

Soutenance d'habilitation à diriger des recherches

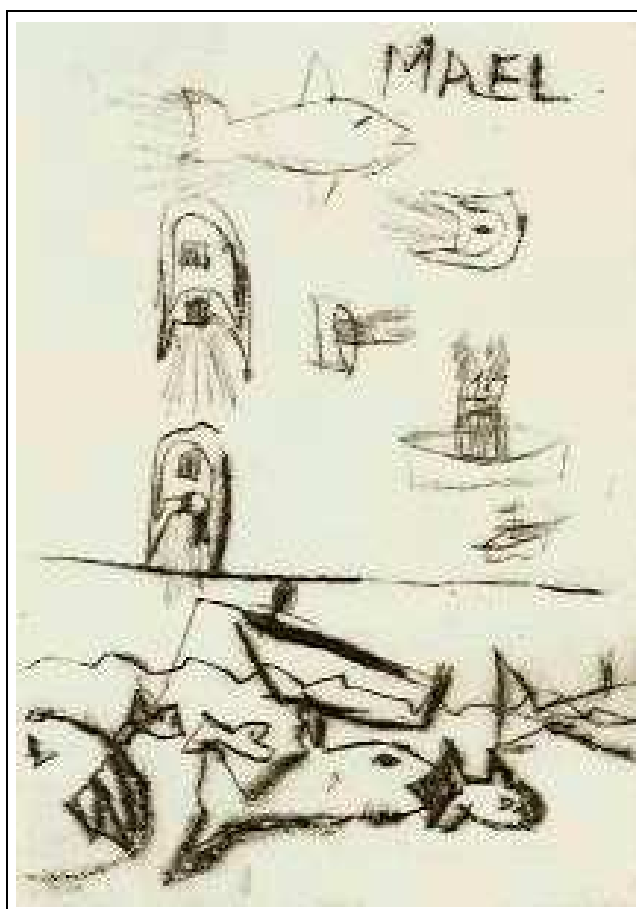
Modélisation du cycle du carbone organique le long du continuum rivière-estuaire-milieu côtier. Exemple d'un système fortement anthropisé : la Seine.

Stéphanie EVEN
Stephanie.Even@Mines-ParisTech.fr

Le 28 novembre 2008
À 10 h 30

Salle Fourcade
Tour 56
4^{ème} étage
Couloir 56-55
Place de Jussieu
PARIS 5^{ème}

Station Jussieu



Pot
À partir de 12 h

Aux anciennes caves
à vin
Bâtiment Esclangon

Place de Jussieu
PARIS 5^{ème}

Métro lignes 10 ou 7

Devant
le
jury
composé
de

Laurent MÉMERY
Pierre REGNIER
Patrick MEIRE
Alain DAUTA
Ghislain DE MARSILY
Josette GARNIER
Jean-Marie MOUCHEL

rapporteur
rapporteur
rapporteur
examineur
examineur
examinatrice
examineur

Institut Universitaire Européen de la Mer (Plouzané)
Département des sciences de la terre (Utrecht)
Groupe de recherche en gestion des écosystèmes (Anvers)
Écolab (Toulouse)
UMR SISYPHE (Paris VI)
UMR SISYPHE (Paris VI)
UMR SISYPHE (Paris VI)

Résumé

Les déterminismes des déficits en oxygène et de l'eutrophisation, conséquence des nombreux apports résultant des activités humaines, restent mal connus ; quant aux relations de causes à effet, dont la connaissance est nécessaire pour déterminer et dimensionner des programmes d'actions souvent coûteux, elles restent difficiles à quantifier. Des avancées et résultats originaux ont pu être obtenus sur ces questions à l'aide de modèles mathématiques déterministes. Le nécessaire couplage entre les approches de modélisation et de terrain ou en laboratoire a été rendu possible par l'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. Une première partie fait référence aux résultats obtenus à l'aide des modèles. Dans un deuxième temps l'accent est mis sur les solutions informatiques et algorithmiques originales qui ont été proposées.

Partant du constat que des modèles simplifiés étaient peu aptes à caractériser les processus responsables des déficits en oxygène observés dans le panache de rejets urbains de temps de pluie, les recherches ont porté sur la caractérisation des processus qui se développent en aval de tels rejets. Des mesures *in situ* ont été exploitées à l'aide du modèle PROSE, que j'ai développé pendant ma thèse, couplant un modèle hydrodynamique basé sur les équations de Saint-Venant avec le modèle de processus biochimiques RIVE (UMR Sisyphé, UPMC) et un modèle de transport sédimentaire en transitoire. Il a été possible de montrer que les déficits en oxygène immédiats sont déterminés par la charge en carbone organique dissous biodégradable tandis que la fraction particulaire est responsable d'effets rémanents à grande échelle de temps. La mise en évidence de ce phénomène, dû aux dépôts riches en carbone organique, 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. Outre les apports de carbone organique dissous biodégradable par les rejets urbains dans le secteur étudié (agglomération parisienne), les observations montrent que la fraction biodégradable du carbone organique dissous est anormalement élevée à l'amont de Paris (70 %) ce qui tend à « fragiliser » le système à la base. Le site atelier « rivières amont » du PIREN SEINE sur le Grand-Morin a permis de montrer le rôle majeur de l'eutrophisation ; ainsi la contribution du phytoplancton et des producteurs primaires benthiques au flux de carbone organique dissous biodégradable à l'exutoire du bassin est deux fois plus élevée que celle des apports directs anthropiques. Quant à l'impact des rejets de l'agglomération parisienne il se fait sentir jusque dans l'estuaire de Seine où les teneurs en carbone organique dans les matières en suspension dans la zone du maximum de turbidité ont notamment été étudiées. Les rejets urbains y sont responsables de teneurs élevées et rémanentes ; quant aux biomasses phytoplanctoniques elles contribuent à des variations saisonnières importantes. Une modélisation spatialisée 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 recherchées.

