
Présentation du logiciel ProSe, version 2.0

—
Logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et
du fonctionnement biochimique d'un écosystème fluvial

Stéphanie Even, Michel Poulin

Centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris
35, Rue Saint Honoré, F-77305 Fontainebleau Cedex

—
11 février 1999

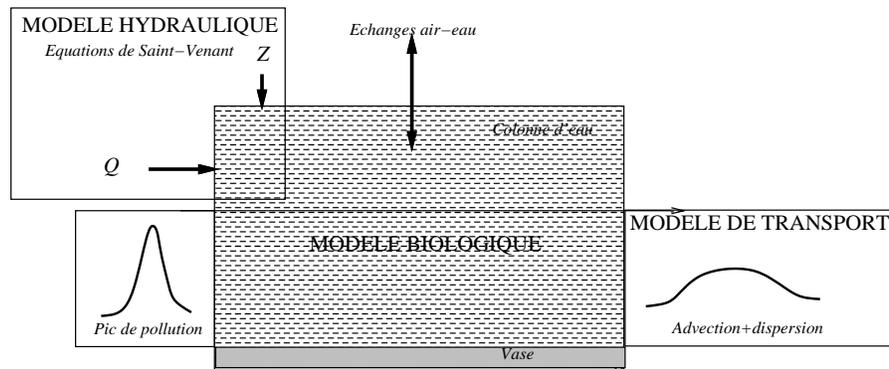


FIG. 1 – Structure du modèle ProSe

1 Introduction

Le logiciel ProSe permet de simuler la qualité de l'eau d'un ensemble de cours d'eau constituant un réseau hydrographique. L'état d'un milieu courant est défini par un ensemble de variables parmi lesquelles on distingue : les variables physiques, telles que la vitesse de l'eau, la profondeur, la section mouillée¹, qui déterminent le transport des constituants et le temps de développement des processus biologiques dans le milieu, et les variables biochimiques, dont l'évolution dépend de réactions avec d'autres constituants et de facteurs internes (température) et externes au système (éclairage).

Ainsi le logiciel ProSe est constitué de plusieurs sous-modèles, dont la résolution est découplée afin de permettre une utilisation modulaire : un modèle hydraulique, résolvant les équations monodimensionnelles de Saint-Venant, un modèle de transport par advection² et dispersion³, un modèle biochimique basé sur le modèle RIVE [Billen et al., 1994, Garnier et al., 1995], représentant les principaux processus impliqués dans des milieux aquatiques profonds (activités phytoplanctoniques, zooplanctoniques et bactériennes) et un modèle de transport de particules.

Compte tenu de sa structure modulaire, de la possibilité de représenter des cours d'eau organisés en réseau et de prendre en compte des régimes très transitoires, les applications du modèle ProSe sont multiples. Conçu pour étudier les problèmes de qualité d'eau et de désoxygénations chroniques (aval de rejets de station d'épuration) ou accidentelles (débordements de réseaux d'assainissement par temps de pluie) d'un écosystème, il est également apte à traiter des problèmes hydrauliques (effet de mouvements de seuils, validation de séries de mesures, propagation de débit) et de transport de constituants conservatifs (propagation de polluants, interprétation de campagnes de traçage, temps de transfert, problème inverse de recherche de source de pollution).

Le logiciel ProSe est développé, dans le cadre du PIREN Seine, au Centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris, en collaboration avec le Groupe de Microbiologie des Milieux Aquatiques de l'Université Libre de Bruxelles, le laboratoire de Géologie Appliquée à Paris VI et le CERGRENE à l'École des Ponts.

1. Section transversale du lit de la rivière occupée par l'eau

2. Transport d'une particule à la vitesse moyenne de l'eau

3. Implique de nombreux processus ayant pour résultat le déplacement préférentiel d'une particule depuis les zones à forte concentration vers les zones à faible concentration

2 Le logiciel ProSe : les concepts

2.1 Notations

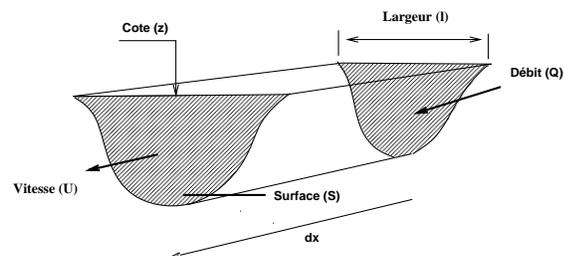
C	Concentration	ML^{-3}
D	Coefficient de dispersion	$L^{-2}T^{-1}$
g	Accélération de la pesanteur	LT^{-2}
H	Charge hydraulique	L
h	Ouverture sous une vanne	L
J	Pente d'énergie	Sans dimension
K	Coefficient de Strickler pour le frottement	$L^{-\frac{2}{3}}T^2$
M	Masse	M
Q	Débit	L^3T^{-1}
q	Débit latéral d'apport	L^2T^{-1}
R_h	Rayon hydraulique	L
S	Section mouillée	L^2
U	Vitesse de l'eau	LT^{-1}
z	Cote	L
μ	Coefficient de débit	Sans dimension

2.2 Le modèle hydraulique

Le modèle hydraulique de ProSe permet de simuler l'écoulement dans un ensemble de cours d'eau à partir d'une description maillée de la géomorphologie de celui-ci (géométrie du lit de la rivière, position des points singuliers). Il résout les équations complètes de Saint-Venant, monodimensionnelles [Hug, 1975] :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gSJ$$



Le terme gSJ correspond au terme de frottement. Un certain nombre de lois empiriques permettent de relier la pente de frottement J à des caractéristiques hydrauliques. L'expression de Manning-Strickler a été adoptée : $J = \frac{Q^2}{K^2 R_h^{\frac{4}{3}} S^2}$. K est la constante de Strickler et est un paramètre qui doit être calé. Il varie classiquement entre 5 (écoulement très rugueux) et 70 (écoulement lisse). Des valeurs de 30-40 sont caractéristiques de la Seine dans sa partie navigable.

