décideurs aux effets de leurs hypothèses, dont la mise au point a finalement résulté d'un dialogue avec les modélisateurs. Les bases de données ont également pu être « corrigées » (Even *et al.*, 2007b). Les variables modélisées par le modèle RIVE sont les variables clé pour l'analyse du fonctionnement du système mais ne correspondent pas toujours aux variables effectivement retenues dans les critères de qualité. Ainsi en est-il de la DBO₅. La confrontation des approches développées pour la recherche et les questions des gestionnaires peut donc contribuer à faire évoluer les critères. Finalement, la mise en évidence, à l'aide du modèle PROSE, de facteurs méconnus qui contribuent aux déficits en oxygène importants à la traversée de Paris, montre tout l'intérêt pour les gestionnaires des approches déterministes (Even *et al.*, 2007d).

5.4 Les interfaces utilisateurs

5.4.1 Le principe

Le développement d'une interface pour les entrées de PROSE a fait partie d'un projet plus général qui a pour ambition de concevoir la *génération automatique de composants (ou beans) d'interfaces* pour des logiciels scientifiques, le projet GABI (Bonniez, 2001; Even *et al.*, 2002, 2003, 2004a; Even et Flipo, 2005). Un des points névralgiques de l'utilisation des logiciels est la manipulation d'un nombre important de données regroupées dans un système de fichiers complexes. Afin d'aider cette opération, il est classique de procéder à un interfaçage qui, outre l'aspect pratique, remplit également une fonction de contrôle. Dans l'état actuel des choses, pour les logiciels de calcul scientifiques, les interfaces sont généralement écrites au cas par cas. Plus généralement les générateurs automatiques d'interface existants nécessitent toujours une phase de définition manuelle (Schlee, 2002). Dans tous les cas la conception de l'interface doit être révisée dès qu'une modification a lieu dans le logiciel interfacé. Le risque est grand alors, soit de figer complètement les choses et de limiter les perspectives d'évolution d'un logiciel, soit de passer un temps énorme dans la gestion de l'information. Le projet GABI envisage d'automatiser complètement la conception de l'interface en concevant un outil capable d'analyser la partie code de lecture des données d'entrée d'un logiciel et de générer le code d'interface automatiquement.

5.4.2 Description schématique de l'outil GABI

Un programme consiste à interpréter et structurer des données, calculer et générer des résultats. Un des principes du projet est de séparer la partie du code assurant la lecture et l'interprétation des données (grammaire) de la partie calculatoire du modèle, dans le sens où chacune des fonctions sera écrite dans

des fichiers distincts. C'est de fait le cas avec l'utilisation des analyseurs syntaxiques qui sont des langages permettant de conceptualiser la structure d'un ensemble d'information. La lecture des données de PROSE utilise ces langages (FLEX/BISON). La grammaire se compose de deux types d'information : la définition d'un lexique (vocabulaire) et la définition d'une syntaxe (règles). L'outil GABI a donc été conçu pour (Bonniez, 2001; Even *et al.*, 2002, 2003, 2004a; Even et Flipo, 2005) :

1. générer un arbre virtuel des données représentant la structure vocabulaire/règles de la grammaire (prétraitement); cette étape est réalisée à chaque modification du logiciel source; cette fonction de l'outil GABI est elle-même basée sur des analyseurs syntaxiques;
2. allouer dynamiquement les composants permettant d'éditer une nouvelle donnée et de l'ajouter à la structure de données spécifique à l'utilisateur;
3. sauvegarder la structure de données sous différents formats;
4. lire et modifier les structures de données de l'utilisateur;

5.4.3 Le bilan

Ce projet me permet d'illustrer ici les enjeux liés à l'informatique, trop souvent ignorés par les modélisateurs. Pour ces derniers, l'informatique n'est qu'un moyen technique souvent relégué au dernier plan de leurs considérations. Ils ignorent alors que cette discipline fait l'objet de nombreuses recherches qui ont, entre autres, pour vocation de faciliter, voire de permettre, les développements en informatique. Cela implique tant le choix des langages informatiques que l'utilisation de méthodes, d'algorithmes ou d'outils spécifiques. Il n'en reste pas moins que, comme toute discipline, certains aspects restent compliqués et nécessitent un investissement important mais qui m'a personnellement passionnée. Là aussi la multidisciplinarité ou l'interdisciplinarité sont nécessaires.

5.5 Discussion et conclusion

5.5.1 Les enjeux futurs sur le bassin de la Seine

L'eutrophisation et la maîtrise des pollutions diffuses d'origine agricole, tant pour les nitrates que pour les orthophosphates, restent des enjeux importants. Les résultats publiés et repris ici pour l'estuaire n'ont pas fait l'objet de développement et validation poussés dans la ZMT. C'est tout l'intérêt de la modélisation qui a été réalisée ensuite avec le modèle SIAM3D-RIVE (Chap. 4). Compte tenu des enjeux concernant l'eutrophisation côtière, cette question devient stratégique. En dernier lieu, les estuaires avec leurs nombreuses zones humides, vasières et flocs sont propices au développement de la dénitrification. La présence de la dénitrification en estuaire de Seine a déjà été montrée par Sebilo (2003). La localisation de ce processus et sa quantification, non seulement dans les bassins amont, mais également dans l'estuaire doit se poursuivre conjointement avec la mise en place de projets de restauration.

5.5.2 Le retour d'expérience

Le rapport de confiance est essentiel pour l'utilisation des modèles dans un cadre de gestion. Les critères d'évaluation sont alors la capacité à reproduire les observations, gage de crédibilité. Les approches de modélisation développées dans un cadre de recherche visent la compréhension et, avant tout, la généralité. Cet aspect devient important quand on s'attache à des prévisions sur le long terme. Sur le Grand-Morin la technique du krigeage des concentrations en nitrates a été utilisée pour l'initialisation et la validation du modèle CawaQS (Flipo *et al.*, 2007b). Par contre le krigeage seul n'intègre pas des phénomènes physiques tels que le drainage par les cours d'eau (Flipo *et al.*, 2007b). L'utilisation conjointe des deux techniques, krigeage et modélisation physique, s'enrichissent mutuellement. D'autres techniques de la géostatistique existent, telles que l'assimilation de données (Evensen, 2007) et qui, couplées à des modélisations déterministes (Bertino *et al.*, 2002), peuvent apporter le meilleur concernant les prévisions à court et long terme afin d'améliorer la crédibilité des modèles. Mais les objectifs ne sont pas de cet ordre et la recherche peut également y gagner. Ainsi quand certains processus ne sont pas bien compris, l'assimilation des données

peut permettre de «corriger» les erreurs trop grandes sur certaines variables et de poursuivre les avancées sur d'autres aspects. Le retour sur les processus laissés en attente peut être bénéfique. Ainsi dans l'estuaire de Seine, le modèle *SiAM3D* ne simule pas toujours correctement la position de la ZMT. Les résultats sont alors très difficiles à analyser pour les variables liées aux MES (COP, contaminants). La correction des erreurs sur les MES permettrait de s'affranchir de cette limite et de progresser dans la compréhension de la dynamique des variables qui en dépendent tout en poursuivant les recherches pour mieux comprendre la dynamique des MES. Il en va de même pour le phytoplancton dont les déterminismes ne sont pas encore bien compris. Or cette variable influence fortement l'oxygénation. L'assimilation de données pour la chlorophylle *a* permettrait de se concentrer sur les bilans des autres processus. Si la technique de l'assimilation de données est utilisée dans les domaines physiques ou dans le cas de variables conservatives (Bertino *et al.*, 2002), son utilisation dans des contextes réactifs et notamment en biogéochimie est encore rare.

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

6.1 Les processus biogéochimiques

La spatialisation des approches à l'échelle des bassins doit être poursuivie compte tenu des enjeux de la gestion environnementale. Cependant ces approches doivent s'appuyer sur des recherches au niveau local. En ce qui me concerne mes recherches vont se poursuivre pour mieux comprendre et localiser les processus de transformation des éléments majeurs des cycles biogéochimiques pour continuer de progresser dans la compréhension du déterminisme de l'eutrophisation en mettant l'accent sur le fonctionnement estuarien. De nombreux travaux ont déjà été réalisés en estuaire de Seine sur les éléments nutritifs tant dans la colonne d'eau (Sebilo, 2003; Némery, 2003; Garnier *et al.*, 2003) que dans les vasières (Mesnage *et al.*, 2002; Lafite *et al.*, 2004). L'exploitation de ces données doit se poursuivre. Par ailleurs j'ai déjà engagé une collaboration avec Anniet LAVERMAN, chargée de recherche à l'UMR SISYPHE, et Josette GARNIER pour des projets sur la problématique de l'azote en estuaire de Seine (appels à propositions des programmes SEINE-AVAL ou d'ingénierie écologique du CNRS-CEMAGREF). Ils intègrent les mesures en laboratoire, sur site et des modélisations à échelle locale puis passage à la grande échelle. D'autres aspects doivent encore être approfondis : i) les processus de recyclage de la matière organique dans le milieu côtier ; ii) valider la dynamique de pénétration de la matière organique dans la ZMT, iii) le cycle de la silice.

6.2 La généralisation des processus

6.2.1 La rade de Brest et le cycle de la silice

J'ai déjà cité les travaux en rade de Brest réalisés au sein du LEMAR dont un des axes de recherches est les relations terre-mer. Les équipes du LEMAR ont des compétences reconnues concernant la silice, aspect qu'il m'intéresse tout particulièrement d'approfondir. *A contrario* ils aimeraient mieux quantifier le rôle des estuaires. Ce serait pour moi l'occasion d'appliquer le modèle conceptuel de l'estuaire de Seine à un autre système. La mise en œuvre des concepts sur un grand nombre de systèmes distincts est en effet un point central pour tester leur généralité. C'est également ce qui leur permet d'évoluer, chaque système permettant de mettre en avant des processus particuliers. La proximité de nos problématiques justifient que nous soyons réciproquement intéressés par une collaboration. Elle devrait prendre forme dans le cadre d'un projet ANR qui sera soumis en 2009.

6.2.2 Le bassin Amazonien et les échanges avec les zones humides connexes

L'application à d'autres systèmes et l'approfondissement de nouveaux processus sont également les objectifs de ma collaboration avec l'IRD dans le cadre de la thèse d'Eduardo CHAVARRI qui se déroule dans le cadre du projet HYBAM (« *Hydro-géodynamique actuelle du Bassin AMazonien* »). Dans un contexte général visant à estimer l'impact des activités humaines présentes sur le bassin (déforestation, mines, urbanisation, ...) sur le fonctionnement des fleuves en passant par l'hydrologie, l'objectif de la thèse est de

calculer les variables physiques nécessaires à l'estimation des capacités de transport des variables géochimiques et de sédiments. La première phase de la thèse a consisté dans la collecte de données hydrologiques (débit, hauteurs d'eau) et bathymétriques sur les fleuves andins. La deuxième phase consiste dans le développement d'un modèle hydrodynamique impliquant tant le lit mineur que le lit majeur ; l'application sur quatre fleuves andins (Napo (Pérou-Équateur), Beni (Bolivie), Marañón (Pérou) et Ucayali (Pérou)) est prévue. Les échanges avec les zones humides connexes aux fleuves sont, dans ce système, essentiels pour comprendre la transformation des éléments biochimiques. Le rôle de ces échanges sur le fonctionnement global d'un hydrosystème m'intéresse particulièrement. C'est une question qui n'a pas été traitée sur le bassin de la Seine. La prise en compte de variables réactives et particulières en plus de l'hydrologique nécessite une réflexion particulière.

6.3 Le «bon état/potentiel» écologique

Mon implication dans l'évaluation de l'état des systèmes en réponse aux pressions anthropiques va se poursuivre. Des questions impulsées par la DCE restent encore en suspens. C'est le cas notamment de la définition du «bon état/potentiel» pour les systèmes estuariens (zones de transition). Le problème pour ces systèmes est double. D'une part la DCE se base sur un état de «référence» et c'est l'écart à cet état (définition de métriques) qui sert à évaluer l'état d'un système. Toute la question est alors celle de la définition de cet état de référence. Pour les cours d'eau, la recherche de systèmes réels à un état encore quasi naturel et le croisement avec une typologie des régions a été largement promue. Dans d'autres cas, l'utilisation de modèles pour reconstituer des états de référence très anciens a été envisagée (Cugier *et al.*, 2005a). Outre le fait que la définition de ce qu'est l'état de référence considéré à une époque lointaine est en soi délicate, certains systèmes, comme la Seine, ont tellement été modifiés, qu'un retour à un état «initial» n'est pas envisageable. Plus généralement cela est vrai pour les grands estuaires qui sont des systèmes qui doivent continuer de répondre à des obligations d'activités économiques. Ces systèmes rentrent alors dans la catégorie des systèmes «fortement modifiés» pour lesquels on ne parle plus de «bon état» mais de «bon potentiel», notion qu'il convient de définir. D'autre part, les estuaires sont des systèmes naturellement très variables. La définition de seuils fixes est alors problématique et les impacts des activités anthropiques sur la biologie ne sont pas toujours des évidences. Pour les systèmes estuariens et plus généralement les systèmes «fortement modifiés», catégorie dans laquelle rentre la Seine fluviale, se pose alors la question : quel état doit-on considérer ? Quels sont les objectifs de la restauration de ces systèmes ? Pour tenter de répondre à ces questions, le GIP SEINE-AVAL pilote un projet LITEAUIII/BEEST («Vers une approche multi-critères du Bon État/potentiel écologique des grands ESTuaires atlantiques Seine, Loire et Gironde») en réponse à un appel d'offre du MEEDDAT. Ce projet, d'une durée de quatre ans, a démarré en 2008. Il vise à définir la notion de «bon état» dans ces estuaires en intégrant tant les aspects hydromorphologiques, physico-chimiques, biologiques que sociétaux. Le projet AQUAREL («Analyse QUAntitative des RELations entre les aménagements et la qualité de l'eau de l'estuaire»), dont je suis l'instigatrice, a été proposé et accepté dans le cadre du programme SEINE-AVAL pour soutenir et alimenter la réflexion sur les aspects hydromorphologiques et physico-chimiques dans le cadre du projet LITEAUIII/BEEST (Chap. 9). Une intercomparaison avec l'estuaire de la Loire et de la Gironde doit être réalisée pour essayer de produire des critères de portée générale.

6.4 Les changements globaux

Par ailleurs les approches à l'échelle des bassins vont de plus en plus chercher à évaluer les modifications des écosystèmes sous l'influence de «changements globaux» qui incluent les changements climatiques mais également les changements des pratiques humaines en réponse à ces mêmes changements ou produits par des sociétés en pleine évolution. Or pour connaître les conséquences de ces changements il faut faire interagir les activités humaines et les facteurs naturels dont les effets relatifs sur les systèmes doivent être quantifiés. Or les relations quantitatives entre les aménagements, les évolutions des pratiques, la variabilité naturelle et la qualité des milieux ne sont pas évidentes dans des systèmes complexes tels que les systèmes naturels. Les modèles sont des outils privilégiés pour conduire ce genre d'analyse. C'est un

des objectifs du projet AQUAREL qui prévoit de travailler à l'échelle du bassin de la Seine. L'accent est mis sur les effets d'aménagements réalisés au cours des cinquante dernières années et qui impliquent tant des effets sur l'hydraulique que sur la qualité des eaux. À travers l'analyse de scénarios rétrospectifs je cherche à exploiter le potentiel de connaissance qui existe dans l'analyse *a posteriori* de scénarios passés. Dans le cadre du programme SEINE-AVAL, une collaboration étroite est prévue avec les projets s'intéressant au changement climatique et notamment le projet HYDROCLIMAT, porté par Benoît LAIGNEL, professeur des universités à Rouen, qui vise à évaluer les réponses morphologiques, hydrologiques et sédimentaires de l'estuaire de Seine aux fluctuations climatiques au cours des dernières décennies. La confrontation des résultats des deux approches permettra soit de valider leurs résultats respectifs, soit de les améliorer à travers des remises en cause. La collecte des bases de données sera réalisée conjointement. Un état des lieux de la validité des modèles sur la base de leur application pour des situations connues les plus variées possibles, reste nécessaire avant de se projeter dans l'avenir ; ce sera une des retombées du projet AQUAREL.

