

Le modèle de prédiction de la qualité de la Seine ProSe

Améliorations apportées par les récents travaux de recherche (Piren-Phase VI)

■ B. LABORIE¹, V. ROCHER², L. VILMIN³, M. POULIN³, M. RAIMONET⁴, L. BENARD¹, J. BERNIER², S. GUÉRIN², A. CUSSONNEAU¹, J. POUILLAUDE², N. ESCOFFIER^{5,6}, A. GROLEAU⁵, J.-M. MOUCHEL⁴, N. FLIPO³

Mots-clés : modélisation, qualité de rivière, outils opérationnels, approche statistique, validation, phosphore, azote, phytoplancton

Keywords: modelling, river quality, Seine, operational tool, statistical approach, validation, phosphorus, nitrogen, phytoplankton

Introduction

La directive cadre sur l'eau (2000) place la qualité du milieu naturel au cœur des enjeux de l'assainissement. La gestion globale des systèmes d'assainissement doit permettre de limiter le rejet de carbone, d'azote et de phosphore dans les eaux de surface pour atteindre le bon état des masses d'eau, défini par les normes de qualité environnementale.

Dans ce contexte, le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (Siaap), organisme public en charge du transport et du traitement des eaux usées de l'agglomération parisienne, s'est doté de moyens techniques qui lui permettent d'évaluer l'impact de ses activités sur la qualité des eaux de surface, réceptrices de ses rejets. Cette évaluation s'appuie sur une autosurveillance

fine du milieu naturel (analyses hebdomadaires des principaux nutriments sur 15 sites répartis de l'amont à l'aval de l'agglomération parisienne) et sur la mise en place d'outils de suivi en continu de la qualité du milieu naturel. Le réseau opérationnel ODES, constitué de neuf stations de mesure, permet un suivi de l'oxygène dissous sur un linéaire de 130 km de Seine et le réseau prototype CarboSeine, constitué de trois stations de mesure multiparamètre, permet un suivi des principaux nutriments à l'aval des grands points de rejet de l'agglomération parisienne [ROCHER *et al.*, 2013 ; GROLEAU *et al.*, 2013].

Parallèlement au déploiement de ces outils de suivi de la qualité de la Seine, un modèle de prédiction de la qualité de la Seine et de la Marne, ProSe (pour : programme Seine), a été développé dans le cadre du programme Piren-Seine [EVEN, 1995 ; EVEN *et al.*, 1998 ; EVEN *et al.*, 2004 ; FLIPO *et al.*, 2004 ; EVEN *et al.*, 2007 ; FLIPO *et al.*, 2007 ; VILMIN, 2014]. Ce logiciel a été développé dans le but de prédire l'impact sur la qualité de la Seine de l'ensemble des apports du système d'assainissement francilien : rejets permanents de temps sec [EVEN *et al.*, 1998], rejets transitoires de temps de pluie [EVEN *et al.*, 2004 ; EVEN *et al.*, 2007], apports de stations d'épuration (STEP). ProSe est aujourd'hui utilisé à des fins opérationnelles pour orienter les choix

¹ Siaap – Direction santé et environnement – 2, rue Jules-César – 75012 Paris – France.

² Siaap – Direction du développement et de la prospective – 82, avenue Kléber – 92700 Colombes – France.

³ Mines ParisTech Fontainebleau – 35, rue Saint-Honoré – 77300 Fontainebleau – France.

⁴ UMR METIS – UPMC – Université Pierre et Marie Curie – 4, place Jussieu – 75252 Paris cedex 05 – France.

⁵ Institut physique du globe de Paris – 1, rue Jussieu – 75238 Paris cedex 05 – France.

⁶ École polytechnique fédérale de Lausanne – Laboratoire de recherche en biofilms et écosystèmes fluviaux, EPFL ENAC IIE SBER, GR A0 382 (Bâtiment GR), Station 2 – 1015 Lausanne – Suisse.

d'exploit-ation, notamment pour la programmation des chômages d'ouvrage. Les simulations faites avec le modèle ProSe servent également à orienter les programmes d'investissement. Ainsi, la construction du schéma directeur d'assainissement de la zone Siaap s'appuie sur les simulations de ProSe qui permettent d'évaluer l'impact des différents scénarios d'aménagement sur la qualité du milieu naturel. Enfin, une réflexion est engagée sur la possibilité d'utiliser le modèle ProSe comme outil d'aide à la décision en temps réel. Le principe serait de s'appuyer sur les simulations faites en temps réel pour définir les consignes d'exploitation à destination des services en charge de la gestion des flux dans le réseau d'assainissement et de l'exploitation des stations d'épuration.