Les hypothèses qui soutendent l'utilisation des équations de Saint-venant sont les suivantes :

1. *l'écoulement est filaire.*
2. *l'écoulement est quasi horizontal.*
3. *la courbure des lignes de courant est faible.*
4. *la densité de l'eau est constante.*

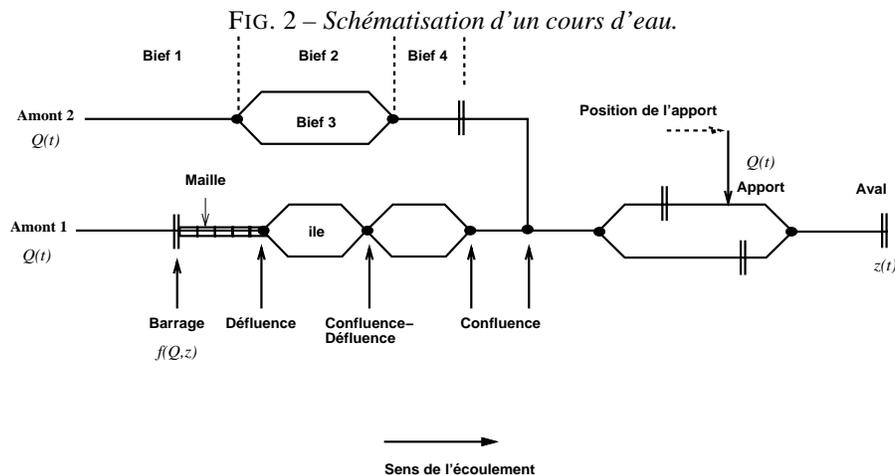
Les régimes transitoires correspondent à des variations de débit dans les rejets, affluents, à l'amont ou à des mouvements d'ouvrages de navigation.

2.3 Description d'un cours d'eau

Dans un cours d'eau, on distingue les parties où l'écoulement peut être considéré comme libre et où les équations de Saint-Venant sont applicables (**les biefs**), des points singuliers (**limites**) où des conditions particulières conditionnent l'écoulement (seuils, diffluence, confluence, tout point de changement brusque de la géomorphologie du lit). Le passage aux seuils est décrit par des lois de déversement, pour un écoulement noyé ou dénoyé (voir figure 3). Aux barrages des lois de cote imposées sont également possibles. Les **limites amont** du domaine modélisé correspondent à un deuxième type de limite.

La géométrie du lit est décrite par une succession de profils transversaux. En l'absence de profils transversaux, des informations de largeur et de profondeur permettent de décrire une géométrie sommaire. Dans ce cas des informations complémentaires relatives à une traçage doivent permettre de valider les temps de transfert simuler et de corriger localement la géométrie. Un bief est décrit par la succession des mailles (ou tronçon), caractérisées par un profil et une longueur.

Les apports, correspondant à des rejets ou prélèvements sont décrits par leur position dans un bief et l'évolution du débit en fonction du temps.



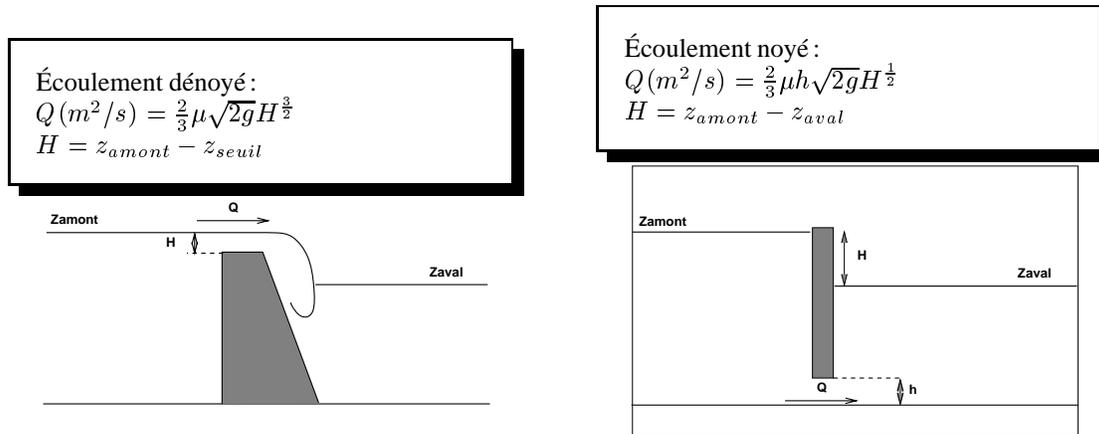


FIG. 3 – Lois de déversement (débit par mètre de seuil) pour des écoulements noyé ou dénoyé au dessus d'un seuil.