6.5 Les approches globales

Concernant l'évolution des systèmes en réponse aux «changements globaux» le modèle couplé CawaQS présente une approche originale de modélisation spatialisée et déterministe de bassin (Chap. 5). Un tel exercice a mobilisé des compétences multiples (modèle hydrologique, modèle d'aquifères, modèle agronomique). Dans les perspectives, le couplage avec des modèles météorologiques est envisagée (plate-forme EAU-DYSSÉE actuellement financée dans le cadre du PIREN SEINE). Concernant les processus, les recherches doivent se poursuivre et pas seulement dans les axes des cours d'eau. Je préfère personnellement continuer à mettre l'accent sur le fonctionnement des sous-systèmes spécifiques que sont les cours d'eau et les estuaires et alimenter par ce biais des modèles plus généraux. Par ailleurs de mon point de vue la conception informatique du couplage réalisé dans le modèle CawaQS devait être entière revue. La tendance actuelle pour les modèles globaux à très grande échelle (certains sont appliqués à l'échelle de la France) est de se baser sur des modélisations spécifiques de sous-systèmes et d'utiliser des outils permettant aux modèles de communiquer (coupleurs). L'investissement informatique est *a priori* lourd et les choix techniques importants. Pour moi la contrainte informatique pour le développement de telles approches me semble très forte. Les coupleurs doivent viser à une grande ouverture vis à vis des langages informatiques notamment. De plus la question des performances des modèles devient cruciale. Or ce sont autant de champs de l'informatique dans lesquels les modélisateurs traditionnels ont peu investi et qui, du point de vue même des informaticiens, sont complexes. La prise en charge de ces aspects par des modélisateurs conduit donc parfois à des projets mal déterminés prohibant d'avance les collaborations. Or là où il faudrait viser à davantage de collaborations entre disciplines informatiques et environnementales, on rencontre ici encore de grandes difficultés à faire collaborer des disciplines très différentes. J'ai personnellement beaucoup investi dans le champ informatique ce qui me permet d'avoir un oeil critique sur certains de ces projets mais rend également difficile la collaboration. Par ailleurs la globalisation à l'échelle même des sous-systèmes pose des problèmes. Les changements d'échelle influencent soit les valeurs des paramètres, soit impliquent des simplifications des processus. Dans le modèle PROSE, qui travaille depuis le champ proche (moins de 10 km) jusqu'à l'échelle des cours d'eau (plusieurs centaines de kilomètres) ce problème est résolu *via* des options différentes pour les processus. L'application du modèle à ces différentes échelles a permis des ajustements de paramètres adaptés à chacun des cas. La recherche de fonctions d'évolution des paramètres en fonction des échelles serait une autre voie.

6.6 Le couplage entre différentes approches de modélisation

Dans les développements actuels en modélisation, d'autres voies que la globalisation spatiales sont recherchées. Ainsi certaines approches visent à descendre davantage au niveau du déterminisme des processus (Jorgensen, 2008) : les modèles individus centrés cherchent à représenter les processus pour lesquels les caractéristiques individuelles prédominent ; les modèles de dynamique des structures cherchent à introduire l'adaptation des espèces à des changements de forçage. Si elles sont particulièrement intéressantes dans des systèmes où la diversité naturelle reste de mise ou pour comprendre comment les populations

et espèces vont évoluer compte tenu des changements climatiques en cours, ces approches restent encore complexes et nécessitent l'acquisition de nombreuses connaissances (Jorgensen, 2008). D'autres voies envisagent davantage le parti du couplage entre techniques statistiques et modèles déterministes (Jorgensen, 2008). Pour l'heure c'est davantage dans cette dernière direction que je préfère m'engager pour continuer de progresser sur les processus auxquels je m'intéresse (Chap. 5). Mon objectif reste aussi le développement de modèles opérationnels; par exemple, les applications dans le cadre de la DCE nécessitent une évaluation la plus correcte possible des états actuels.

6.7 Les couplages chimie-biochimie

6.7.1 Les enjeux

Dans la cadre de la DCE des objectifs de bon état chimique doivent également être atteints par les états membres. Or le fleuve Seine et son estuaire sont fortement pollués tant pour les polluants métalliques (Thévenot *et al.*, 1998; Chiffoleau *et al.*, 1999; Thouvenin *et al.*, 2007c) que pour les contaminants organiques (Abarnou *et al.*, 1999). Cependant les processus en jeu et les moyens de suivi et d'analyse sont autrement plus complexes et coûteux que pour les variables physico-chimiques classiques et les besoins de connaissance sont encore importants. Le support des modèles est alors très précieux. Pour les contaminants métalliques, leur toxicité dépend fortement de la forme chimique. La spéciation des métaux dépend de variables telles que le pH, la salinité, les concentrations particulières, l'hydrophobie, l'affinité par rapport à certains ligands, La matière organique influence directement cette spéciation en tant qu'agent complexant; l'effet est indirect via l'influence sur l'oxygène et le pH. Si de nombreuses recherches ont porté sur le rôle complexant de la matière organique, les connaissances en laboratoire et prises en compte dans les modèles s'adressent essentiellement aux formes réfractaires (acides humiques et fulviques). Selon Montserrat (2005), les modèles de spéciation chimique actuels sont peu à même de représenter correctement les processus de complexation par la matière organique naturelle. Elle évoque notamment le fait que dans certains systèmes les matières humiques représentent une faible fraction. Nous avons vu qu'en Seine, ces formes sont effectivement très minoritaires (Chap. 2). Par ailleurs l'influence prépondérante de la matière organique sur la toxicité des contaminants organiques est également avérée (Gourlay *et al.*, 2005b,a). Gourlay (2004) confirme également les résultats d'autres auteurs qui mettent en avant les limites des relations définies entre les coefficients de partage et la caractérisation de la matière organique telle que définie pour les matières humiques (aromaticité) (Gourlay, 2004).

Compte tenu des nombreuses questions relatives au rôle de la matière organique naturelle qui nécessitent des confrontations avec des observations *in situ*, j'ai commencé à m'impliquer dans des projets relatifs aux micro-polluants.

6.7.2 En estuaire de Seine

6.7.2.1 Travaux préliminaires

En estuaire de Seine j'ai développé une modélisation simplifiée du cycle du carbone (modèle MOSES) (Even et Thouvenin, 2007), qui a pu être validée à l'aide des résultats du modèle complet SiAM3D-RIVE, et qui a été intégrée à des modélisations du cadmium et de contaminants organiques (Thouvenin *et al.*, 2007a). Ce couplage de modèles m'a conduit à remettre en question la conceptualisation de la dynamique du COP dans SiAM3D-RIVE.

6.7.2.2 Digression sur la floculation

Dans la représentation actuelle, les différents stocks de particules ont des dynamiques indépendantes. Or pour les contaminants le facteur déterminant est la fraction en matière organique des MES présentes sous forme d'agrégats (flocs). De plus, les processus d'agrégation/désagrégation varient énormément dans un estuaire notamment dans la ZMT où les concentrations en MES sont importantes et la salinité élevée, mais également en fonction de la variation des activités microbiologiques (Lunau *et al.*, 2006). Verney (2006) a également mis en évidence le rôle prépondérant de la matière organique dans le processus de

floculation dont la contribution doit être explicitée. En conclusion, d'une part la matière organique influence les processus d'agrégation et modifie les flux de sédimentation ; plus généralement la floculation est un processus intéressant à prendre en compte pour améliorer le déterminisme de la dynamique sédimentaire (ce processus est pris en compte de manière très simplifiée dans *SiAM3D*) ; d'autre part, le couplage entre des modèles de contaminants et de matière organique nécessite de progresser dans la connaissance de la composition en matière organique des agrégats. Un projet, piloté par Romaric VERNEY de l'IFREMER a été accepté en avril 2008 dans le cadre du programme SEINE-AVAL, projet FLUMES («*FLUx de Matières En Suspension*»), auquel je suis associée pour la modélisation de la matière organique (Chap. 9). Le projet devrait faire l'objet de propositions dans d'autres cadres dès 2009 (ANR, INTERREG).

6.7.3 En Seine fluviale

6.7.3.1 La variabilité *in situ* des concentrations en contaminants métalliques

Le projet EC2CO -MEDISIS («*MÉtaux DIssous en Seine et Indicateurs biologiqueS*») coordonné par Jean-Marie MOUCHEL a pour objectif de mettre en évidence la variabilité des concentrations de différents contaminants métalliques en Seine et d'essayer de comprendre les processus responsables de cette variabilité ; la variabilité spatiale et temporelle importante a déjà été mise en évidence sur le bassin de la Seine par Uher et Tusseau-Vuillemin (2006) pour le cas du zinc. Le modèle PROSE doit permettre de réaliser une analyse des données collectées *in situ*. Pour ce faire, j'ai intégré en janvier 2006 l'équipe Hydrodynamique et Réactions du Centre de Géosciences, qui travaille sur le développement du logiciel CHES (van der Lee et Windt, 2002) (spéciation chimique) qui devra être couplé au logiciel PROSE (hydrodynamique et réactions biochimique en rivière) via la plate-forme HYTEC (basée sur MPI) de couplage de modèles de transport et réactions. Outre les développements méthodologiques, des suivis *in situ* de métaux totaux, dissous, particulaires et fraction labile, en plusieurs sites (amont, aval de Paris) et à haute fréquence, sont organisés. Les suivis devront être coordonnés avec les analyse physico-chimique de l'eau organisées par le SIAAP. Le modèle PROSE couplé avec CHES sera utilisé pour une analyse exploratoire des processus *in situ* susceptibles d'influencer cette variabilité (bloom phytoplanctonique, remises en suspension, cycles jour/nuit). Un post-doc de dix-huit mois est prévu au Centre de Géosciences à partir de l'automne 2008 pour travailler sur ce projet.

6.7.3.2 La toxicité des contaminants métalliques et organiques

Du fait de sa capacité complexante, la matière organique influence la toxicité des contaminants qu'ils soient organiques (Gourlay, 2004) ou métalliques. Des travaux de modélisation préliminaires de couplage entre dynamique *in situ* de la matière organique et concentrations en contaminant organique ont déjà été réalisés lors du stage de Cécile HARDY (Hardy, 2006) (Chap. 8) en conclusion d'un projet ECODYN (2003-2004) («*Influence de la dégradation hétérotrophe sur la biodisponibilité de toxiques en eaux fortement anthropisées*»). Programme National ECCO : Écosphère continentale, processus et modélisation. Écotoxicologie et écodynamique des contaminants) piloté par Marie-Hélène TUSSEAU et Catherine GOURLAY du CEMAGREF. Je pense poursuivre sur la problématique de la toxicité des contaminants, dans le cadre notamment du PIREN SEINE où cette question est résolument posée. Compte tenu des nombreuses perspectives dans le domaine des interactions biogéochimie et géochimie, et forte de mon intégration, depuis janvier 2006, dans l'équipe Hydrodynamique et Réaction, c'est cette voie que je souhaite développer plus particulièrement à l'avenir.

Bibliographie

- Abarnou, A., Burgeot, T., Chevreuil, M., Leboulenger, F., Loizeau, V., Madoulet-Jaouen, A. et Minier, C., 1999. « Les contaminants organiques : quels risques pour le monde vivant. » Programme Scientifique Seine Aval (éditeur), *Seine Aval*, IFREMER (Plouzané), vol. 13, p. 35.
- Abril, G., Nogueira, M., Etcheber, H., Cabeçadas, G., Lemaire, E. et Brogueira, M., 2002. « Behavior of Organic Carbon in Nine Contrasting European Estuaries. » *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 54, n° 2, p. 241–262.
- Améziane, T., 2000. *Développement des micro-organismes phytoplanctoniques et périphytoques en période d'étiage estival dans le fleuve de la Garonne*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III.
- Andrieux-Loyer, F., 1997. *Les formes de phosphore particulaire et sédimentaire en environnement côtier. Méthodes d'analyse, biodisponibilité, échange*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale. 329 pages.
- de Angelis, D., Moreau, M., Neegaard, D., Mulholland, P. et Marzolf, E., 1995. « Modelling nutrient-periphyton dynamics in streams : the importance of transient storage zones. » *Ecological Modelling*, vol. 80, p. 149–160.
- Aubert, K., 1999. *Simulation de pollutions accidentelles sur la Marne entre Epernay et Château-Thierry*. Rapport de stage ingénieur de troisième année, École Nationale Supérieure de Géologie - Institut National Polytechnique de Lorraine - Université de Nancy.
- Bagnold, R., 1966. *An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics. Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers*. rapport technique, U.S. Geological Survey Professional Paper : 422-I.
- Bertino, L., Evensen, G. et Wackernagel, H., 2002. « Combining geostatistics and Kalman filtering for data assimilation in an estuarine system. » *Inverse Problems*, vol. 18, p. 1–23.
- BETURE-SETAME, 1988. *Mise en œuvre de la politique de lutte contre l'azote et l'eutrophisation dans le bassin de la Loire. Modèle PO.LU.PA. Rapport de synthèse*. rapport technique, Agence de l'Eau Loire-Bretagne. 220 pages.
- Biggs, B. et Close, M., 1989. « Periphyton biomass in gravel bed rivers : the relative effects of flows and nutrients. » *Freshwater Biology*, vol. 22, p. 209–231.
- Biggs, B. et Stokseth, S., 1996. « Hydraulic habitat suitability for periphyton in rivers. » *Regul. River*, vol. 12, p. 251–261.
- Billen, G., 1982. « Modelling the processes of organic matter degradation and nutrients recycling in sedimentary systems. » B. Nedwell et C. Brown (éditeur), *Sediment Microbiology*, Academic Press Inc. (London), p. 15–52.
- Billen, G. et Garnier, J., 1999. « Nitrogen transfers through the Seine drainage network : a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER model. » *Hydrobiologia*, vol. 410, p. 139–150.

- Billen, G., Garnier, J., Ficht, A. et Cun, C., 2001. « Modeling the Response of Water Quality in the Seine River Estuary to Human Activity in its Watershed Over the last 50 Years. » *Estuaries*, vol. 24, n° 6, p. 977–993.
- Billen, G., Garnier, J. et Hanset, P., 1994. « Modelling phytoplankton development in whole drainage networks : the RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. » *Hydrobiologia*, vol. 289, p. 119–137.
- Billen, G., Garnier, J. et Rousseau, V., 2005. « Nutrient fluxes and water quality in the drainage network of the Scheldt basin over the last 50 years. » *Hydrobiologia*, vol. 540, n° 1-3, p. 47–67.
- Billen, G., Garnier, J., Servais, P., Brion, N., Ficht, A., Even, S., Berthe, T. et Poulin, M., 1999. « L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique. » Programme Scientifique Seine Aval (éditeur), *Seine Aval*, IFREMER (Plouzané), vol. 5, p. 32.
- Billen, G., Thieu, V., Silvestre, M., Servais, P., Garnier, J., Cugier, P. et Lamy, F., 2007. *Simulation par SENEQUE3.4 de l'impact des 8^{ème} et 9^{ème} programmes de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Billen, G., Théry, S., Garnier, J., Meybeck, M., Boët, P., Even, S., Chevreuil, M. et Poulin, M., 2004. « L'Île de France dans l'hydrosystème Seine. » Les cahiers de l'IAURIF (éditeur), *Le fleuve, un système, des territoires, des acteurs*, IAURIF (Paris), vol. 141.
- Bonniez, S., 2001. *Générateur automatique d'interfaces graphiques pour logiciels scientifiques*. Rapport de stage ingénieur de troisième année, Télécom Bretagne (Plouzané).
- Boudreau, B. P., 1997. *Diagenetic Models and their Implementation*. Springer.
- Bourlange, S., 2000. *Modélisation hydraulique et écologique d'une rivière amont : le Grand-Morin*. Mémoire du DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, Université Pierre et Marie Curie - Mines ParisTech - École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- Boët, P., Akopian, M., Belliard, J., Berrebi-dit-Thomas, R., Pourriot, R., Talès, E. et Testard, P., 1998. « Une faune aquatique sous pressions multiples. » M. Meybeck, G. de Marsily et Éliane Fustec (éditeur), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, p. 627–678.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M., Ruget, F. et Nicoullaud, B., 1998. « STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1- Theory and parametrization applied to wheat and corn. » *Agronomie*, vol. 18, p. 311–346.
- Brown, L. C. et Barnwell, T. O., 1987. *Enhanced stream water quality models, QUAL2E and QUAL2E UNCAS. Documentation and user's TechReport*. Department of civil Engineering, Tufts University, Medford, MA 02155. Environmental research laboratory office of research and development. U.S. Environmental Protection Agency. Rapport EPA/600/3-87/007.
- Celik, I. et Rodi, W., 1988. « Modeling Suspended Sediment Transport in Nonequilibrium Situations. » *J. Hyd. Eng.*, vol. 114, n° 10, p. 1157–1191.
- Charnock, C. et Kjonno, O., 2000. « Assimilable organic carbon and biodegradable dissolved organic carbon in Norwegian raw and drinking waters. » *Wat. Sci. Tech.*, vol. 34, n° 10, p. 2629–2642.
- Chiffolleau, J.-F., Claisse, D., Cossa, D., Ficht, A., Gonzalez, J.-L., Guyot, T., Michel, P., Miramand, P., Oger, C. et Petit, F., 1999. « La contamination métallique. » Programme Scientifique Seine Aval (éditeur), *Seine Aval*, IFREMER (Plouzané), vol. 8, p. 39.
- Christy, P. et Thibodeaux, L., 1982. « Spill of Soluble High-Density Immiscible Chemicals on Water. » *Environmental Progress*, vol. 1, n° 2, p. 126–129.