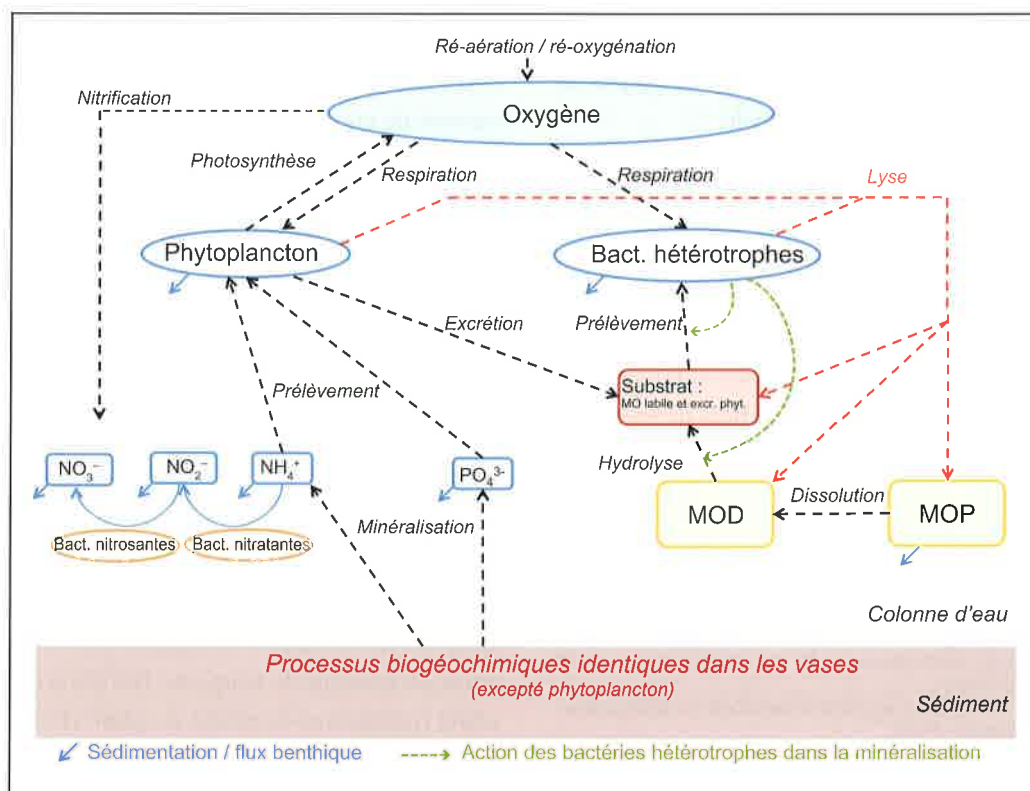
Compte tenu du rôle joué par le modèle ProSe dans les prises de décisions opérationnelles et stratégiques du Siaap, les équipes du Piren-Seine, en collaboration avec les équipes du Siaap, travaillent depuis plusieurs années à la consolidation de ses performances. Ce

travail a été mené dans le cadre de la phase VI du Piren-Seine (2011-2014) et en particulier dans le cadre des doctorats de Lauriane VILMIN [2014], Nicolas ESCOFFIER [2014], Nejla GROUZ [2015] et du postdoctorat de Mélanie Raimonet (2015).

Cet article vise à décrire les principales évolutions et améliorations apportées au modèle ProSe à la suite des travaux scientifiques de la phase VI du Piren-Seine. Il comporte trois parties : 1) une courte description du modèle ProSe ; 2) une description des modifications apportées à la suite des travaux du Piren-Seine et 3) une évaluation des performances de la nouvelle version du logiciel (ProSe-VP6, pour ProSe-Phase6).

1. Présentation simplifiée du modèle ProSe

Le modèle ProSe repose sur le couplage de trois modules : un module hydraulique, un module de transport des substances dissoutes et particulières et un module biogéochimique reprenant les interactions



MO labile : matière organique labile ; excr. phyt. : excrétion phytoplanctonique.