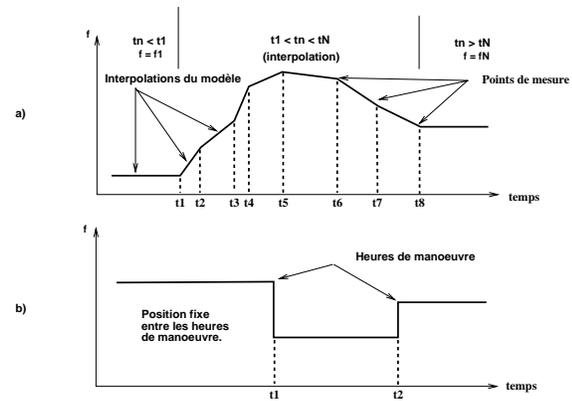
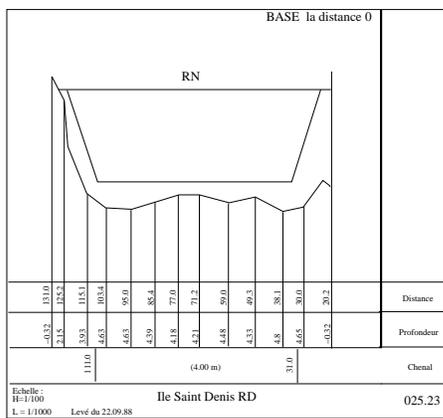
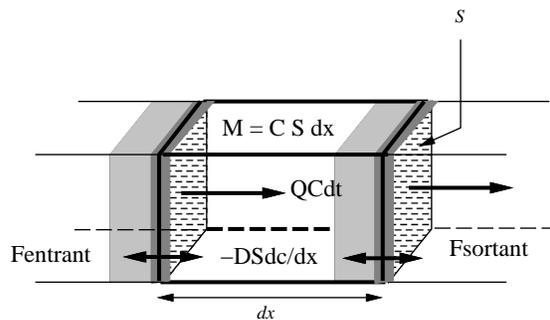


FIG. 4 – Profil transversal type fourni par Voies Navigables de France et représentation des fonctions d'interpolation dans ProSe à partir des données discrètes fournies en entrée : débit (type a), cote imposée aux barrage (type a) et position de seuil (type b).

2.4 Le modèle de transport

Un constituant, dissous ou particulaire, est transporté à la vitesse de l'eau et subit simultanément des processus de mélange (diffusion moléculaire, dispersion turbulente ou par advection différentielle) pris en compte sous la forme d'un terme de dispersion.

La loi de conservation d'un constituant conservatif, prenant en compte les processus de transport est :



$$\frac{\partial M}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial x}$$

$$F = \underbrace{QC}_{\text{Advection}} - \underbrace{DS \frac{\partial C}{\partial x}}_{\text{Dispersion}}$$

L'équation de transport monodimensionnelle ne peut être appliquée de manière satisfaisante que pour des distances supérieures à la distance de mélange.

La résolution numérique du terme advectif génère dans certains cas des termes d'erreur du même ordre de grandeur, voire supérieurs à la dispersion réelle que l'on cherche à représenter. Plusieurs schémas numériques sont proposés dans ProSe, permettant d'optimiser les problèmes de temps de calcul/précision lors de la résolution de l'équation de transport.

Le schéma de Bott d'ordre 3 est positif et son utilisation est prévue pour le modèle biologique pour des situations très variables (déversements de temps de pluies). L'utilisation du schéma décentré amont, de loin le moins coûteux en temps de calcul, reste possible pour les situations où les variations sont faibles (évolutions saisonnières, situations stationnaires).

2.5 Le modèle biologique RIVE

Le modèle biologique RIVE [Billen et al., 1994, Garnier et al., 1995] décrit de façon déterministe les processus biologiques dont le moteur est la croissance de microorganismes (phytoplancton, bactéries). Il simule les concentrations en carbone, azote, phosphore et oxygène qui en dépendent. Le schéma conceptuel (figure 5) se fonde sur la description de processus, étudiés de façon indépendante par des expérimentations *in vitro*, et décomposés en étapes élémentaires. Les paramètres introduits dans le modèle sont issus de ces expériences. Plusieurs populations bactériennes [Garnier et al., 1992] ou phytoplanctoniques [Garnier et al., 1995] ayant pu être identifiées, des paramètres spécifiques à chaque population sont pris en compte. Les valeurs de références des paramètres de RIVE sont rapportés par Servais (1993) et Garnier (1995).

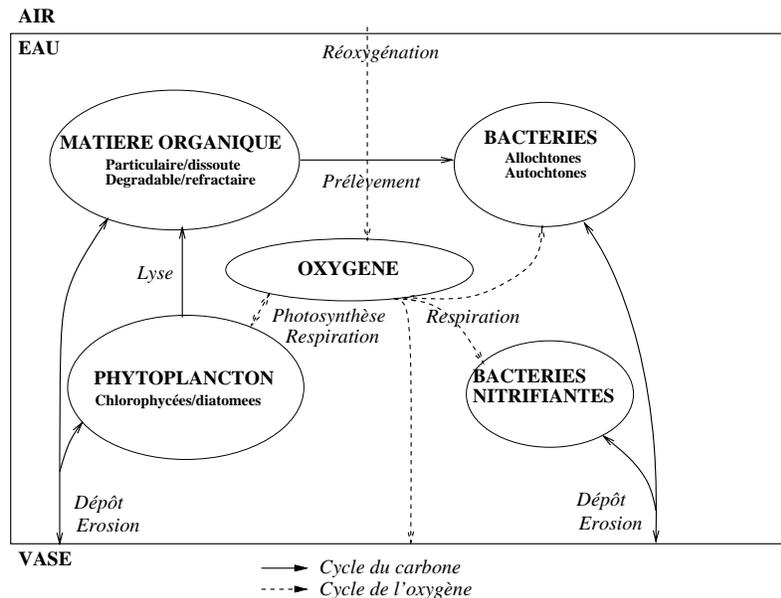


FIG. 5 – Schéma conceptuel du modèle RIVE.