- Conley, D. J., Schelde, C. L. et Stoermer, E. F., 1991. « Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication. » *Marine Ecology Progress Series*, vol. 101, p. 179–192.
- Cugier, P., 1999. *Modélisation du devenir à moyen terme dans l'eau et le sédiment des éléments majeurs (N, P, Si, O) rejetés par la Seine en baie de Seine*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie.
- Cugier, P., Billen, G., Even, S. et Poulin, M., 2004. *Réponse de l'eutrophisation de la baie de Seine au scénario tendanciel 2015*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/05 (Fontainebleau).
- Cugier, P., Billen, G., Guillaud, J. F., Garnier, J. et Ménesguen, A., 2005a. « Modelling the eutrophication of the Seine Bight (France) under historical, present and future riverine nutrient loading. » *Journal of Hydrology*, vol. 304, p. 381–396.
- Cugier, P. et Le Hir, P., 2000. « Modélisation 3D des matières en suspension en baie de Seine orientale (Manche, France). » *Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Science de la Terre et des planètes*, vol. 331, p. 287–294.
- Cugier, P. et Le Hir, P., 2002. « Development of a 3D Hydrodynamic Model for Coastal Ecosystem Modelling. Application to the Plume of the Seine River (France). » *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 55, p. 673–695.
- Cugier, P., Ménesguen, A. et Guillaud, J.-F., 2005b. « Three-dimensional (3D) ecological modelling of the Bay of Seine (English Channel, France). » *Journal of Sea Research*, vol. 54, p. 104–124.
- Danish Hydraulic Institut (DHI), 2006. *MIKE SHE User Manual. Volume 1 : User Guide*. rapport technique, DHI Water & Environment (Hørsholm, Denmark).
- Dauta, A., 1983. *Conditions de développement du phytoplancton. Etude comparative du comportement de 8 espèces en culture, cinétiques d'assimilation et de croissance : étude expérimentale, modélisation appliquée aux cultures et à un milieu naturel : le Lot*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse. 166 pages.
- Delbec, M., 1997-2000. *Transfert opérationnel de modèles scientifiques de qualité de l'eau pour la gestion des rejets urbains de temps sec et de temps de pluie*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Ponts et Chaussée (Marne la Vallée). Non soutenue.
- Delhez, E. et Carabin, G., 2001. « Integrated Modelling of the Belgian Coastal Zone. » *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 53, n° 4, p. 477–491.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., verney, R., Lesourd, S., Cuvilliez, A. et Taylor, J., 2006. « Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat - Role of the turbidity maximum in the macrotidal Seine estuary, France. » *Marine Geology*, vol. 235, n° 1-4, p. 151–164.
- Dent, C. et Henry, J., 1999. « Modelling nutrient-periphyton dynamics in streams with surface-subsurface exchange. » *Ecological Modelling*, vol. 122, p. 97–116.
- Eldine, F. N., 2006. *Développement d'un outils de Génération Automatique de Belles Interfaces (GABI)*. Rapport de stage de deuxième année de master recherche de logiciels et méthodes formelles informatique, Télécom-Bretagne (Plouzané).
- Escobar, I. C. et Randall, A. A., 2001. « Assimilable organic carbon (AOC) and biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) : complementary measurements. » *Wat. Sci. Tech.*, vol. 35, n° 18, p. 4444–4454.
- Estèbe, A., Mouchel, J.-M. et Thévenot, D., 1998. « Urban runoff impacts on particulate trace metal concentrations in river Seine. » *Water, Air, Soil Pollution*, vol. 101, p. 107–116.

- Etcheber, H., Taillez, A., Abril, G., Garnier, J., Servais, P., Moatar, F. et Commarieu, M. V., 2007. « Particulate organic carbon in the estuarine turbidity maxima of the Gironde, Loire and Seine estuaries : origin and lability. » *Hydrobiologia*, vol. 588, p. 245–259. Doi 10.1007/s10750-007-0667-9.
- Even, S., 1995. *Modélisation d'un écosystème fluvial : la Seine. Le modèle ProSe*. Thèse de doctorat, Mines ParisTech. 348 pages.
- Even, S., 2004. *Développement et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel. Thème : Développement de modules opérationnels*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/25 (Fontainebleau).
- Even, S., 2008. *Notice d'utilisation du logiciel ProSe. Un logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique. Version 4.1. Mise à jour mars 2008*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence SE080331.
- Even, S., Bacq, N., Thouvenin, B., Garnier, J. et Servais, P., 2007a. *Étude de scénarios pour la mise en place d'un assainissement intra-estuarien. Modélisation des cycles biogéochimiques majeurs en estuaire de Seine*. rapport technique, GIP Seine Aval (Rouen). Actions opérationnelles du GIP Seine Aval. Rapport Mines ParisTech R080321SEVE (Fontainebleau).
- Even, S., Bacq, N., Thouvenin, B., Garnier, J., Servais, P. et Lafite, R., 2006a. « Modélisation de la MO en estuaire de Seine : sources et transformation ; analyse multi-contextuelle. » Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>. Séminaire Seine Aval ; Rouen 6-7 septembre 2006.
- Even, S., Bacq, N., Thouvenin, B., Garnier, J., Servais, P., Lafite, R. et Le Hir, P., 2006b. *Synthèse sur le cycle du carbone (CYMES). Validation de SIAM3D/RIVE pour le cycle de la matière organique et bilans de carbone*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval III. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>.
- Even, S., Billen, G., Bacq, N., Ruelland, D., Garnier, J., Poulin, M., Thery, S. et Blanc, S., 2007b. « New tools for modelling water quality of hydrosystems : An application in the Seine River Basin in the frame of the Water Framework Directive. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 274–291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.019>.
- Even, S., Billen, G., Servais, P., Paffoni, C., Legruel, S., Duchesne, S., Rousselot, O. et Lamy, F., 2007c. *Validation du modèle PROSE sur l'année 2003 et simulation prospective de programmes de mesures à l'horizon 2012 entre Paris et Poses*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S. et Flipo, N., 2005. *Gestion des bases de données, développement et transfert des outils de modélisation. Développements autour des logiciels PROSE, version 5/CAWAQS. Création d'une interface intégrée et couplage avec les SIG*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Contribution au rapport Piren Seine 2004. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/05/07 (Fontainebleau).
- Even, S., Flipo, N., Poulin, M., Bonniez, S. et Keryell, R., 2002. *Développements opérationnels des outils de modélisation de l'eau de la Seine : ProSe à tubes de courant, version 3*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Contribution du Centre de Géoscience au rapport d'activité Piren Seine 2002.
- Even, S., Keryell, R., Flipo, N. et Poulin, M., 2003. *Développements et interfaces de PROSE 3.5*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Contribution du Centre de Géoscience au rapport d'activité Piren Seine 2003.

- Even, S., Keryell, R., Flipo, N. et Poulin, M., 2004a. *Développements et interfaces de PROSE 3.5*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/04 (Fontainebleau).
- Even, S., Martin, L., Poulin, M. et Mouchel, J. M., 2008a. « Influence of navigation on sediment transport in the Seine (France). » *Aquatic Science*. À re-soumettre.
- Even, S., Mouchel, J.-M., Seidl, M., Servais, P. et Poulin, M., 2004b. « Oxygen deficits in the Seine river downstream of combined sewer overflows : importance of the suspended matter transport. » *Ecological modelling*, vol. 173, n° 2-3, p. 177–196.
- Even, S., Mouchel, J. M., Servais, P., Flipo, N., Poulin, M., Blanc, S., Chabanel, M., Paffoni, C. et Duchesnes, S., 2007d. « Modeling the impacts of Combined Sewer Overflows on the river Seine water quality. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 140–151. <Http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007>.
- Even, S. et Poulin, M., 1999. *Extension du modèle PROSE vers les secteurs amont : application à la Seine entre Troyes et Montereau*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/98/66 (Fontainebleau).
- Even, S., Poulin, M., Garnier, J., Billen, G., Servais, P., Chesterikoff, A. et Coste, M., 1998. « River ecosystem modelling : application of the PROSE model to the Seine river (France). » *Hydrobiologia*, vol. 373, p. 27–37.
- Even, S., Poulin, M. et Thouvenin, B., 2004c. *Evolution prospective de la qualité des eaux de surface. Scénario tendanciel de la Directive Cadre Européenne de l'agglomération parisienne à l'estuaire*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S., Poulin, M. et Thouvenin, B., 2004d. *Scénario tendanciel 2015. Application de SiAM1D à l'estuaire de la Seine de Poses à Honfleur*. rapport technique, Mines ParisTech - Agence de l'Eau Seine Normandie. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/17 (Fontainebleau).
- Even, S. et Thouvenin, B., 2007. *Modélisation et bilans de carbone en estuaire de Seine (synthèse CYMES). Le modèle MOSES (Modèle de Matière Organique Simplifié en Estuaire de Seine). Thème Morphodynamique, cycle des vases et contaminants associés. Rapport d'activité 2006*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>.
- Even, S., Thouvenin, B., Bacq, N., Billen, G., Garnier, J., Guézennec, L., Blanc, S., Ficht, A. et Le Hir, P., 2007e. « An integrated modeling approach to forecast the impact of Seine basin managements on the Seine estuary. » *Hydrobiologia*, vol. 588, p. 13–29. Doi 10.1007/s10750-007-0649-y.
- Even, S., Thouvenin, B., Garnier, J., Servais, P. et Bacq, N., 2008b. « Modeling the sources and fate of organic matter in a macro-tidal estuary (Seine, France) for a multi-scale analysis. » *Estuaries*. Soumis.
- Evensen, G., 2007. *Data Assimilation : the Ensemble Kalman Filter*. Springer, Berlin. 280 pages.
- Flipo, N., 2001. *Site atelier du Grand Morin : modélisation biogéochimique et étude d'un compartiment benthique*. Mémoire du DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, filière Hydrobiologie et Hydrogéologie quantitative, Université Pierre et Marie Curie - Mines ParisTech - École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- Flipo, N., 2005. *Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et en rivière : application au bassin de Grand Morin*. Thèse de doctorat, Mines ParisTech. 244 pages.

- Flipo, N., Even, S., Poulin, M. et Ledoux, E., 2004a. « Hydrological part of CAWAQS (CAatchment WATER Quality Simulator) : fitting on a small sedimentary basin. » J. Jones (éditeur), *Proceedings of the 29th Congress, Lahti, Finland, 8-14 August 2004*. International Association of Theoretical and Applied Limnology (Verh. Intern. Verein. Limnol.), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Stuttgart), vol. 29 (part 2), p. 768–772.
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M. et Ledoux, E., 2007a. « Modelling the nitrates fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 69–79. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007).
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Tusseau-Vuillemin, M.-H., Améziane, T. et Dauta, A., 2004b. « Biogeochemical modelling at the river scale : plankton and periphyton dynamics : Grand Morin case study, France. » *Ecological Modelling*, vol. 176, p. 333–347.
- Flipo, N., Jeannée, N., Poulin, M., Even, S. et Ledoux, E., 2007b. « Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France) : combined use of geostatistics and physically-based modelling. » *Environmental Pollution*, vol. 146, n° 1, p. 98–109.
- Flipo, N., Rabouille, C., Poulin, M., Even, S. et Tusseau, M.-H., 2007c. « Primary production in headwater streams of the Seine basin : the Grand Morin river case study. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 140–151. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007).
- Fuhrman, J. et Azam, F., 1982. « Thymidine Incorporation as a Measure of Heterotrophic Bacterioplankton Production in Marine Surface Waters : Evaluation and Field Results. » *Marine Biology*, vol. 66, p. 109–120.
- Garnier, J. et Billen, G., 2002. « The RIVERSTRAHLER modelling approach applied to a tropical case study (The Red Hong- River, Vietnam) : nutrient transfer and impact on the Coastal Zone. » *SCOPE issue. Collection Marine Research Works*, vol. 12, p. 51–65.
- Garnier, J., Billen, G. et Coste, M., 1995. « Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the river Seine : observations and modelling. » *Limnology Oceanography*, vol. 40, n° 4, p. 750–765.
- Garnier, J., Billen, G., Even, S., Etcheber, H. et Servais, P., 2008. « Organic matter dynamics and budgets in the maximum turbidity zone of the Seine Estuary (France). » *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 77, p. 150–162.
- Garnier, J., Billen, G., Hannon, E., Fonbonne, S., Videnina, Y. et Soulie, M., 2002. « Modelling the Transfer and Retention of Nutrients in the Drainage Network of the Danube River. » *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 54, n° 3, p. 285–308.
- Garnier, J., Billen, G. et Servais, P., 1992. « Physiological characteristics and ecological role of small- and large-sized bacteria in a polluted river (Seine River, France). » *Archiv für Hydrobiologie-Beih. Ergebnisse der Limnologie*, vol. 37, p. 83–94.
- Garnier, J., Billen, G., Sébilo, M., Némery, J., Martinez, A., Desruelle, M., Pinault, S., Cébron, A., d'Ayguessives, A., Servais, P., Mercier, P., Anzil, A., Parlant, E., Vacher, L., Abril, G., Wit, R. D., Lemaire, E., Etcheber, H., Mounier, S., Garnier, C., Février, D., Even, S. et Ficht, A., 2003. *Fonctionnement du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine. Transformation des éléments biogènes (C, N, P, Si). Rapport de synthèse, thème 3. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval II. GIP Seine Aval (Rouen)*, <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>.
- Garnier, J., Némery, J., Billen, G. et Théry, S., 2005. « Nutrient dynamics and control of eutrophication in the Marne River system : modelling the role of exchangeable phosphorus. » *Journal of Hydrology*, vol. 304, p. 397–412.
- Garnier, J., Servais, P., Billen, G., Akopian, M. et Brion, N., 2001. « Lower Seine River and Estuary (France) Carbon and Oxygen Budgets During Low Flow. » *Estuaries*, vol. 24, n° 6B, p. 964–976.