Tous ces résultats illustrent les interactions qui existent entre les grands secteurs de l'hydrosystème ; aussi le développement d'approches du fonctionnement des hydrosystèmes à l'échelle des bassins est actuellement un enjeu. Le devenir des nitrates, principal élément nutritif supportant l'eutrophisation et dont les processus de transformation sont liés à ceux de la matière organique, a été étudié sur l'ensemble du bassin du Grand-Morin à l'aide d'une modélisation couplant une description de l'occupation des sols par SIG, des modèles d'aquifères multicouches (modèle NEWSAM, Mines ParisTech), de réseau hydrographique

(PROSE) et agronomique (STICS, INRA). Le modèle couplé (CaWaQS) a permis d'établir que les cours d'eau du bassin du Grand-Morin sont alimentés 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 ont été estimées à près de 20 % du flux infiltré à partir de la zone sous-racinaire. Les recherches doivent se poursuivre pour spatialiser ces pertes. Par ailleurs le continuum réseau hydrographique (SENEQUE (UMR SISYPHE) et PROSE), estuaire (*SiAM1D-RIVE* (IFREMER)), milieu côtier (*SiAM3D-ELISE* (IFREMER)) a été modélisé sur l'ensemble du bassin de la Seine afin d'y mettre en évidence les enjeux futurs de la gestion environnementale. 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 restent par contre des enjeux importants.

Les modèles sont au coeur des approches qui ont été proposées. Les enjeux des choix informatiques, méthodologiques et algorithmiques sont de proposer des formulations simples sachant que les solutions trop complexes sont souvent abandonnées. L'utilisation des générateurs de parsers pour la lecture des données, qui a permis de concevoir des formats de données « humainement » compréhensibles et très tolérants, ou l'assimilation d'un réseau hydrographique à un graphe, ce qui a permis d'implémenter les algorithmes spécifiques à ce type d'objet, ont largement permis d'ouvrir le potentiel du logiciel PROSE. Sans ces outils les fonctionnalités en seraient restées plus limitées. Le choix d'un langage (le C) permettant de décrire un réseau hydrographique sur la base de composants plutôt que comme la somme de données de base non structurées a été très bénéfique pour la formalisation du problème et sa conceptualisation. Ces approches restent relativement originales pour ce type de modèle. L'originalité est donc dans la transposition d'outils, d'algorithmes, dans ce nouveau contexte. Ainsi les problématiques environnementales nécessitent de mobiliser plusieurs champs disciplinaires. Au stade de maturité actuel les enjeux sont dans la capacité à faire dialoguer des modèles parfois complexes et développés de manière indépendante. Plus précisément et selon la question, seules certaines fonctionnalités des modèles sont recherchées et au risque de pénaliser les applications, il devient important de « découper » en briques indépendantes les anciens modèles. Cela suppose de nouveaux schémas organisationnels. Les objectifs recherchés sont la modularité, l'optimisation, la conceptualisation, la ré-utilisabilité. L'organisation modulaire et la conceptualisation poussées à l'extrême sont en cours pour le logiciel PROSE à l'aide du langage C++ couplé à un modèle de programmation fonctionnelle. Dans un domaine où ce genre d'approches est peu pratiquée, des solutions originales doivent être proposées. L'amélioration des performances reste par ailleurs cruciale ; elle passe aujourd'hui par la programmation parallèle. Cet aspect est actuellement en cours d'organisation dans PROSE. Il s'agit ici de proposer de nouveaux champs d'application à des disciplines informatiques en plein essor tout en ayant pour objectif de faire aujourd'hui des réalisations toujours plus coûteuses en moyens de calcul qui ne pouvaient être envisagées hier. Finalement la gestion des données est cruciale pour un logiciel et les interfaces en facilitent l'utilisation et la diffusion ainsi que la validation. Le problème a été envisagé sous l'angle du développement d'un Générateur Automatique de (Belles) Interfaces (l'outil GABI) basé sur l'analyse (à l'aide de parsers) des grammaires des programmes de lecture de données et une formalisation des bases de données sous forme d'arbre. Ce type d'outil n'existe pas à l'heure actuelle et l'approche proposée est tout à fait originale.