2.6 Le modèle de transport de particules

Le modèle de transport de particules est plus amplement décrit dans [Even et al., 1998]. Les hypothèses qui sous-tendent le modèle de transport de particules sont les suivantes :

- *Le flux de dépôt est égal au flux de sédimentation ;*
- *Déposition et érosion sont continus et simultanés, compte tenu des échelles de temps et d'espace considérées ;*
- *La navigation est un facteur important de remise en suspension, prépondérant à bas débit ;*
- *Le flux érodé pour chaque classe de particule est fonction de la fraction massique dans le dépôt ;*

Le dépôt est supposé égal au flux de sédimentation défini pour chaque classe de particules par le produit de la concentration de particules en suspension par leur vitesse de chute. Le flux d'érosion est exprimé en fonction de paramètres hydrauliques et de la masse volumique de la suspension [Celik and Rodi, 1988], selon un calcul basé sur la capacité de transport de l'écoulement [Bagnold, 1966]. Ce type de formulation s'adapte bien à la modélisation mono-dimensionnelle et de plus elle permet de minimiser les paramètres du modèle par rapport à des fonctions avec des seuils critiques de dépôt et d'érosion, dépendant de nombreux facteurs mal connus. Les paramètres de l'érosion sont déterminés à partir d'une relation empirique liant la concentration en MES totales au débit, déterminée à partir d'observations à Poses. Cette relation est spécifique au cas de la Seine.

Le modèle ProSe simule explicitement le comportement d'une couche de vase dont la composition en particules, matière organique, bactéries est connue à chaque instant. Les processus dans la vase sont supposés identiques à ceux de la colonne d'eau.

Le flux dissous à l'interface eau-sédiment comprend deux termes : un terme aux flux de dépôt et d'érosion qui correspond au mouvement de l'eau liée aux agrégats et un terme de diffusion proportionnel au gradient de concentration entre l'eau interstitielle dans la couche déposée et l'eau surnageante.

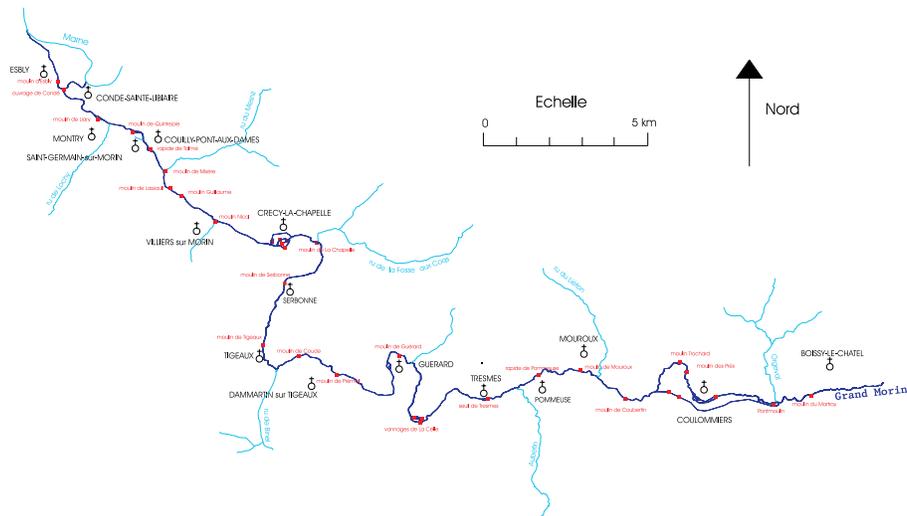


FIG. 6 – *Grand-Morin entre Coulommiers et Esbly*

3 Applications de ProSe

3.1 Une petite rivière : le Grand-Morin

Le Grand-Morin est un affluent de la Marne, dont la confluence se situe à Esbly, long de 119km, et connu pour les fréquentes inondations causées par des variations de débit importantes, entre 7 et 50 m³/s. C'est en outre un cours d'eau qui comprend de nombreux moulins et seuils. Le secteur étudié s'étend sur 40 km, depuis Coulommiers jusqu'à la confluence avec la Marne (voir figure 6).

Les données pour la description du cours d'eau résultent principalement de campagnes de terrain qui ont permis de dresser un profil en long des cotes de plan d'eau à bas débit, de connaître le nombre exact, la situation et la géométrie des seuils et moulins, ainsi que de caractériser un certain nombre de profils en travers. Un coefficient de Strickler de 30, caractéristique de la Marne et de la Seine dans des secteurs plus aval, est adopté dans un premier temps. Des valeurs de 10 à 20 ont été trouvées pour la Seine amont. La valeur du Strickler peut être corrigée en fonction de données complémentaires de dénivelés amont/aval ou de temps de transfert.

Des transferts de pic de pollution depuis l'amont, à Coulommier, ont été simulés. Ces calculs fournissent un ordre de grandeur de temps de transfert en fonction du débit, qui devront néanmoins être validés (campagne de traçage) pour une utilisation réaliste. Les simulations effectuées avec deux schémas numériques différents programmés dans ProSe permet d'illustrer les problèmes de dispersion numérique. Les différences de concentrations maximales, ainsi que d'étalement du panache, ont des conséquences éventuelles sur des choix de gestion en cas de pollution.