- Gomez, E., 2002. *Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine*. thèse, Mines ParisTech. 291 pages.
- Gourlay, C., 2004. *Biodisponibilité des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les écosystèmes aquatiques : influence de la matière organique naturelle et anthropique*. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris). 128 pages.
- Gourlay, C., Mouchel, J.-M., Tusseau-Vuillemin, M.-H. et Garric, J., 2005a. « Influence of algal and bacterial particulate organic matter on benzo[a]pyrene bioaccumulation in *Daphnia magna*. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 346, n° 1-3, p. 220–230.
- Gourlay, C., Tusseau, M.-H., Mouchel, J. M. et Garric, J., 2005b. « The ability of dissolved organic matter (DOM) to influence benzo[a]pyrene bioavailability increases with DOM biodegradation. » *Ecotoxicology Environmental Safety*, vol. 55, n° 3, p. 359–370.
- Hardy, C., 2006. *Modélisation du devenir des micro-polluants dans le bassin versant de la Seine. Projet personnel de laboratoire*. Mémoire de stage de recherche de deuxième année, ENSTA (Paris).
- Harremoes, P., 1982. « Immediate and delayed oxygen depletion in rivers. » *Water Research*, vol. 16, p. 1093–1098.
- Harremoes, P., Napstjert, L., Rye, C. et Larsen, H., 1996. « Investigation of Rain Impact on an Urban River. » F. Sieker et H.-R. Verworn (éditeur), *Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Storm Drainage. University of Hannover. Hannover, Germany, 9-13 Sept '96*. Seeliger Sofort-Druck (Hannover, Germany), vol. 1, p. 347–352.
- Harvier, J.-F., 2006. *Evaluation des impacts des rejets urbains de temps de pluie de l'estuaire de Seine*. Rapport de stage de troisième année, option Sciences de la Terre et Environnement, Mines ParisTech.
- Hervouet, J. et Van-Haren, L., 1995. *TELEMAC2D Version 3.0 Principle note*. rapport technique, Électricité de France (EDF)-Gaz de France (GDF), Laboratoire National d'Hydro-Environnement (LNHE, Chatou).
- Hoagland, P., Anderson, D., Kaoru, Y. et White, A., 2002. « The economic effects of harmful algal blooms in the United States : Estimates, assessment issues, et information needs. » *Estuaries*, vol. 25, n° 4B, p. 819–837.
- de Jonge, V. N. et Elliot, M., 2001. « Eutrophication. » J. Steele, S. Thorpe et K. Turekian (éditeur), *Encyclopedia of Ocean Sciences*, Academic Press, London, 3399 p, p. 852–870.
- de Jonge, V. N., Elliot, M. et Orive, E., 2002. « Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem : eutrophication. » *Hydrobiologia*, vol. 475/476, p. 1–19.
- Jorgensen, S. E., 2008. « Everview of the model types available for development of ecological models. » *Ecological Modelling*, vol. 215, n° 1-3, p. 3–9.
- Lafite, R., Deloffre, J., Lesueur, P., Lesourd, S., Dupont, J.-P., Brun-Cottan, J.-C. et Verney, R., 2004. *Rapport Annuel 2003. Thème 2 : Zone connexes. DYVA*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval II. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>.
- Lancelot, C. et Mathot, S., 1985. « Biochemical fractionation of primary production by phytoplankton in belgian coastal waters during short and long term incubations with ¹⁴C-bicarbonate. I. Mixed diatom population. » *Marine Ecology*, vol. 86, p. 219–226.
- Lancelot, C. et Mathot, S., 1987. « Dynamics of a Phaeocystis-dominated spring bloom in Belgian coastal waters. I. Phytoplanktonic activities and related parameters. » *Marine Ecology Progress Series*, vol. 37, p. 239–248.

- Lancelot, C., Mathot, S. et Owens, N., 1986. « Modelling protein synthesis, a step to an accurate estimate of net primary production : *Phaeocystis pouchetii* colonies in belgian coastal waters. » *Marine Ecology Progress Series*, vol. 32, p. 193–202.
- Lancelot, C., Staneva, J., Eeckhout, D. V., Beckers, J.-M. et Stanev, E., 2002. « Modelling the Danube-influenced North-western Continental Shelf of the Black Sea. II : Ecosystem Response to Changes in Nutrient Delivery by the Danube River after its Damming in 1972. » *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 54, n° 3, p. 473–499.
- Lancelot, C., Veth, C. et Mathot, S., 1991. « Modelling ice-edge phytoplankton bloom in the Scotia-Weddell Sea sector of the Southern Ocean during spring 1988. » *J. Mar. System*, vol. 2, p. 333–346.
- Le, T. Q., Billen, G., Garnier, J., Théry, S., Ruelland, D. et Chau, V. M., 2008. « Modelling nutrient transfer in the sub-tropical Red River system (China and Vietnam) : implementation of the SE-NEQUE/RIVERSTRAHLER model. » *Biogeochemistry*. Submitted.
- Le Hir, P., Ficht, A., Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.-P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B. et Cugier, P., 2001. « Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France). » *Estuaries*, vol. 24, n° 6b, p. 950–963.
- Le Hir, P., Silva Jacinto, R., Thouvenin, B., Guézennec, L., Bassoulet, P., Cugier, P., Leboulenger, F., Hocdé, R., Lesueur, P. et Romaña, L. A., 1999. « Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau. » Programme Scientifique Seine Aval (éditeur), *Seine Aval*, IFREMER (Plouzané), vol. 1, p. 29.
- Ledoux, E., Girard, G. et Villeneuve, J., 1984. « Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. » *La Houille Blanche*, n° 1-2, p. 101–110.
- van der Lee, J. et Windt, L. D., 2002. *User's Manual. CHESS Tutorial and Cookbook updates for version 3.0.* rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/02/13.
- Legovic, T., 1997. « Toxicity may affect predictability of eutrophication models in the coastal sea. » *Ecological Modelling*, vol. 99, n° 1, p. 1–6.
- Lek, S. et Guégan, J. F., 1999. « Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. » *Ecological Modelling*, vol. 120, n° 2-3, p. 65–73.
- Levassor, A. et Ledoux, E., 1996. *Programme NEWSAM - notice d'utilisation.* rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau).
- Loucaides, S., Cappellen, P. V. et Behrends, T., 2008. « Dissolution of biogenic silica from land to ocean : Role of salinity and pH. » *Limnology Oceanography*, vol. 53, n° 4, p. 1614–1621.
- Lunau, M., Lemke, A., Dellwig, O. et Simon, M., 2006. « Physical and biogeochemical controls of microaggregate dynamics in a tidally affected coastal ecosystem. » *Limnology Oceanography*, vol. 51, n° 2, p. 847–859.
- Maldiney, M.-A., 1994. *Caractéristiques physiques des particules en suspension dans un fleuve canalisé, exemple de la Seine.* Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées (Marne la Vallée). 348 pages.
- Marsalek, J. et Kok, S., 1997. « Stormwater Management and Abatement of Combined Sewer Overflow Pollution. » *Water Quality Research Journal of Canada*, vol. 32, n° 1, p. 1–5.
- Martin, L., 1997. *Modélisation du fonctionnement écologique de la Marne : couplage axe principal et bassins versants.* Mémoire de DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, Université Pierre et Marie Curie - Mines ParisTech - École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.

- Martin, L., 2001. *Fonctionnement écologique de la Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères : données expérimentales et modélisation bidimensionnelle*. Thèse de doctorat, Mines ParisTech. 279 pages.
- Martin, L., Even, S., Poulin, M. et Mouchel, J. M., 2005. « Influence of navigation on sediment transport in the Seine (France). » Résumé accepté à INTERCOH, 8th International Conference on Cohesive Sediment Transport, Saga, Japan, 20-23 septembre 2005.
- Mascaro, S., 1995. *Application du modèle PROSE aux pluies d'orage. Travail d'option Sciences de la Terre et Environnement*. Rapport de stage de troisième année, option Sciences de la Terre et Environnement, Mines ParisTech.
- Mehta, A. J., Williams, D. J., Williams, P. R. et Feng, J., 1995. « Tracking Dynamical Changes in Mud Bed due to Waves. » *J. Hyd. Eng.*, vol. 121, n° 6, p. 504–506.
- Mesnage, V., Lafite, R., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Boust, D., Douville, E., Rozet, M., Leclerc, G., Solier, L., Bochet, A., Leloup, J., Quillet, L., petit, F., Clarisse, O., Ouddane, B., Fischer, J.-C., Wartel, M., Davoult, D., Lesourd, S., Spilmont, N., Miramand, P., Fichet, D., Blanchard, G., Radenac, G., Herman, H., Guyot, T. et Huet, V., 2002. *Rapport Annuel 2002. Thème 2 : Zone connexes. Action 29 - RII-F-Fonctionnement des vasières. Projet DYVA*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval II. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>.
- Meybeck, M., 2004. « The Global Change of continental aquatic systems : dominant impacts of human activities. » *Water Science and Technology*, vol. 49, n° 7, p. 73–83.
- Mignolet, C., Schott, C. et Benoît, M., 2007. « Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin : Methods for agronomic approaches on a regional scale. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 13–32.
- Montserrat, F., 2005. « Tackling the NOM conundrum : are bells and whistles binding models always needed ? » Laboratoire PROTEE (éditeur), *First International Workshop on Organic Matter Modeling (WOMM)*. Toulon, France. November 16th-18th, 2005. Université Sud Toulon Var (Toulon), p. 9.
- Némery, J., 2003. *Origine et devenir du phosphore dans le continuum aquatique de la Seine des petits bassins amont à l'estuaire : rôle du phosphore échangeable sur l'eutrophisation*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Officer, C. et Ryther, J., 1980. « The possible importance of silicon in marine eutrophication. » *Marine Ecology, Prog. Ser.*, vol. 3, p. 383–391.
- Olden, J. D. et Jackson, D. A., 2002. « Illuminating the "black box" : a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural network. » *Ecological Modelling*, vol. 154, n° 1-2, p. 135–150.
- Paffoni, C. et Krier, J., 1996. « La Seine : priorité oxygène dissous. » *Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural*, vol. 9, p. 611–616.
- Paquin, P., 2005. *Générateur automatique de Belles Interfaces*. Rapport de stage ingénieur de troisième année, Télécom Bretagne (Plouzané).
- Partheniades, E., 1965. « Erosion and deposition of cohesive soils. » *Journal of the Hydraulic Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. HY1, p. 105–139.
- Pelletier, J.-B., 1999. *Modélisation hydrodynamique de l'Orge et de la Beuvronne*. Rapport de stage de troisième année, option Sciences de la Terre et Environnement, Mines ParisTech.
- Puckett, L., 2004. « Hydrogeologic controls on the transport and fate of nitrate in groundwater, beneath riparian buffer zones : results from thirteen studies across the United States. » *Wat. Sci. Tech.*, vol. 49, n° 3, p. 47–53.

- Ragueneau, O., Chauvaud, L., Leynaert, A., Thouzeau, G., Paulet, Y.-M., Bonnet, S., LMorrain, A., Grall, J., Corvaisier, R., Le Hir, M., Jean, F. et Clavier, J., 2002a. « Direct evidence of a biologically active coastal silicate pump : Ecological implications. » *Limnology Oceanography*, vol. 47, n° 6, p. 1849–1854.
- Ragueneau, O., Lancelot, C., Egorov, V., Vervlimmeren, J., Cociasu, A., Déliat, G., Krastev, A., Daoud, N., Rousseau, V., Popovitchev, V., Brion, N., Popa, L. et Cauwet, G., 2002b. « Biogeochemical Transformation of Inorganic Nutrients in the Mixing Zone between the Danube River and the North Western Black Sea. » *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 54, n° 3, p. 321–336.
- Rauch, W., Henze, M., Koncsocs, L., Reichert, P., Shanahan, P., Somlyódy, L. et Vanrolleghem, P., 1998. « River Water Quality Modelling : I. State of the Art. » *Wat. Sci. Tech.*, vol. 38, n° 11, p. 237–244.
- Renaud, J.-P., 1998. *Modélisation hydrodynamique de petits cours d'eau : le Grand-Morin et la Beuvronne*. Rapport de stage de troisième année, option Sciences de la Terre et Environnement, Mines ParisTech.
- Rousseau, A., Mailhot, A., Turcotte, R., Duchemin, M., Blanchette, C., Roux, M., Etong, N., Dupont, J. et Villeneuve, J.-P., 2000. « GIBSI - An integrated modelling system prototype for basin management. » *Hydrobiologia*, vol. 422/423, p. 465–474.
- Ruelland, D. et Billen, G., 2002. *Développements méthodologiques en matière de modèles et gestion de données. Seneque 3, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité des eaux de surface. Rapport d'activité du Piren Seine*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Ruelland, D., Billen, G., Brunstein, D. et Garnier, J., 2007. « SENEQUE 3 : a GIS interface to the RIVERSTRAHLER model of the biogeochemical functioning of river systems. » *Science of the Total Environment*, vol. 375, p. 257–273.
- Schlee, M., 2002. *Generative Programming of Graphical User Interface*. Thèse de doctorat, University of Applied Sciences, Kaiserslautern, Allemagne.
- Sebilo, M., 2003. *Utilisation du traçage isotopique naturel pour caractériser et quantifier les processus de nitrification et de dénitrification à l'échelle du réseau hydrographique de la Seine*. Thèse de doctorat, Université Paris VI Pierre et Marie Curie.
- Seidl, M., 1997. *Caractérisation des rejets urbains de temps de pluie et de leurs impacts sur l'oxygénation de la Seine*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées (Marne la Vallée).
- Seidl, M., Huang, W. et Mouchel, J., 1998a. « Toxicity of combined sewer overflows on river phytoplankton : the role of heavy metals. » *Environmental Pollution*, vol. 101, p. 107–116.
- Seidl, M., Servais, P., Martaud, A., Gandouin, C. et Mouchel, J., 1998b. « Organic carbon biodegradability and heterotrophic bacteria along a combined sewer catchment during rain events. » *Wat. Sci. Tech.*, vol. 37, p. 25–33.
- Seidl, M., Servais, P. et Mouchel, J.-M., 1998c. « Organic matter transport and degradation in the river Seine (France) after a Combined Sewer Overflow. » *Water Research*, vol. 32, p. 3569–3580.
- Seitzinger, S., Styles, R., Boyer, E., Alexander, R., Billen, G. et Howarth, R., 2002. « Nitrogen retention in rivers : model development and application to watersheds in the northern U.S.A. » *Biogeochemistry*, vol. 57/58, p. 199–237.
- Servais, P., 1989. « Modélisation de la biomasse et de l'activité bactérienne dans la Meuse. » *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 2, p. 543–563.
- Servais, P., Anzil, A. et Ventresque, C., 1989. « Simple Method for Determination of Biodegradable Dissolved Organic Carbon in Water. » *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 55, n° 10, p. 2732–2734.

- Servais, P. et Billen, G., 2007. *Note sur le calcul des apports ponctuels à prendre en compte dans les modèles SENEQUE et ProSe à partir des données disponibles sur les rejets de STEPs*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Servais, P., Billen, G., Garnier, J., Idlafikh, Z., Mouchel, J.-M., Seidl, M. et Meybeck, M., 1998. « Carbone organique : origines et biodégradabilité. » M. Meybeck, G. de Marsily et Éliane Fustec (éditeur), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, p. 483–525.
- Servais, P., Billen, G. et Hascoët, M.-C., 1987. « Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters. » *Water Research*, vol. 21, n° 4, p. 445–450.
- Servais, P. et Garnier, J., 2006. « Organic carbon and bacterial heterotrophic activity in the maximum turbidity zone of the Seine estuary (France). » *Aquatic Science*, vol. 68, p. 78–85.
- Servais, P., Garnier, J., Demarteau, N., Brion, N. et Billen, G., 1999. « Supply of organic matter and bacteria to aquatic ecosystems through waste water effluents. » *Water Research*, vol. 35, p. 3521–3531.
- Sferratore, A., Billen, G., Garnier, J., Humborg, C. et Rahm, L., 2008. « Modelling nutrient fluxes from sub-arctic basins : comparison of pristine vs. dammed rivers. » *Journal of Marine Systems*. In press.
- Sheibley, R., Duff, J., Jackman, A. et Triska, F., 2003. « Inorganic nitrogen transformations in the bed of the Shingobee River, Minnesota : integrating hydrologic and biological processes using sediment perfusion cores. » *Limnology Oceanography*, vol. 48, n° 3, p. 1129–1140.
- Sjodin, A., Lewis, W. et Saunders, J., 1997. « Denitrification as a component of the nitrogen budget for a large plains river. » *Biogeochemistry*, vol. 39, p. 327–342.
- Smitz, J., Everbecq, E. et Delièsge, J., 1999. « Pégase, une méthodologie et un outil de simulation prévisionnelle pour la gestion de la qualité des eaux de surface. » *Tribune de l'eau*, vol. 588, n° 4, p. 73–82.
- Spitz, A. et Leenheer, J., 1991. « 9. Dissolved Organic Carbon in Rivers. » E. T. Degens, S. Kempe et J. E. Richey (éditeur), *Biogeochemistry of Major World Rivers*. SCOPE 42, Scientific Committee On Problems of the Environment (SCOPE). [Http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope42/](http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope42/).
- Storme, G., 2004. *Impact des rejets du système d'assainissement sur la rivière. Validation du modèle PROSE avec les données mesurées pendant le chômage de l'usine de Valenton*. Stage de master spécialisé ISIGE (Fontainebleau), Mines ParisTech.
- Strahler, A., 1957. « Quantitative analysis of watershed geomorphology. » *Transactions of the American Geophys. Union*, vol. 38, p. 913–920.
- Streeter, H. et Phelps, E. B., 1925. *A study of the pollution and natural purification of the Ohio River*. rapport technique 146, U.S. Public Health Service, Treasury Department, Washington DC. Public Health Bulletin.
- Struyf, E., Dausse, A., Damme, S. V., Bal, K., Gribsholt, B., Boschker, H. T., Mindelburg, J. J. et Meire, P., 2006. « Tidal marshes and biogenic silica recycling at the land-sea interface. » *Limnology Oceanography*, vol. 51, n° 2, p. 836–846.
- Tangerino, C., 1994. *Mesure de la vitesse de chute des matières en suspension, du carbone organique total et des bactéries en Seine*. Master recherche 2, CEREVE, École Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées (Marne la Vallée).
- Thibodeaux, L., Poulin, M. et Even, S., 1994. « A model for enhanced aeration of streams by motor vessels with application to the River Seine. » *J. Hazardous Materials*, vol. 37, n° 3, p. 459–473.

- Thouvenin, B., Auger, D., Averty, B., ans Jean-François Chiffolleau, B. B., Cossa, D., Cozic, A., Gonzales, J.-L., Héas-Moisan, K., Ménard, D., Radford-Knoery, J., Rozuel-Chartier, E., Santini, A., Sargian, P., Truquet, I., Olivier, M., Even, S., Le Hir, P., Bacq, N. et Fisson, C., 2007a. *Contibution à l'étude de la dynamique et de la spéciation des contaminants*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval III. GIP Seine Aval (Rouen), [http ://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/](http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/)). Seine-Aval 3 : L'analyse et la gestion environnementales « recherche appliquée ». Thème : « Morphodynamique, cycle des vases et contaminants associés ».
- Thouvenin, B., Billen, G., Even, S., Fischer, J.-C., Gonzalez, J.-L., Le Hir, P., Loizeau, V., Mouchel, J.-M., Olivier, C. et Jacinto, R. S., 1999. « Programme scientifique Seine Aval. Les modèles outils de connaissance et de gestion. » Programme Scientifique Seine Aval (éditeur), *Seine Aval*, IFREMER (Plouzané), vol. 16, p. 32.
- Thouvenin, B., Gonzales, J. L., Chiffolleau, J.-F., Boutier, B. et Le Hir, P., 2007b. « Trace Metals Dynamics in the Seine Estuary : Contributions of Measurements and Modeling. » *Hydrobiologia*, vol. 588, p. 109–124.
- Thouvenin, B., Gonzalez, J.-L., Sargian, P. et Even, S., 2007c. *Contribution au fascicule CYMES :liens entre la matière organique et les contaminants chimiques. Rapport d'activité 2007*. Thème « Morphodynamique, cycle des vases et contaminants associés ». rapport technique, Programme scientifique Seine Aval III. GIP Seine Aval (Rouen), [http ://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/](http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/)).
- Thévenot, D., Meybeck, M., Chesterikoff, A. et Chevreuil, M., 1998. « Métaux : sources multiples et accumulation. » M. Meybeck, G. de Marsily et Éliane Fustec (éditeur), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, p. 391–438.
- Tusseau-Vuillemin, M.-H., Garnier, J., Servais, P. et Laroche, L., 2001. *Charges domestiques spécifiques et rejets de station d'épuration*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Thème «Rejets et contamination urbaine».
- Uher, E. et Tusseau-Vuillemin, M.-H., 2006. *Méthodologie et résultats préliminaires de l'évaluation du risque écotoxicologique lié au zinc en Seine*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/).
- Vannote, R., Minshall, G., Cummins, K., Sedell, J. et Cushing, C., 1980. « The river continuum concept. » *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 37, p. 130–137.
- Verney, R., 2006. *processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs*. Thèse de doctorat, Université de Rouen.

Deuxième partie

Notice individuelle

Chapitre 7

Curriculum Vitae

7.1 Situation

Depuis 1999 Ingénieure de recherche ARMINES au Centre de Géosciences (CG) à MINES PARIS-TECH* ;

1996-1999 Chargée de recherche à MINES PARISTECH ;

1993-1996 Attachée de recherche à MINES PARISTECH.

7.2 Formation

1995 Thèse de doctorat à MINES PARISTECH, spécialité *Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives* intitulée « *Modélisation d'un écosystème fluvial : la Seine. Le modèle ProSe* » ; thèse dirigée par Michel POULIN ;

1990 Diplôme d'études approfondies (DEA) *Sciences et Techniques de l'Environnement*, École des Ponts et Chaussées/ENGREF/université Paris XII ;

1989 Diplôme d'ingénieur civil Mines ParisTech.

*Ce statut m'a été accordé car il permettait une plus grande souplesse d'organisation (télétravail) afin de répondre à ma demande qui était de pouvoir suivre mon mari en poste à TÉLÉCOM BRETAGNE à Brest

Chapitre 8

Activités pédagogiques

8.1 Encadrements

8.1.1 Les stages que j'ai co-encadrés

Stages d'élèves d'écoles d'ingénieurs, d'étudiants en DEA ou en master que j'ai co-encadrés :

Serge MASCARO (1995) stage co-encadré avec Michel POULIN (MINES PARISTECH), en collaboration avec le Syndicat Interdépartemental de l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP).

Mascaro, S., 1995. Application du modèle PROSE aux pluies d'orage. Travail d'option Sciences de la Terre et Environnement. Rapport de stage de troisième année, option Sciences de la Terre et Environnement, Mines ParisTech.

Margareta MIHAILESCU (1995) stage effectué dans le cadre d'un programme de collaboration franco-roumaine : «*Modélisation monodimensionnelle de l'estuaire de la Seine*». Son stage a été valorisé par la rédaction d'un rapport scientifique du programme Seine Aval. M^{me} MIHAILESCU a ensuite réalisé une thèse à l'UMR SISYPHE, université Paris VI, soutenue en 1998 et dirigée par Jean-Pierre Carbonnel : «*Modélisation du transport et de la biodégradation des polluants dans les rivières. Application au bassin de l'Arges (Roumanie)*».

Even, S., M. Mihailescu, et M. Poulin, 1996. Modèle SAM-1D/RIVE appliqué à l'estuaire de la Seine. Rapport technique, Programme scientifique Seine Aval I. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).

Laurent MARTIN (1997) stage co-encadré avec Michel POULIN dans le cadre du PIREN SEINE. Laurent MARTIN a ensuite réalisé une thèse que j'ai co-encadrée, au Centre de Géosciences, MINES PARISTECH (voir ci-dessous).

Martin, L., 1997. Modélisation du fonctionnement écologique de la Marne : couplage axe principal et bassins versants. Mémoire de DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, Université Pierre et Marie Curie - Mines ParisTech - École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.

Jean-Philippe RENAUD (1998) stage co-encadré avec Michel POULIN, en collaboration avec la CGE-SEDIF :

Renaud, J.-P., 1998. Modélisation hydrodynamique de petits cours d'eau : le Grand-Morin et la Beuvronne. Rapport de stage de troisième année, option Sciences de la Terre et Environnement, Mines ParisTech.

Jean-Baptiste PELLETIER (1999) stage co-encadré avec Michel POULIN, en collaboration avec la CGE-SEDIF :

Pelletier, J.-B., 1999. Modélisation hydrodynamique de l'Orge et de la Beuvronne. Rapport de stage de troisième année, option Sciences de la Terre et Environnement, Mines ParisTech.

Kristel AUBERT (1999) stage co-encadré avec Michel POULIN, en collaboration avec la CGE-SEDIF :

Aubert, K., 1999. Simulation de pollutions accidentelles sur la Marne entre Epernay et Château-Thierry. Rapport de stage ingénieur de troisième année, École Nationale Supérieure de Géologie - Institut National Polytechnique de Lorraine - Université de Nancy.

Sylvain BOURLANGE (2000) stage co-encadré avec Michel POULIN, dans le cadre du PIREN SEINE et en collaboration avec la DIREN Île de France. Sylvain BOURLANGE a poursuivi avec un travail de thèse «*Relations entre fluides et déformations dans le prisme d'accrétion de Nankai*», au laboratoire de Géologie de l'École Normale Supérieure, dirigée par Pierre Henry de l'université Paris XI, soutenue en 2003.

Bourlange, S., 2000. Modélisation hydraulique et écologique d'une rivière amont : le Grand-Morin. Mémoire du DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, Université Pierre et Marie Curie - Mines ParisTech - École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.

Nicolas FLIPO (2001) stage co-encadré avec Michel POULIN, dans le cadre du PIREN SEINE. Nicolas FLIPO a poursuivi ses travaux avec une thèse que j'ai co-encadrée, au Centre de Géosciences, MINES PARISTECH (voir ci-dessous).

Flipo, N., 2001. Site atelier du Grand Morin : modélisation biogéochimique et étude d'un compartiment benthique. Mémoire du DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, filière Hydrobiologie et Hydrogéologie quantitative, Université Pierre et Marie Curie - Mines ParisTech - École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.

Guillaume STORME (2004) stage de master spécialisé ISIGE (MINES PARISTECH) stage co-encadré avec Michel POULIN, en collaboration avec le SIAAP :

Storme, G., 2004. Impact des rejets du système d'assainissement sur la rivière. Validation du modèle PROSE avec les données mesurées pendant le chômage de l'usine de Valenton. Stage de master spécialisé ISIGE (Fontainebleau), Mines ParisTech.

Pierre PAQUIN (2005) stage réalisé au Département Informatique de TÉLÉCOM-BRETAGNE (Plouzané). J'ai initié ce stage dans le cadre du PIREN SEINE, je l'ai dirigé et co-encadré avec Ronan KERYELL (TÉLÉCOM-BRETAGNE) :

Paquin, P., 2005. Générateur automatique de Belles Interfaces. Rapport de stage ingénieur de troisième année, Télécom Bretagne (Plouzané).

Cécile HARDY (2006) stage de recherche de deuxième année de l'ENSTA, stage que j'ai co-encadré avec Catherine GOURLAY (CEMAGREF) :

Hardy, C., 2006. Modélisation du devenir des micro-polluants dans le bassin versant de la Seine. Projet personnel de laboratoire. Mémoire de stage de recherche de deuxième année, ENSTA (Paris).

Jean-François HARVIER (2006) stage de troisième année d'école ingénieur Mines ParisTech que j'ai initié et dirigé, dans le cadre du programme SEINE-AVAL, en collaboration avec Isabelle MAILLET de l'Agglomération de Rouen et le GIP Seine Aval :

Harvier, J.-F., 2006. Evaluation des impacts des rejets urbains de temps de pluie de l'estuaire de Seine. Rapport de stage de troisième année, option Sciences de la Terre et Environnement, Mines ParisTech.

Fadi NAJEM ELDINE (2006) stage de deuxième année de Master Recherche en Logiciels et Méthodes Formelles Informatique (TÉLÉCOM-BRETAGNE) que j'ai initié et co-encadré avec Ronan KERYELL, chercheur à TÉLÉCOM-BRETAGNE, dans le cadre du développement de l'outil GABI.

Eldine, F. N., 2006. Développement d'un outils de Génération Automatique de Belles Interfaces (GABI). Rapport de stage de deuxième année de master recherche de logiciels et méthodes formelles informatique, Télécom-Bretagne (Plouzané).

8.1.2 Les thèses que j'ai co-encadrées

Marc DELBEC (1997-...) ; thèse dirigée par Jean-Marie MOUCHEL (École Nationale Supérieure de Ponts et Chaussées). Marc DELBEC est aujourd'hui ingénieur dans le bureau d'études PROLOG ;

Delbec, M., 1997-2000. Transfert opérationnel de modèles scientifiques de qualité de l'eau pour la gestion des rejets urbains de temps sec et de temps de pluie. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Ponts et Chaussée (Marne la Vallée). Non soutenue.

Laurent MARTIN (1998-2001) ; thèse dirigée par Michel POULIN ; Laurent MARTIN est aujourd'hui chercheur au Département LNHE Groupe Gestion Hydro-Environnementale des Ouvrages à EDF.

Martin, L., 2001. Fonctionnement écologique de la Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères : données expérimentales et modélisation bidimensionnelle. Thèse de doctorat, Mines ParisTech. 279 pages.

Nicolas FLIPO (2002-2005) ; thèse dirigée par Michel POULIN ; Nicolas FLIPO a été embauché en tant que chercheur en février 2008 au Centre de Géosciences de Mines ParisTech après avoir passé un an et demi de stage post-doctoral à l'Université de Stanford au département des sciences géologiques et environnement.

Flipo, N., 2005. Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et en rivière : application au bassin de Grand Morin. Thèse de doctorat, Mines ParisTech. 244 pages.

Eduardo CHAVARRI (2006-) ; Eduardo est professeur à l'Université Agraire de Molina (Pérou). Sa thèse se déroule dans la cadre du projet HYBAM pour l'étude Hydro-géodynamique actuelle du Bassin Amazonien, piloté par l'IRD. Cette thèse de doctorat a débutée en 2006. Elle est dirigée par Jean-Loup GUYOT et co-dirigée par Marie-Paule BONNET et moi-même.

Chavarri, E., 2006. Modélisation hydrodynamique unidimensionnelle des grands fleuves andins du bassin de l'Amazone. Thèse de doctorat, Institut de Recherche pour le Développement. En cours. A débuté en 2006.

8.2 Enseignements

Depuis 1996 séminaires de formation à la modélisation du transport réactif en rivières (profils : fonctionnaires, ingénieurs, contractuels, chercheurs, stagiaires) basés sur l'utilisation du logiciel PROSE : 25h/an

L'activité de développement et de diffusion du logiciel PROSE m'a conduite vers une réflexion sur l'outil quotidien qui est l'informatique. Les langages et les méthodologies développés en informatique se sont révélés être des supports essentiels à l'organisation de ma pensée ; en me permettant de gérer simplement des algorithmes parfois complexes, ils m'ont permis de faire des réalisations auxquelles je n'aurais pu songer sans cela ; les outils et savoir-faire pour optimiser les codes, faciliter leur maintenance, promouvoir le travail collectif sont autant d'aspects souvent négligés par les modélisateurs mais qui, en faisant gagner du temps, en rendant le travail de développement et de maintenance agréable, en facilitant les échanges, ont des retombées non négligeables sur la qualité du travail. J'essaie de faire passer une partie de ce message dans les enseignements en informatique que j'ai pris en charge à TÉLÉCOM BRETAGNE depuis 2006.

Depuis 2006 activité d'enseignement (cours et TPs) en informatique à TÉLÉCOM-BRETAGNE (Plouzané) : 80h/an ;

Chapitre 9

Activités de recherche

Entre 1990 et 1995 travaux de thèse au Centre d'Informatique Géologique (intégré au Centre de géosciences) à MINES PARIS-TECH ; thèse dirigée par Michel POULIN, réalisée dans le cadre du PIREN SEINE et en collaboration avec le CEREVE (École des Ponts et Chaussée), le laboratoire d'Écologie des Systèmes Aquatiques (LESA) (Université Libre de Bruxelles) et l'UMR SISYPHE ;

Entre 1996 et 2005 dans le cadre des programmes PIREN SEINE et SEINE-AVAL ayant pour objectif de comprendre les interactions entre les hydrosystèmes fluviaux et estuariens respectivement en relation avec les activités anthropiques sur le bassin versant, mes activités de recherche ont porté sur la modélisation des cycles biogéochimiques dans les cours d'eau/rivières et estuaire (bassin de la Seine) en vue d'améliorer les connaissances des impacts des activités humaines sur les milieux récepteurs.

dans le cadre du PIREN SEINE j'ai eu la responsabilité scientifique des développements du logiciel PROSE.

impact des rejets urbains avec des résultats originaux sur les impacts des rejets urbains de temps de pluie, en collaboration avec le CEREVE, le LESA, le SIAAP, la CGE-SEDIF, le SNS, la Ville de Paris-SAGEP ; ces travaux se sont également nourris des études et expertises réalisées dans un cadre contractuel en dehors du PIREN SEINE (voir ci-dessous).