Des données de cotes de plan d'eau ont permis de valider les résultats de simulation hydraulique à bas débit (voir figure 7). On vérifie ainsi que l'écoulement dans ce cours d'eau est principalement conditionné par les différents seuils qui le jalonnent.

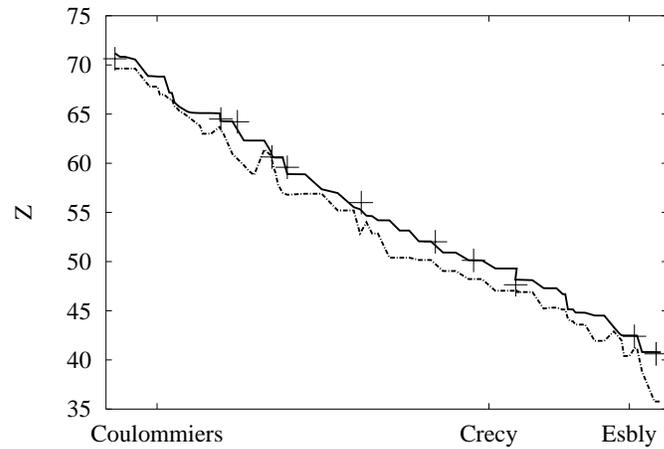


FIG. 7 – Simulation et mesures de cotes de plan d'eau sur le Grand Morin entre Coulommiers et Esbly
Bott Décentré Amont

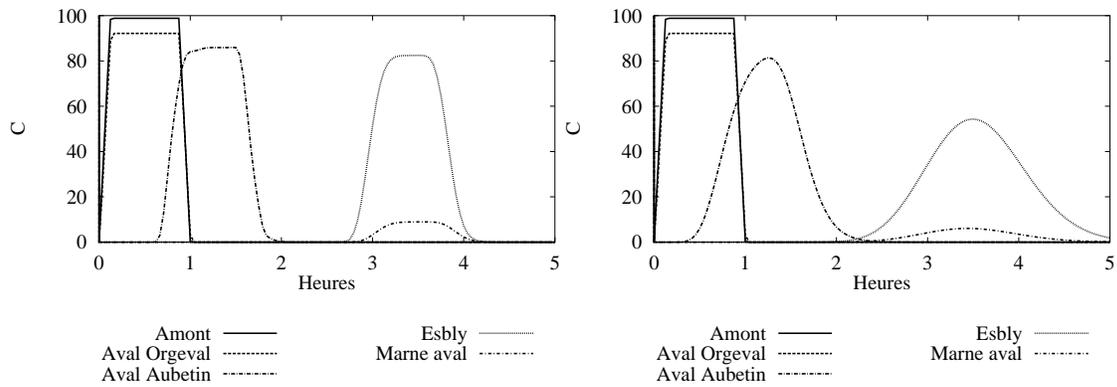
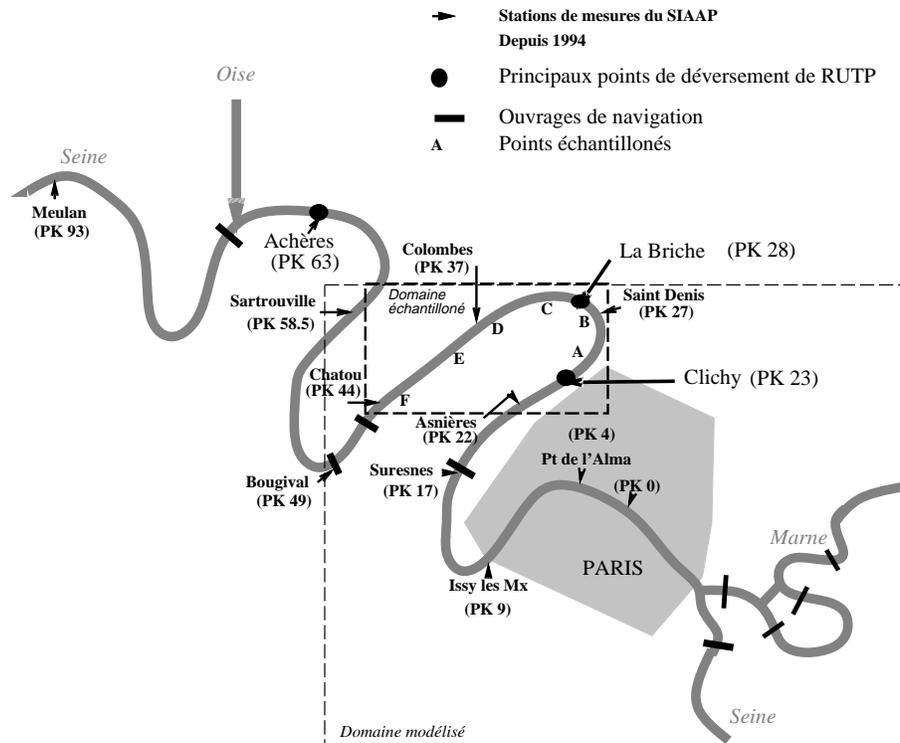


FIG. 8 – Propagation d'un pic de pollution depuis l'amont simulé avec les schémas décentré amont implicite de Bott d'ordre. Débit de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Station	A	B	C	D	Col	E	F	
Nom	Clichy	Gennevilliers	Saint Denis	Épinay	Argentueil	Colombes	Bezons	Chatou
PK	23,4	24,6	28,3	31,8	36,1	37,3	39,4	44,6

FIG. 9 – Points de mesures du SIAAP, secteur échantillonné lors des suivis des déversements de Clichy et domaine modélisé.