1996 proposition d'«*application du modèle PROSE aux épisodes pluvieux de juillet et août 1991*» dans le cadre de l'axe «**Bassins versants ruraux**» coordonné par Jean-Marie MOUCHEL (École des Ponts et Chaussée) ; proposition acceptée ;

1997 proposition d'«*utilisation prédictive du modèle ProSe : étude de l'impact de divers modes d'urbanisation sur un bassin*» dans le cadre de l'axe «**Bassins versants urbains**» coordonné par Jean-Marie MOUCHEL ; proposition acceptée ;

2001 proposition de «*maîtrise des débits en situation d'étiage*» dans le cadre de l'axe «**Les outils de modélisation et leurs applications**» coordonné par Michel POULIN (MINES PARIS-TECH) ; proposition acceptée ;

2006 proposition de «*validation du modèle PROSE sur l'année 2003 et simulation prospective de programmes de mesures à l'horizon 2012 entre Paris et Poses*» dans le cadre de l'«**Atelier modélisation**» coordonné par Gilles BILLEN (UMR SISYPHE).

dynamique sédimentaire en Seine fluviale ; travaux proposés pour améliorer la prévision du transport de polluants et l'impact des rejets urbains transitoires de temps de pluie ; en collaboration avec le CEREVE, le SIAAP et EDF-LNHE ;

1997 proposition d'«*améliorations apportées au modèle PROSE relatives au transport de particules*» dans le cadre de l'axe «**Modélisation du transport des suspensions en rivière**» coordonné par Jean-Marie MOUCHEL et Philippe BONTÉ (LSCE-CEA) ; proposition acceptée ;

1998-2001 co-encadrement des travaux de thèse de Laurent MARTIN : dynamique sédimentaire dans le champ proche (10 km) d'un rejet majeur (station d'épuration d'Achères), campagnes de mesures *in situ* (mesures 3D de la conductivité, de la turbidité et de l'oxygène) et modélisation avec le logiciel TELEMAC 2D, ayant donné lieu aux propositions de «*modélisation hydraulique et hydrodispersive bidimensionnelle en Seine, applications du logiciel TELEMAC2D à l'aval d'Achères*» (1998-1999) puis «*modélisation bidimensionnelle du transport particulaire et de la qualité de l'eau dans un secteur fortement anthropisé : la Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères*» (2000) dans le cadre de l'axe «**modélisation du transport des suspensions en rivière**» coordonné par Jean-Marie MOUCHEL et Philippe BONTÉ ;

2005-2006 propositions de «*modélisation du transport et dépôt de particules dans PROSE, version 4.1 : développement d'un module de compaction*» dans le cadre de l'axe «**Rôle du transport particulaire sur le transfert des pollutions**» coordonné par Jean-Marie MOUCHEL et Philippe BONTÉ ;

les biofilms benthiques développement et validation d'un modèle de biofilm benthique pour améliorer la modélisation des processus biogéochimiques dans les cours d'eau peu profonds, en collaboration avec le CEMAGREF et le LSCE-CEA ;

2001 encadrement du stage de DEA de Nicolas FLIPO dont le sujet a fait l'objet d'une proposition du Centre de Géosciences «*Fonctionnement hydrologique et biogéochimique du Grand-Morin*» dans le cadre de l'axe «*Rejets et contaminations urbaines*» coordonné par Marie-Hélène TUSSEAU (CEMAGREF) et Pierre SERVAIS (LESA-ULB) ;

les apports diffus et le devenir des nitrates d'origine agricole ; modélisation couplée aquifères multicouches (modèle NEWSAM)/rivière (modèle PROSE) permettant d'explicitier la contamination diffuse par des couches géologiques ayant des niveaux de contamination différents ; en collaboration avec l'UMR SISYPHE et l'INRA ;

2002-2005 encadrement de la thèse de Nicolas FLIPO ayant fait l'objet de propositions successives relatives à la «*modélisation intégrée du bassin du Grand-Morin*» dans le cadre de l'axe «*Hydrologie et agriculture*» coordonné par Emmanuel LEDOUX (MINES PARISTECH).

développements informatiques et méthodologiques dont j'ai eu la responsabilité pour le logiciel PROSE ; en plus des développements réalisés dans le cadre des thèmes précédents ;

1997 rédaction d'une notice d'utilisation du modèle PROSE, dans le cadre de l'axe «*Les outils de modélisation et leurs applications*» coordonné par Michel POULIN ;

2002-2006 poursuite des développements informatiques et méthodologiques du modèle PROSE : conception et développement d'un Générateur Automatique de (Belles) Interface (GABI) à partir de l'analyse des grammaires des programmes de lecture de données ; en collaboration avec TÉLÉCOM BRETAGNE ; propositions «*Développements opérationnels des outils de modélisation de l'eau de la Seine : ProSe à tubes de courant, version 3*» (2002) puis «*Développements et interfaçages de PROSE : développement de l'outil GABI, Générateur Automatique de Belles Interfaces*» (2003-2006) dans le cadre des axes «*Les outils de modélisation et leurs applications*» (2002) coordonné par Michel POULIN, «*Développements méthodologiques et scénarios tendanciels*» (2003-2004) coordonnés par Gilles BILLEN et Michel POULIN, «*Outils et logiciels*» coordonné par moi-même (2005).

dans le cadre de SEINE-AVAL , différents thèmes abordés en collaboration avec l'IFREMER, l'UMR SISYPHE, le LESA et l'université de Rouen ; travaux de recherche réalisés grâce au modèle siAM3D-RIVE ; j'ai réalisé l'implémentation du modèle de processus biochimiques RIVE dans le modèle hydro-sédimentaire siAM3D, développé à l'IFREMER ;

1995-1998 , dans le cadre de la première phase du programme SEINE-AVAL, responsable scientifique du projet de modélisation des cycles biogéochimiques en estuaire de Seine amont pour l'analyse des processus responsables des désoxygénations dans ce secteur; propositions successives relatives à la «*modélisation de l'oxygène dissous dans l'estuaire de la Seine à l'aide du modèle couplé SiAM1D-RIVE*» dans le cadre de l'axe «*Microbiologie et oxygénation*» coordonné par Gilles BILLEN ;

2001-2006 , dans le cadre des deuxième et troisième phases du programme, responsable scientifique du projet de modélisation des cycles biogéochimiques dans le maximum de turbidité de l'estuaire ; propositions successives relatives au «*Développement et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel*» dans le cadre des axes «*Adaptation des modèles mathématiques à l'action opérationnelle de la cellule*» (2001-2004) coordonné par Bénédicte THOUVENIN (IFREMER) puis «*CYcle de la Matière organique en Estuaire de Seine (CYMES)*» coordonné par Josette GARNIER (UMR SISYPHE).

Depuis 2006

- **membre du conseil scientifique Seine Aval** ;
- **participation au montage** du projet LITEAUIII/BEEST («*Vers une approche multi-critères du Bon État/potentiel écologique des grands ESTuaires atlantiques Seine, Loire et Gironde*») en réponse à un appel d'offre du MEEDDAT, piloté par le GIP Seine Aval ;
- **instigation et montage** du projet AQUAREL («*Simulation de scénarios rétrospectifs pour une Analyse QUAntitative des RELations entre les aménagements et la qualité de l'eau de l'estuaire*») proposé dans le cadre de la quatrième phase du programme Seine Aval ;
- **responsable scientifique de la modélisation** couplant chimie et dynamique de la matière organique dans le projet EC2CO MEDISIS («*MÉtaux DIssous en Seine et Indicateurs biologiqueS*») coordonné par Jean-Marie MOUCHEL (UMR SISYPHE). Pour ce faire, j'ai intégré en janvier 2006 l'équipe Hydrodynamique et Réactions du Centre de Géosciences, qui travaille sur le développement du logiciel CHES de spéciation chimique auquel doit être couplé le logiciel PROSE (hydrodynamique et réactions biochimique en rivière) via la plate-forme HYTEC (basée sur MPI (Message Passing Interface)) de couplage de modèles de transport et réactions.

Depuis 2007

- **coordinatrice et responsable scientifique du projet AQUAREL**, impliquant également des chercheurs de l'IFREMER et de l'UMR SISYPHE ; durée prévue : 4 ans à partir de 2007. Dans le cadre de ce projet il est prévu 2 ans pour un post-doc à partir de 2009 qui fera l'objet d'un co-encadrement IFREMER-MINES PARISTECH. La première année consacrée aux aspects hydro-sédimentaires se déroulera à l'IFREMER ; la deuxième phase se déroulera au Centre de Géosciences. La demande de post-doc a été acceptée (en juillet 2008) par l'IFREMER. Elle a également été acceptée par le Centre de Géosciences (avril 2008).
- **dans le comité de suivi** du CDD de Valérie FOUSSARD encadrée au GIP SEINE-AVAL et qui travaille sur «*Les évolutions hydro-géo-morphologiques de l'estuaire de la Seine, au regard des usages passés et présents*». Le CDD, d'une durée de 9 mois, se termine en décembre 2008.
- **dans le comité de pilotage et coordinatrice** de l'axe 1 dans le projet BEEST : **axe 1** contribuer à la mise en œuvre de la DCE sur les grands estuaires atlantiques ; **axe 2** réflexion sur la notion de «bon état» ou «bon potentiel» pour un estuaire ; **axe 3** vers une approche multicritères du bon état ou du bon potentiel d'un estuaire ; responsable scientifique du projet sur les indicateurs physico-chimiques en estuaire (axes 1 et 3) ;
- **responsable de la modélisation** de la matière organique dans le projet FLUMES («*FLUx de Matières En Suspension*») s'intéressant au rôle de la matière organique dans les processus de floculation ; coordination par Romaric VERNEY de l'IFREMER ; projet accepté en avril 2008 dans le cadre du programme SEINE-AVAL et qui associe également les universités de Rouen, de Caen et l'UMR Sisyphe ;

Chapitre 10

Les études contractuelles et expertises

- 1996** – utilisation du logiciel PROSE par la SOGREAH/BPR dans le cadre de l'étude du schéma directeur de l'assainissement en zone centrale Île de France ;
 - cession du logiciel PROSE à la CGE pour l'utilisation courante dans les stations d'alerte (prévision de temps de transfert de pollution) ;
- 1998/2001** – mise en place des bases de données pour mettre en œuvre le modèle PROSE de transport de polluants en amont de prises d'eau de la CGE (rivières Beuvronne, Orge, Thérain) pour le compte de la CGE ;
- 1999** – cession du logiciel PROSE au SIAAP, utilisé pour estimer l'impact de leurs déversements (mises en chômage de réseau) dans le cadre de demandes d'autorisation de déversements ;
- 2000** – « *Mise en œuvre et validation du modèle écologique PROSE en aval de l'agglomération parisienne* », étude réalisée pour le compte du SIAAP ;
 - cession du logiciel PROSE à la société d'ingénierie PROLOG ;
- 2001** – première étude sur « *l'incidence sur la prise d'eau d'Ivry, des rejets de l'usine de traitement Seine Amont, des émissaires de Villejuif et de Fresnes-Choisy, en temps sec et par temps de pluie, à l'aide du logiciel PROSE* » réalisée pour la SAGEP/ville de Paris ; étude effectuée dans le cadre de la demande d'autorisation de prélèvement demandée par la SAGEP ;
- 2002** – deuxième étude sur l'incidence sur la prise d'eau d'Ivry des rejets de l'usine de traitement Seine Amont : « *avis sur le report de la prise d'eau de l'usine d'Ivry à Orly. Mission 3 : évaluation de l'impact de l'extension de l'usine Seine-Amont* », étude menée sous la direction de PROLOG ;
 - cession du logiciel PROSE au NANCIE pour l'étude d'impact de rejets urbains de temps de pluie de l'agglomération nancéenne ;
 - « *Mise en œuvre et validation du modèle écologique PROSE en aval de l'agglomération parisienne. Acquisition des données bathymétriques.* », étude réalisée pour le compte du SIAAP ;
- 2003** – dans le cadre de l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'eau, application du logiciel PROSE pour simuler l'impact de l'agglomération parisienne sur le long terme, entre Paris et Poses ;
 - mise en œuvre du modèle PROSE version 3.4 sur la Marne et la Seine, études réalisées pour le compte du SIAAP ;
- 2004** – dans le cadre de l'application de la Directive Cadre Européenne, application du logiciel SIAM1D/RIVE pour estimer l'évolution de la qualité de l'eau de l'estuaire de la Seine à l'échéance 2015 ;
 - poursuite des validations et mises en œuvre du modèle PROSE, version 3.4 sur la Seine ;
- 2006** – dans le cadre des programmes PIREN SEINE et SEINE AVAL, révision des scénarios de la Directive Cadre Européenne.

Troisième partie

Bibliographie personnelle

Revue	Facteur d'impact (2006)	Nombre d'articles
Environmental Pollution	2,769	1
Science of the Total environment	2,359	4
Ecological Modeling	1,888	2
J. Hazardous Materials	1,855	1
Estuarine, Coastal and Shelf Sciences	1,733	1
Estuaries and Coasts	1,563	1 soumis
Aquatic Science	1,563	1 à re-soumettre
Hydrobiologia	1,049	2

Les articles dans des revues internationales à comité de lecture

Thibodeaux, L., Poulin, M. et Even, S., 1994. « A model for enhanced aeration of streams by motor vessels with application to the River Seine. » *J. Hazardous Materials*, vol. 37, n° 3, p. 459–473.

Even, S., Poulin, M., Garnier, J., Billen, G., Servais, P., Chesterikoff, A. et Coste, M., 1998. « River ecosystem modelling : application of the PROSE model to the Seine river (France). » *Hydrobiologia*, vol. 373, p. 27–37.

Even, S., Mouchel, J.-M., Seidl, M., Servais, P. et Poulin, M., 2004. « Oxygen deficits in the Seine river downstream of combined sewer overflows : importance of the suspended matter transport. » *Ecological modelling*, vol. 173, n° 2-3, p. 177–196.

Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Tusseau-Vuillemin, M.-H., Améziane, T. et Dauta, A., 2004. « Bio-geochemical modelling at the river scale : plankton and periphyton dynamics : Grand Morin case study, France. » *Ecological Modelling*, vol. 176, p. 333–347.

Even, S., Billen, G., Bacq, N., Ruelland, D., Garnier, J., Poulin, M., Thery, S. et Blanc, S., 2007a. « New tools for modelling water quality of hydrosystems : An application in the Seine River Basin in the frame of the Water Framework Directive. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 274–291. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.019](http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.019).

Even, S., Mouchel, J. M., Servais, P., Flipo, N., Poulin, M., Blanc, S., Chabanel, M., Paffoni, C. et Duchesnes, S., 2007b. « Modeling the impacts of Combined Sewer Overflows on the river Seine water quality. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 140–151. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007).

Even, S., Thouvenin, B., Bacq, N., Billen, G., Garnier, J., Guézennec, L., Blanc, S., Ficht, A. et Le Hir, P., 2007c. « An integrated modeling approach to forecast the impact of Seine basin managements on the Seine estuary. » *Hydrobiologia*, vol. 588, p. 13–29. Doi 10.1007/s10750-007-0649-y.

Flipo, N., Even, S., Poulin, M. et Ledoux, E., 2007a. « Modelling the nitrates fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 69–79. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007).

Flipo, N., Jeannée, N., Poulin, M., Even, S. et Ledoux, E., 2007b. « Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France) : combined use of geostatistics and physically-based modelling. » *Environmental Pollution*, vol. 146, n° 1, p. 98–109.

Flipo, N., Rabouille, C., Poulin, M., Even, S. et Tusseau, M.-H., 2007c. « Primary production in headwater streams of the Seine basin : the Grand Morin river case study. » *Sciences of the Total Environment*, vol. 375, n° 1-3, p. 140–151. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.007).

Garnier, J., Billen, G., Even, S., Etcheber, H. et Servais, P., 2008. « Organic matter dynamics and budgets in the maximum turbidity zone of the Seine Estuary (France). » *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 77, p. 150–162.

Even, S., Martin, L., Poulin, M. et Mouchel, J. M., 2008a. « Influence of navigation on sediment transport in the Seine (France). » *Aquatic Science*. À re-soumettre.

Even, S., Thouvenin, B., Garnier, J., Servais, P. et Bacq, N., 2008b. « Modeling the sources and fate of organic matter in a macro-tidal estuary (Seine, France) for a multi-scale analysis. » *Estuaries*. Soumis.

Les ouvrages collectifs

Poulin, M., Even, S., Billen, G., Mouchel, J.-M., Garnier, J., Levassor, A. et Leviandier, T., 1998. « Modèles : des processus au bassin versant. » M. Meybeck, G. de Marsily et Éliane Fustec (éditeur), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, p. 679–720.

Billen, G., Garnier, J., Servais, P., Brion, N., Ficht, A., Even, S., Berthe, T. et Poulin, M., 1999. « L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique. » Programme Scientifique Seine Aval (éditeur), *Seine Aval*, IFREMER (Plouzané), vol. 5, p. 32.

Thouvenin, B., Billen, G., Even, S., Fischer, J.-C., Gonzalez, J.-L., Le Hir, P., Loizeau, V., Mouchel, J.-M., Olivier, C. et Jacinto, R. S., 1999. « Programme scientifique Seine Aval. Les modèles outils de connaissance et de gestion. » Programme Scientifique Seine Aval (éditeur), *Seine Aval*, IFREMER (Plouzané), vol. 16, p. 32.

Billen, G., Théry, S., Garnier, J., Meybeck, M., Boët, P., Even, S., Chevreuil, M. et Poulin, M., 2004. « L'Île de France dans l'hydrosystème Seine. » Les cahiers de l'IAURIF (éditeur), *Le fleuve, un système, des territoires, des acteurs*, IAURIF (Paris), vol. 141.

Cachot, J., Budzinski, H., Devier, M., Fisson, C., Forget, J., Garnier, J., Even, S., Petit, F. et Servais, P., En cours de rédaction (60 pages). « Chap. 6 Contamination, eutrophication and ecotoxicology. » J.-C. Dauvin (éditeur), *The Seine estuary : past, present and future*, Quae (Versailles).

Dauvin, J.-C., Chapuy, P., Bipe, X., Delouis, A., Dumont, J., Galichon, P., Guezennec, L., Petit, F., Lecomte, T., Lévêque, C. et Romaña, A., En cours de rédaction (15 pages). « Chap. 11 Which are the stakes related to the global management of the estuary ? » J.-C. Dauvin (éditeur), *The Seine estuary : past, present and future*, Quae (Versailles).

Even, S., Fisson, C., Garnier, J., Guezennec, L., Lafite, R., Hir, P. L. et Sirost, O., En cours de rédaction (15 pages). « Chap. 9 Management and evaluation tools and indispensable developments for the future. » J.-C. Dauvin (éditeur), *The Seine estuary : past, present and future*, Quae (Versailles).

Garnier, J., Even, S., Bacq, N., Servais, P. et Thouvenin, B., 2008. « Cycle de la matière organique en estuaire de Seine. » Programme Scientifique Seine Aval (éditeur), *Seine Aval*, Quae, éditions Cemagref, Cirad, Ifremer et Inra (Versailles). À paraître.

Goblet, P. et Even, S., In review. « 4.2-Qualité des eaux de surface. 7.7. Les données nécessaires et leurs mesures. Mesures de la qualité de l'eau en rivière et dans les lacs. 15.6 - Logiciels 2D. La qualité des eaux de surface. 23.1 - Transport de substances dissoutes - Pollutions. Étude de la qualité des eaux de la Seine. » J.-M. Tanguy (éditeur), *De la goutte de pluie jusqu'à la mer*, Organisation Météorologique Mondiale (Genève, Suisse).

Lesourd, S., Lafite, R., Bacq, N., Bessineton, C., Dauvin, J.-C., Delouis, A., Even, S., Galichon, P. et Tessier, B., En cours de rédaction (30 pages). « Chap. 4 Two centuries of developments : history. » J.-C. Dauvin (éditeur), *The Seine estuary : past, present and future*, Quae (Versailles).

Proceedings avec comité de lecture

- Even, S., Poulin, M., Mouchel, J.-M. et Billen, G., 1996. « Simulating the impact of CSO's from greater Paris on the Seine river using the model ProSe. » F. Sieker et H.-R. Verworn (éditeur), *Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Storm Drainage. University of Hannover. Hannover, Germany, 9-13 Sept '96*. Seeliger Sofort-Druck (Hannover, Germany), vol. 1.
- Even, S., Mouchel, J.-M., Servais, P., Le Hir, P., Thouvenin, B., Poulin, M. et Garnier, J., 2000. « Suspended Matter and Ecological Behaviour of Rivers and Estuaries. Conceptual and Numerical Modelling. » W. Williams (éditeur), *Proceedings of the 27th Congress, Dublin, 1998*. International Association of Theoretical and Applied Limnology (Verh. Intern. Verein. Limnol.), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Stuttgart), vol. 27 (part I), p. 238–241.
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M. et Ledoux, E., 2004. « Hydrological part of CAWAQS (CAatchment WAter Quality Simulator) : fitting on a small sedimentary basin. » J. Jones (éditeur), *Proceedings of the 29th Congress, Lahti, Finland, 8-14 August 2004*. International Association of Theoretical and Applied Limnology (Verh. Intern. Verein. Limnol.), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Stuttgart), vol. 29 (part 2), p. 768–772.
- Even, S., Ficht, A., Thouvenin, B., Garnier, J., Servais, P. et Le Hir, P., 2006. « Modelling the Carbon Cycle in the Turbidity Maximum of the Seine Estuary. » J. Jones (éditeur), *Proceedings of the 29th Congress, Lahti, Finland, 8-14 August 2004*. International Association of Theoretical and Applied Limnology (Verh. Intern. Verein. Limnol.), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Stuttgart), vol. 29 (5), p. 2263–2266.

Actes de colloques internationaux

- Even, S. et Poulin, M., 1992. « Un modèle hydraulique de la Seine à l'étiage. » J.-P. Carbonnel, A. Danchiv, P. Hubert et V. Oancea (éditeur), *Recueil des communications des premières Rencontres Hydrologiques Franco-Roumaines. Contribution au Programme Hydrologique International organisée par les comités nationaux français et roumain de l'AIHS et du PHI. École des Mines, 2-5 septembre 1991*. publication SC/92/WS/48 UNESCO (Paris), p. 167–176.
- Even, S. et Poulin, M., 1996. « Modélisation du fonctionnement de l'écosystème Seine. » J.-P. Carbonnel, P. Serban, P. Hubert et H. Bendjouidi (éditeur), *Recueil des communications des secondes Rencontres Hydrologiques Franco-Roumaines. Contribution au Programme Hydrologique International organisée par les comités nationaux français et roumain de l'AIHS et du PHI. Tulcea, Roumanie, 6-9 septembre 1993*. publication SC-96/WS/19 UNESCO (Paris), vol. 1, p. 275–284.
- Even, S., Poulin, M., Garnier, J., Billen, G., Servais, P., Chesterikoff, A. et Coste, M., 1996a. « River ecosystem modeling : application of the ProSe model to the Seine river (France). » *Troisième Congrès International Limnologie-Océanographie, Nantes*.
- Even, S., Poulin, M., Mouchel, J.-M. et Billen, G., 1996b. « Simulating the impact of CSO's from greater Paris on the Seine river using the model ProSe. » F. Sieker et H.-R. Verworn (éditeur), *Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Storm Drainage. University of Hannover. Hannover, Germany, 9-13 Sept '96*. Seeliger Sofort-Druck (Hannover, Germany), vol. 1.
- Even, S., Poulin, M. et Roue, A., 1997. « Le modèle numérique ProSe de fonctionnement écologique du fleuve Seine. » *Quatrième Rencontres Hydrologiques Franco-Roumaines, Suceava, Roumanie, 3-5 septembre 1997*.
- Even, S., Mouchel, J.-M., Seidl, M., Servais, P. et Poulin, M., 1997. « Simulation des déficits d'oxygène dissous dans la Seine en aval de déversoirs d'orage à l'aide du modèle ProSe. » *5ème Conférence Internationale des Limnologues d'Expression Française, Namur*. CILEF.
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Tusseau-Vuillemin, M.-H. et Améziane, T., 2003. « Modélisation d'un biofilm benthique à l'échelle du Grand Morin. A benthic biofilm model at the scale of the Grand Morin (France). » *5ème Congrès International de Limnologie Océanographie, Paris, 9-12 Septembre 2002*.

- Flipo, N., Even, S., Poulin, M. et Tusseau-Vuillemin, M.-H., 2003a. « A distributed periphytic model : dynamical biogeochemical functioning at the river scale (the river Grand Morin, France, case study). » *3rd Symposium for European Freshwater Sciences (SEFS3), Edinburgh, 13-18 July 2003.*
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M. et Tusseau-Vuillemin, M.-H., 2003b. « Impact of WWTP on a mid size river (Grand Morin case study, France). » *18th European Junior Workshop on Sewer Processes and Networks, Almogrove, Portugal, 8-11 November 2003.*
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Tusseau-Vuillemin, M.-H. et Améziane, T., 2003c. « Modélisation spatialisée du périphyton à l'échelle de la rivière (Grand Morin). » U. des Océanographes de France Association Française de Limnologie (éditeur), *Actes de la 5e Conférence Internationale de Limnologie et Océanographie (CILO), Paris 9-12 septembre 2002.* (Paris), vol. 28, p. 154-157.
- Even, S., Ficht, A., Thouvenin, B., Garnier, J., Servais, P. et Le Hir, P., 2004a. « Modelling the Carbon Cycle in the Turbidity Maximum of the Seine Estuary. » *SIL, Lahti, August 2004.*
- Even, S., Thouvenin, B., Bacq, N., Billen, G., Garnier, J., Guézennec, L., Blanc, S., Ficht, A. et Le Hir, P., 2004b. « An integrated approach for a forecast study of the impact of Seine basin managements on the Seine estuary. » *38ème congrès ECSA, Rouen, 13-17 septembre 2004.*
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M. et Ledoux, E., 2004. « Hydrological part of CAWAQS (Catchment WAter Quality Simulator) : fitting on a small sedimentary basin. » *SIL 2004, Lahti, 8-14 août 2004.*
- Garnier, J., Servais, P., Billen, G., Ficht, A., Etcheber, H., Even, S., Abril, G. et Thouvenin, B., 2004. « Organic matter dynamics in the Seine estuary (France) : observations and budgets. » *38ème congrès ECSA, Rouen, 13-17 septembre 2004.*
- Even, S., Mouchel, J.-M., Poulin, M., Blanc, S., Chabanel, M., Paffoni, C. et Duchesnes, S., 2005. « Les rejets urbains de temps de pluie dans l'évaluation de la qualité des eaux : application de la Directive Cadre Européenne sur le bassin de la Seine. » *CILO 2005, 4-7 juillet 2005, Lyon.*
- Flipo, N., Jeannée, N., Poulin, M., Even, S., Théry, S., Viavattene, C., Combes, P. et Ledoux, E., 2005. « Nitrates fate in a small basin : simultaneous use of kriging and physically-based model. » *AIHS.*
- Martin, L., Even, S., Poulin, M. et Mouchel, J. M., 2005. « Influence of navigation on sediment transport in the Seine (France). » Résumé accepté à INTERCOH, 8th International Conference on Cohesive Sediment Transport, Saga, Japan, 20-23 septembre 2005.

Actes de colloques nationaux

- Even, S., 1994. « Modélisation du fonctionnement d'un écosystème fluvial : la Seine. » *38ème Congrès National de l'AFL, Clermont-Ferrand.* Association Française de Limnologie.
- Even, S., Poulin, M., Billen, G. et Mouchel, J.-M., 1996. « Modélisation du fonctionnement d'un écosystème fluvial : la Seine. » *Actes des journées du Programme Environnement Vie et Sociétés. Tendances nouvelles en modélisation pour l'Environnement.* CNRS, p. 46-51.
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Combes, P. et Ledoux, E., 2004. « Validation de l'hydrologie du modèle couplé CAWAQS sur un petit bassin versant. » *Ateliers de modélisation de l'atmosphère.* Toulouse, 29-30 novembre 2004.
- Even, S., 2005. « Les sources d'incertitude dans l'évaluation des résultats d'une modélisation biogéochimique de l'estuaire de Seine. » *Colloque International Incertitude et Environnement.* Société d'Écologie Humaine. 17^{ème} journées scientifiques de la SEH, Arles, du 23-25 novembre.

Conférence invitée

Even, S., 2007. « La modélisation dans les projets de restauration en Seine : retour d'expérience dans le cadre de l'application de la DCE. » *Séminaire Seine Aval ; le Havre 4-5 juin 2007*. Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).

Séminaires internes (liste non exhaustive)

Even, S., Thouvenin, B., Poulin, M., Ficht, A., Brion, N., Garnier, J. et Billen, G., 1997. « Modélisation de l'oxygène dissous à l'aide du modèle couplé SAM1D+RIVE. » *Séminaire Seine Aval ; le Havre 6-7 février 1997*. Programme scientifique Seine Aval I. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).

Even, S., Poulin, M., Le Hir, P., Thouvenin, B. et Ficht, A., 1999. « Mise en évidence de l'importance du transport sédimentaire dans le contrôle de l'oxygénation en estuaire de Seine. » *Colloque L'estuaire de la Seine, fonctionnement, perspectives*. Seine Aval, IFREMER.

Even, S., Flipo, N., poulin, M., Tusseau, M.-H., Mouchel, J.-M., Billen, G., Garnier, J. et Servais, P., 2002. « Le modèle PROSE Applications à diverses échelles. » *Séminaire PIREN Seine ; Paris février 2002*. PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.

Bonnies, S., Even, S., Flipo, N., Keryell, R. et Poulin, M., 2003. « Développements opérationnels des outils de modélisation de la qualité de l'eau dans le bassin de la Seine : PROSE à tubes de courant, version 3. » *Séminaire PIREN Seine ; Paris 4-5 février 2003*. PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.

Even, S., Thouvenin, B., Cugier, P. et Ficht, A., 2003. « Développement et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel. Étude du fonctionnement biogéochimique du bouchon vaseux. » *Séminaire Seine Aval ; Rouen 30 septembre-1 octobre 2003*. Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).

Even, S., 2005. « Mise en œuvre et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel de l'estuaire de Seine : le modèle couplé SiAM3D/RIVE. » Atelier modélisation, programme Seine Aval, Paris avril 2005.

Even, S., Garnier, J., Servais, P., Lafite, R. et Thouvenin, B., 2005. « Cycle de la Matière organique en estuaire de Seine (CYMES) : analyse et modélisation. » *Séminaire Scientifique Seine Aval, Rouen septembre 2005*.

Even, S., Bacq, N., Thouvenin, B., Garnier, J., Servais, P. et Lafite, R., 2006. « Modélisation de la MO en estuaire de Seine : sources et transformation ; analyse multi-contextuelle. » Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>). *Séminaire Seine Aval ; Rouen 6-7 septembre 2006*.

Garnier, J., Billen, G., Servais, P. et Even, S., 2006. « Exploration du comportement de la matière organique et des nutriments dans l'estuaire aval par le modèle simplifié LIFTE : impacts des apports d'amont. » *Séminaire Seine Aval ; Rouen 6-7 septembre 2006*.

Even, S., Hir, P. L., Garnier, J. et Billen, G., 2007. « La modélisation pour une analyse rétrospective des relations entre les aménagements et la qualité de l'eau de l'estuaire. » *Séminaire Seine Aval ; Rouen 5-5 septembre 2007*.

Les rapports PIREN Seine

Even, S. et Poulin, M., 1990. *Modèle de simulation de l'écosystème Seine : schéma conceptuel adopté*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.