3.2 Étiage 1996 et impacts de RUTP

Les rejets urbains de temps de pluie (RUTP) sont à l'origine de déficits en oxygène accidentels, parfois catastrophiques pour le milieu récepteur. Les impacts des RUTP ont été étudiés dans le cadre du PIREN Seine (suivis *in situ* des rejets de Clichy et la Briche et caractérisation des eaux déversées) afin de comprendre les processus responsables du développement de panaches désoxygénés dans le milieu récepteur. Le modèle ProSe a été utilisé dans le but d'approfondir la compréhension des processus et d'effectuer des analyses de sensibilités sur les processus et variables jugés prépondérants.

Les mesures exploitées sont les suivis du SIAAP (suivis en continu de l'oxygène et de la température en 8 points, suivis hebdomadaires de la chla en 7 points), des suivis ponctuels de temps sec dans le secteur Gennevilliers-Chatou (oxygène, ammoniacque, MES, COD, COP, biomasses bactériennes) et les suivis *in situ* après des déversements de Clichy pour les pluies du 5 juillet et du 22 août 1996.

Le domaine modélisé comprend la Seine depuis la confluence avec l'Yerres et la Marne depuis Gournay, jusqu'à l'amont de la confluence avec l'Oise. La période simulée s'étend du 1^{er} juin jusqu'au 30 août 1996. Les données d'entrée du modèle sont des conditions limites amont à Villeneuve-Saint-Georges et à Gournay (ces points ne correspondant pas à des sites de mesure, des reconstitutions à partir de mesures effectuées plus en aval ont été utilisées), la qualité des rejets de temps sec (restituées à partir des fichiers AESN et des bilans publiés par BPR (1997) et traduites en terme de variables du modèle RIVE en utilisant des facteurs de conversion [Servais et al., 1995]), des données de vent, température et rayonnement.

Les déversements de Clichy et la Briche sont connus au pas de temps de 15 mn. Les durées des déver-

sements sont respectivement de 6 et 13 heures, le débit maximal dans les deux cas est de l'ordre de $30 \text{ m}^3/\text{s}$, et les volumes totaux déversés de $516\,000 \text{ m}^3$ et $316\,800 \text{ m}^3$. La qualité en terme de carbone organique, MES et ammonium a été mesurée lors des déversements du 5 juillet et du 22 août. Les biomasses bactériennes ont également été mesurées le 22 août. Les déversements aux autres points sont calculées à partir des simulations réalisés par BPR (1997) pour une pluie uniforme.

Les résultats de simulation relatifs aux différentes variables : oxygène, ammoniacque, chl a, COD, MES, MOP et biomasses bactériennes pour la période de temps sec sont présentés sur la figure 10.

Les impacts des déversements des 5 juillet et 22 août sont présentés sur les figures 11 et 12. Deux situations sont comparées : la première ne considère que les déversements de Clichy et la Briche, la deuxième inclus les déversements supplémentaires calculés.

Une analyse particulière du rôle de la sédimentation des constituants particuliers tels que le COP et les bactéries a montré que la disparition du COP (vitesse de sédimentation de l'ordre de 1 m/h) avait peu d'effet sur la consommation de l'oxygène, compte tenu de vitesses d'hydrolyse relativement faibles, contrairement aux bactéries, directement responsable de la consommation d'oxygène.

Le rôle de la toxicité des rejets sur le phytoplancton (baisse de l'activité photosynthétique), qui a été mise en évidence par Seidl (1998), a également été étudié.

4 Conclusion

Les améliorations majeures de la version 2.0 de ProSe concerne le transport sédimentaire. De nombreux constituants biologiques, microorganismes, matière organique sont présents sous forme particulaire dans le milieu, éventuellement intégrés au sein d'aggrégats. Leur comportement par rapport aux espèces dissoutes. La nouvelle version de ProSe a été mise en œuvre dans le secteur de l'agglomération parisienne pour simuler une période de temps sec et deux événements pluvieux, pendant l'été 1996. Les résultats de validation doivent cependant être confirmés par une extension du domaine modélisé jusqu'à l'estuaire incluant le rejet d'Achères et l'Oise. Les premiers résultats sont cependant prometteurs tant pour le temps sec que pour des événements très transitoires pendant un événement pluvial.

En même temps que se poursuit le développement des modèles, de plus en plus de données sont acquises (mesures en continu en plusieurs sites, nombreuses variables mesurées), permettant d'accroître la connaissance du système et de valider les modèles dans des situations très contraignantes. En effet simuler correctement de nombreuses variables impliquées dans des processus communs nous permet d'éprouver le schéma conceptuel adopté. La variété des situations pouvant être représentées nous permet également d'étendre le champ de validation du modèle.

Le modèle ProSe, a été conçu pour représenter à grande échelle des processus fins, tant physiques que biochimiques. C'est pourquoi une approche monodimensionnelle a été adoptée, qui localement doit être complétée par une modélisation bidimensionnelle voire tridimensionnelle. Le modèle a jusqu'à présent surtout été mis en œuvre sur les grands axes fluviaux, la Seine, la Marne et l'Oise. Les processus biochimiques ont donc principalement été testés dans des biefs de grande profondeur des cours d'eau aménagés.

Les simulations hydrauliques sur le Grand-Morin constituent la première application de ProSe à de petits cours d'eau pour lesquels les processus biologiques spécifiques sont à prendre en compte (présence de macrophytes, algues fixées, films bactériens).

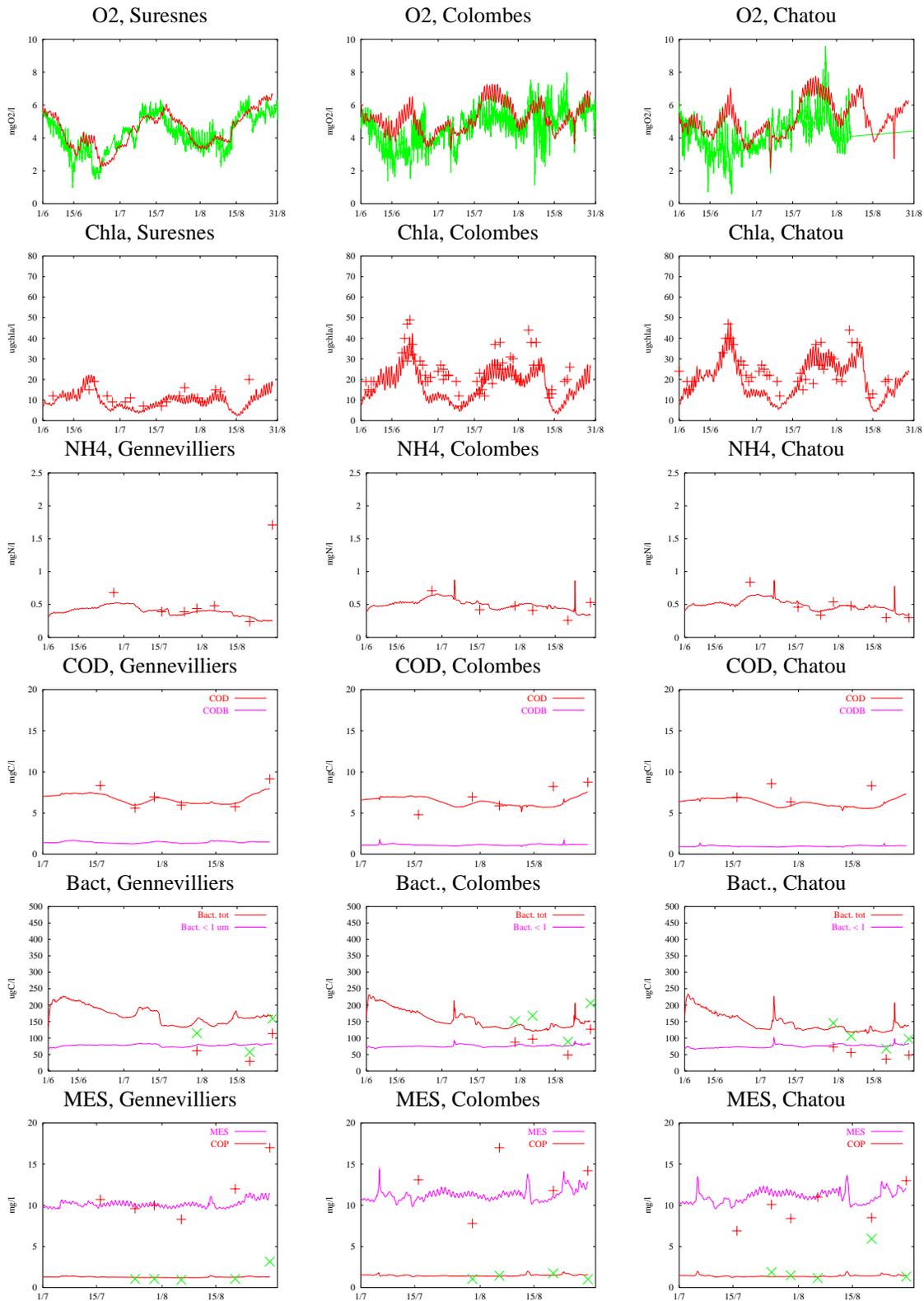


FIG. 10 – Oxygène, chlorophylle a, ammonium et COD simulés (traits pleins) à Suresnes (PK 18), Gennevilliers (PK 24,6), Colombes (37,3) et Chatou (44,6) du 15 juillet au 31 août 1996 et comparaison avec les mesures d'oxygène (tirées) en continu (SIAAP), de chlorophylle a hebdomadaires et des suivis de temps sec d'ammonium.