- Even, S. et Poulin, M., 1991. *Modèle hydraulique de la Seine entre Montereau et Poses*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S. et Poulin, M., 1993. « Modélisation de l'écosystème Seine entre Montereau et Poses. Modèle ProSe. » *Rapport de synthèse 1989-1992 - Le fonctionnement de l'écosystème : Analyse des processus et modélisation*. PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>, vol. 1.
- Even, S., Poulin, M., Mouchel, J.-M. et Billen, G., 1994. *Modélisation de la qualité des eaux de la Seine en période d'orage*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S., Poulin, M., Billen, G., Garban, B. et Ollivon, D., 1995a. *Caractérisation des sédiments en Seine. Calage du modèle benthique*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S., Poulin, M., Mascaro, S. et Mouchel, J. M., 1995b. *Application du modèle PROSE aux épisodes pluvieux de juillet et août 1991*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/95/32 (Fontainebleau).
- Even, S., Poulin, M., Mouchel, J.-M. et Billen, G., 1996. *Application du modèle ProSe aux épisodes pluvieux de juillet et août 1991*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S., Mouchel, J.-M. et Poulin, M., 1997. *Améliorations apportées au modèle ProSe relatives au transport de particules*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Poulin, M. et Even, S., 1997. *Contribution au rapport PIREN Seine "Axe fluvial 1996". Modèles hydrauliques de la Marne et de l'Oise*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/97/16.
- Even, S., Mouchel, J.-M. et Poulin, M., 1998a. *Améliorations apportées au modèle ProSe relatives au transport de particules*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S., Mouchel, J.-M. et Poulin, M., 1998b. *Utilisation prédictive du modèle ProSe : étude de l'impact de divers modes d'urbanisation sur un bassin*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S. et Poulin, M., 1998. *Etablissement de la version 2.0 du modèle PROSE, notice de présentation et notice utilisateur*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Rapport LHM/RD/98/64.
- Martin, L., Even, S. et Poulin, M., 1998. *Modélisation hydraulique et hydrodispersive bidimensionnelle en Seine, applications du logiciel TELEMAC2D à l'aval d'Achères*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.
- Even, S. et Poulin, M., 1999. *Extension du modèle PROSE vers les secteurs amont : application à la Seine entre Troyes et Montereau*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/98/66 (Fontainebleau).
- Martin, L., Even, S., Poulin, M. et Mouchel, J.-M., 1999a. *Modélisation hydraulique et hydrodispersive bidimensionnelle en Seine, applications du logiciel TELEMAC2D à l'aval d'Achères. Rapport PIREN Seine*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.

- Martin, L., Mustapha, G., Even, S. et Poulin, M., 1999b. *Modélisation bidimensionnelle du transport particulaire et de la qualité de l'eau dans un secteur fortement anthropisé : la Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères. Etat d'avancement des travaux.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Rapport Mines ParisTech LHM/RD/99/9 (Fontainebleau).
- Even, S., Billen, G., Garnier, J. et Tican, D., 2001. *Maîtrise des débits en situation d'étiage. Rapport de synthèse 1998-2001.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Contribution du Centre de Géoscience au rapport d'activité Piren Seine 2001.
- Even, S., Flipo, N., Poulin, M., Bonniez, S. et Keryell, R., 2002. *Développements opérationnels des outils de modélisation de l'eau de la Seine : ProSe à tubes de courant, version 3.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Contribution du Centre de Géoscience au rapport d'activité Piren Seine 2002.
- Even, S., Keryell, R., Flipo, N. et Poulin, M., 2003. *Développements et interfaçages de PROSE 3.5.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Contribution du Centre de Géoscience au rapport d'activité Piren Seine 2003.
- Cugier, P., Billen, G., Even, S. et Poulin, M., 2004. *Réponse de l'eutrophisation de la baie de Seine au scénario tendanciel 2015.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/05 (Fontainebleau).
- Even, S., Keryell, R., Flipo, N. et Poulin, M., 2004a. *Développements et interfaçages de PROSE 3.5.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/04 (Fontainebleau).
- Even, S., Poulin, M. et Thouvenin, B., 2004b. *Evolution prospective de la qualité des eaux de surface. Scénario tendanciel de la Directive Cadre Européenne de l'agglomération parisienne à l'estuaire.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/).
- Flipo, N., Poulin, M., Even, S., Ledoux, E., Viavatten, C. et Théry, S., 2004. *Modélisation intégrée du bassin du Grand Morin. Choix conceptuels. Description de la plate-forme Stics-Newsam-Prose.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/07 (Fontainebleau).
- Even, S. et Flipo, N., 2005. *Gestion des bases de données, développement et transfert des outils de modélisation. Développements autour des logiciels PROSE, version 5/CAWAQS. Création d'une interface intégrée et couplage avec les SIG.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Contribution au rapport Piren Seine 2004. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/05/07 (Fontainebleau).
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Théry, S., Viavattene, C., Combes, P. et Ledoux, E., 2005. *Modélisation des transferts d'azote sur le bassin du Grand Morin avec la plate-forme de modélisation CAWAQS.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/).
- Even, S., 2006. *Modélisation du transport et dépôt de particules dans PROSE, version 4.1 : développement d'un module de compaction.* rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. [http ://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/](http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/). Contribution au rapport Piren Seine 2005. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/06/03 (Fontainebleau).

Even, S. et Flipo, N., 2006. *Développement des outils de modélisation PROSE/CAWAQS : mise en cohérence et validation de la version 4.0 de PROSE*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Contribution au rapport Piren Seine 2005. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/06/04 (Fontainebleau).

Even, S., Keryell, R. et Paquin, P., 2006. *Interfaçage de l'outil de modélisation PROSE : développement de l'outil GABI, Générateur Automatique de Belles Interfaces*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>. Contribution au rapport Piren Seine 2005. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/06/05 (Fontainebleau).

Even, S., 2007. *Description du logiciel ProSe, version 4.1*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.

Even, S., Billen, G., Servais, P., Paffoni, C., Legruel, S., Duchesne, S., Rousselot, O. et Lamy, F., 2007. *Validation du modèle PROSE sur l'année 2003 et simulation prospective de programmes de mesures à l'horizon 2012 entre Paris et Poses*. rapport technique, PIREN Seine. UMR Sisyphe, université Paris VI. <http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>.

Les rapports Seine Aval

Even, S., Mihailescu, M. et Poulin, M., 1996. *Modèle SAM-1D/RIVE appliqué à l'estuaire de la Seine*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval I. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).

Even, S., Thouvenin, B. et Poulin, M., 1997. *Modélisation de l'oxygène dissous dans l'estuaire de la Seine à l'aide du modèle couplé SAM1D/RIVE*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval I. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).

Even, S., Thouvenin, B. et Poulin, M., 1998. *Simulation des déficits en oxygène dans l'estuaire de la Seine : validation du modèle couplé SAM1D/RIVE*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval I. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).

Even, S., Poulin, M., Le Hir, P., Thouvenin, B. et Ficht, A., 1999. *Modélisation du fonctionnement biogéochimique de l'estuaire de la Seine. Le modèle couplé SAM2DH/RIVE*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval I. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).

Garnier, J., Billen, G., Sébilo, M., Némery, J., Martinez, A., Desruelle, M., Pinault, S., Cébron, A., Akopian, M., d'Ayguésives, A., Debruyne, J. P., Servais, P., Anzil, A., Parlant, E., Vacher, L., Etcheber, H., Wit, R. D., Abril, G., Lemaire, E. et Even, S., 2001. *Circulation et transformation des éléments biogènes (N, P, Si) dans l'estuaire. Rôle dans l'eutrophisation et le cycle du carbone*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval II. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>). Thème 3 : Eutrophisation. Dégradation de la matière organique. Réten-tion des nutriments.

Even, S., 2002. *Développement et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval II. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>). Programme SEINE AVAL. Thème : Adaptation des modèles mathématiques à l'action opérationnelle de la cellule.

EVEN, S., 2003. *Développement et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel*. rapport technique, Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>). Programme SEINE AVAL. Thème : Adaptation des modèles mathématiques à l'action opérationnelle de la cellule.

- Garnier, J., Billen, G., Sébilo, M., Némery, J., Martinez, A., Desruelle, M., Pinault, S., Cébron, A., d'Ayguessives, A., Servais, P., Mercier, P., Anzil, A., Parlant, E., Vacher, L., Abril, G., Wit, R. D., Lemaire, E., Etcheber, H., Mounier, S., Garnier, C., Février, D., Even, S. et Ficht, A., 2003. *Fonctionnement du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine. Transformation des éléments biogènes (C, N, P, Si). Rapport de synthèse, thème 3.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval II. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).
- Even, S., 2004. *Développement et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel. Thème : Développement de modules opérationnels.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>). Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/25 (Fontainebleau).
- Even, S., 2005. *Synthèse CYMES. Chapitre 4 : Développement et validation d'un modèle biogéochimique tridimensionnel en estuaire de Seine.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval III. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>). Référence Mines ParisTech LHM/RD/05/13 (Fontainebleau).
- Even, S. et Thouvenin, B., 2005. *Synthèse CYMES. Chapitre 1 : Analyse spatio-temporelle du bouchon vaseux.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval III. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>). Référence Mines ParisTech LHM/RD/05/12 (Fontainebleau).
- Garnier, J., Billen, G., Servais, P., Even, S., Thouvenin, B., Etcheber, H. et Abril, G., 2005. *Synthèse CYMES. Chapitre 3 : Bilan de carbone dans le maximum de turbidité du chenal de l'estuaire de Seine.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).
- Even, S., Bacq, N., Thouvenin, B., Garnier, J., Servais, P., Lafite, R. et Le Hir, P., 2006. *Synthèse sur le cycle du carbone (CYMES). Validation de SiAM3D/RIVE pour le cycle de la matière organique et bilans de carbone.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval III. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).
- Garnier, J., Even, S., Bacq, N., Servais, P. et Thouvenin, B., 2006. *SA3- Exercice 2006. CYMES, Cycle de la Matière organique en Estuaire.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).
- Even, S. et Thouvenin, B., 2007. *Modélisation et bilans de carbone en estuaire de Seine (synthèse CYMES). Le modèle MOSES (Modèle de Matière Organique Simplifié en Estuaire de Seine). Thème Morpho-dynamique, cycle des vases et contaminants associés. Rapport d'activité 2006.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).
- Thouvenin, B., Auger, D., Averty, B., ans Jean-François Chiffolleau, B. B., Cossa, D., Cozic, A., Gonzales, J.-L., Héas-Moisan, K., Ménard, D., Radford-Knoery, J., Rozuel-Chartier, E., Santini, A., Sargian, P., Truquet, I., Olivier, M., Even, S., Le Hir, P., Bacq, N. et Fisson, C., 2007a. *Contribution à l'étude de la dynamique et de la spéciation des contaminants.* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval III. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>). Seine-Aval 3 : L'analyse et la gestion environnementales « recherche appliquée ». Thème : « Morphodynamique, cycle des vases et contaminants associés ».
- Thouvenin, B., Gonzalez, J.-L., Sargian, P. et Even, S., 2007b. *Contribution au fascicule CYMES : liens entre la matière organique et les contaminants chimiques. Rapport d'activité 2007. Thème « Morphodynamique, cycle des vases et contaminants associés ».* rapport technique, Programme scientifique Seine Aval III. GIP Seine Aval (Rouen), <http://seine-aval.crihan.fr/webGIPSA/>).
- Even, S., 2007. *Réalisation de scénarios comparatifs passé (1996), présent (2003) et futur (2012) en estuaire de Seine. Rapport d'étude 2007.* rapport technique, GIP Seine Aval (Rouen).

Les rapports d'études contractuelles

- Poulin, M. et Even, S., 1996. *Rapport final de la convention d'étude : modèle hydrodynamique de la Marne de Courtaron à Charenton*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/96/10.
- BPR, SOGREAH et HYDRATEC, 1997. *Étude de l'assainissement en zone centrale de la région Île de France*. rapport technique, Agence de l'Eau Seine Normandie - Ministère de l'Environnement - Région Île de France - Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne.
- Bourlange, S., Poulin, M., Even, S. et Flipo, N., 2000. *Modélisation du fonctionnement hydraulique et écologique du Grand Morin. Rapport pour la DIREN Île de France*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/00/31.
- Even, S., Mouchel, J.-M., Delbec, M. et Poulin, M., 2000. *Validation du modèle ProSe 2.0 sur la Seine depuis l'amont de Paris jusqu'à Poses*. rapport technique, Syndicat Interdépartemental de l'Agglomération Parisienne - Centre de Géosciences Mines ParisTech.
- Poulin, M., Even, S. et Flipo, N., 2000. *Modélisation du fonctionnement hydraulique de la Marne entre Epernay et la Ferté sous Jouarre. Impact de la ville de Troyes sur le fonctionnement écologique de la Seine entre Troyes et Méry*. rapport technique, Centre de Géosciences, Mines ParisTech - DIREN. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/00/54 (Fontainebleau).
- Even, S. et Poulin, M., 2001a. *Transport convectif et dispersif dans la Seine de Choisy-le-Roi à Ivry-sur-Seine à l'aide du logiciel ProSe. Mise en œuvre d'une version à tubes de courant. Rapport pour la Société Anonyme de Gestion des Eaux de Paris (SAGEP)*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/2001/05.
- Even, S. et Poulin, M., 2001b. *Étude de l'incidence sur la prise d'eau d'Ivry, des rejets de l'usine de traitement Seine Amont, des émissaires de Villejuif et de Fresnes-Choisy, en temps sec et par temps de pluie, à l'aide du logiciel ProSe. Rapport pour la Société Anonyme de Gestion des Eaux de Paris (SAGEP)*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau).
- Flipo, N., Poulin, M. et Even, S., 2001. *Modélisation du fonctionnement hydraulique et écologique du Grand Morin. Rapport pour la DIREN Île de France*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/00/31.
- Delbec, M. et Even, S., 2002. *Avis sur le report de la prise d'eau de l'usine d'Ivry à Orly. Mission 3 : évaluation de l'impact de l'extension de l'usine Seine-Amont. Rapport pour la mairie de Paris*. rapport technique, PROLOG ingénierie - Centre de Géoscience/Mines ParisTech.
- Poulin, M. et Even, S., 2002. *Modélisation de la qualité de l'eau de la Seine à la traversée de l'agglomération parisienne. Acquisition des données bathymétriques. Rapport pour le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP)*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/02/48.
- Poulin, M. et Even, S., 2003a. *Modélisation de la qualité de l'eau de la Marne aval à l'aide du logiciel ProSe à tubes de courant (version 3.4). Rapport pour le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/03/46.
- Poulin, M. et Even, S., 2003b. *Modélisation de la qualité de l'eau de la Marne à la traversée de l'agglomération parisienne. Acquisition des données bathymétriques. Rapport pour le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/03/24.

- Poulin, M. et Even, S., 2003c. *Modélisation de la qualité de l'eau de la Seine en aval de Suresnes en 2001 à l'aide du logiciel ProSe à tubes de courant (Version 3.4) Rapport pour le Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/03/49.
- Even, S., Poulin, M. et Thouvenin, B., 2004. *Scénario tendanciel 2015. Application de siAM1D à l'estuaire de la Seine de Poses à Honfleur*. rapport technique, Mines ParisTech - Agence de l'Eau Seine Normandie. Rapport Mines ParisTech LHM/RD/04/17 (Fontainebleau).
- Poulin, M. et Even, S., 2004a. *Modélisation de la qualité de l'eau de la Seine de Choisy à Ivry à l'aide du logiciel ProSe à tubes de courant (version 3.4). Étude réalisée pour le compte du SIAAP*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/04/46.
- Poulin, M. et Even, S., 2004b. *Rapport Marne 2001/ SIAAP*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/04/47.
- Even, S., Bacq, N., Thouvenin, B., Garnier, J. et Servais, P., 2007. *Étude de scénarios pour la mise en place d'un assainissement intra-estuarien. Modélisation des cycles biogéochimiques majeurs en estuaire de Seine*. rapport technique, GIP Seine Aval (Rouen). Actions opérationnelles du GIP Seine Aval. Rapport Mines ParisTech R080321SEVE (Fontainebleau).

Les notices

- Even, S. et Poulin, M., 1996. *Notice d'utilisation du logiciel ProSe. Un logiciel de simulation de l'hydrodynamique d'un système fluvial*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau).
- Even, S. et Poulin, M., 1999. *Notice d'utilisation du logiciel ProSe. Un logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique. Version 2.0*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/99/49.
- Even, S., 2005. *Notice d'utilisation du logiciel ProSe. Un logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique. Version 3.5. Mise à jour décembre 2005*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/05/52.
- Even, S., 2006. *Notice d'utilisation du logiciel ProSe. Un logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique. Version 4.0. Mise à jour janvier 2006*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/06/02.
- Even, S., 2006. *Notice d'utilisation du logiciel ProSe. Un logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique. Version 4.0. Mise à jour janvier 2006*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence LHM/RD/06/02.
- Even, S., 2008. *Notice d'utilisation du logiciel ProSe. Un logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique. Version 4.1. Mise à jour mars 2008*. rapport technique, Centre de Géosciences - Mines ParisTech (Fontainebleau). Référence SE080331.