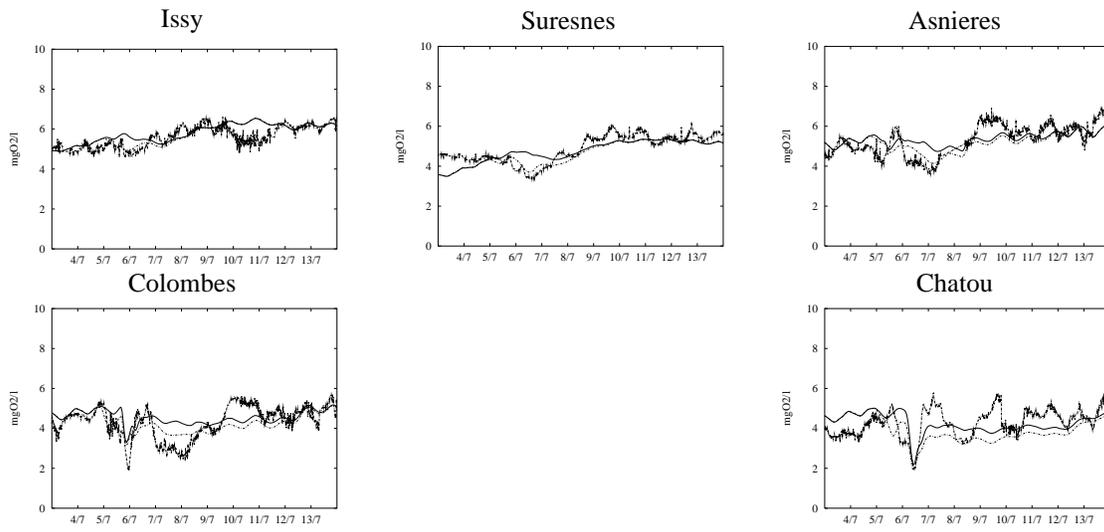


FIG. 11 –

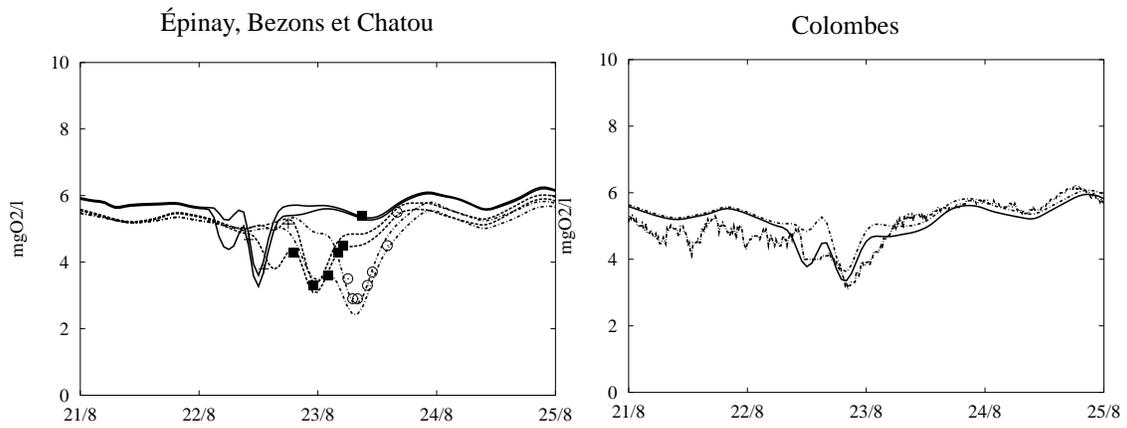


FIG. 12 –

Bibliographie

- [Bagnold, 1966] Bagnold, R. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. physiographic and hydraulic studies of rivers. Technical report, Geological Survey Professional paper 422-I. 2.6
- [Billen et al., 1994] Billen, G., Garnier, J., and Hanset, P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: The riverstrahler model applied to the seine river system. *Hydrobiologia*, 289:119–137. 3, 2.5
- [BPR et al., 1997] BPR, SOGREAH, and HYDRATEC (1997). Étude de l’assainissement en zone centrale de la région Île de France. Technical report.
- [Celik and Rodi, 1988] Celik, I. and Rodi, W. (1988). Modeling suspended sediment transport in nonequilibrium situations. *J. Hyd. Eng.*, 114(10):1157–1191. 2.6
- [Even et al., 1998] Even, S., Mouchel, J.-M., Seidl, M., Servais, P., and Poulin, M. (1998). Simulation des déficits d’oxygène dans la seine en aval de rejets urbains de temps de pluie à l’aide du modèle prose. *Annales de Limnologie. A paraître.* 2.6
- [Garnier et al., 1995] Garnier, J., Billen, G., and Coste, M. (1995). Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the river seine: Observations and modelling. *Limnol. Oceanogr.*, 40(4):750–765. 3, 2.5, 2.5
- [Garnier et al., 1992] Garnier, J., Billen, G., and Servais, P. (1992). Physiological characteristics and ecological role of small and large sized bacteria in a polluted river (seine river, France). *Arch. Hydrobiol. Beih.*, 37:83–94. 2.5
- [Hug, 1975] Hug, M. (1975). *Mécanique des fluides appliquée*. Editions Eyrolles. 2.2
- [Seidl, 1997] Seidl, M. (1997). *Caractérisation des rejets urbains de temps de pluie et de leurs impacts sur l’oxygénation de la Seine*. Phdthesis, École Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées, CERGRENE.
- [Servais and Garnier, 1993] Servais, P. and Garnier, J. (1993). Contribution of heterotrophic bacterial production to the carbon budget of the river seine (France). *Microbial Ecology*, 25:19–33.
- [Servais et al., 1995] Servais, P., Garnier, J., Demarteau, N., Brion, N., and Billen, G. (1995). Caractérisation des apports de matières organiques, nutriments et micro-organismes par les rejets d’eaux usées. rapport 1994/iii. thème bassins-versants urbains. Technical report, PIREN Seine. 3.2

Sommaire  général

**Groupe de travail B :
Modélisation,
gestion des modèles et des bases de données**

Bases de données spatialisées

**Modèles PROSE et SENEQUE : établissement de
versions de référence applicables aux études de gestion**

**Modélisation du comportement hydraulique du Grand Morin et
de la Seine amont à l'aide du logiciel PROSE**

Présentation du logiciel ProSe, version 2.0

SENEQUE 1.3 : notice d'utilisation