Figure 1. Schéma conceptuel global du module biogéochimique de ProSe

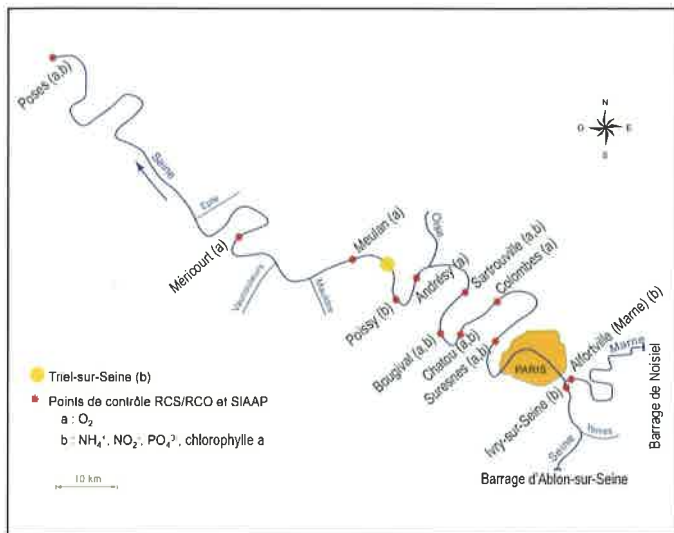


Figure 2. Secteur d'étude modélisé

entre les différents constituants de l'écosystème (figure 1). Ce dernier, basé sur le schéma conceptuel RIVE [BILLEN *et al.*, 1994 ; EVEN, 1995 ; VILMIN *et al.*, 2012], est fondé sur la description du cycle du carbone. Il intègre à la fois l'activité des bactéries hétérotrophes et nitrifiantes, ainsi que celle du phytoplancton en lien avec les nutriments azotés, phosphorés et l'oxygène. Les processus pris en compte dans la colonne d'eau sont, excepté la croissance phytoplanctonique, identiques à ceux pris en compte dans les sédiments. Le logiciel modélise également l'évolution des stocks de vase et les échanges benthiques dissous et particulaires.

Le logiciel ProSe est appliqué à une portion du réseau hydrographique de la Seine. Il s'agit de modéliser 220 km de Seine, depuis Ablon-sur-Seine, jusqu'à Poses, et 35 km de Marne, depuis Noisiel jusqu'à sa confluence avec la Seine (figure 2). Ce secteur d'étude fortement urbanisé impose la prise en compte de nombreux intrants aux caractéristiques variées. Il s'agit, d'une part, des rivières et fleuve : la Marne, la Seine et ses affluents. Les données d'entrée utilisées sont issues du Syndicat des eaux d'Île-de-France (Sedif) pour la Seine, la Marne et l'Oise, des réseaux de mesure RCS/RCO pour les affluents (Yerres, Epte, Mauldre et Vaucouleurs). Les données de suivi du milieu réalisées par le Siaap sont également prises en compte pour définir les concentrations en chlorophylle *a*. Les débits journaliers sont issus de la

banque Hydro (www.hydro.eaufrance.fr). Ils correspondent aux données des stations d'Alfortville sur la Seine, de Gournay sur la Marne et de Conflans-Sainte-Honorine sur l'Oise. D'autre part, le modèle intègre 156 déversoirs des départements de la petite couronne parisienne et du Siaap. Les données utilisées sont issues de l'autosurveillance journalière des gestionnaires : ville de Paris (SAP), départements des Hauts-de-Seine (CD92-DE), de Seine-Saint-Denis (CD93-DEA) et du Val-de-Marne (CD94-DSEA) et Siaap. Enfin, les données d'autosurveillance du Siaap sont utilisées afin de quantifier et qualifier les rejets des six STEP du Siaap. Ces données robustes sont disponibles tous les jours de l'année. Le modèle permet également la prise en compte des rejets/prélèvements permanents (canaux, pompages pour la production d'eau potable...). Les données climatiques proviennent de Météo France.

2. Les évolutions de la nouvelle version de ProSe

Les connaissances acquises au cours de la 6^e phase du programme de recherche Piren-Seine ont permis d'ajuster les concepts biogéochimiques implémentés dans le logiciel. Ainsi, les processus hydro-sédimentaires (phénomène d'érosion et de sédimentation) ont été calibrés numériquement [VILMIN *et al.*, 2015b]. Le schéma conceptuel du phosphore a également été mis à jour, notamment via l'introduction des phénomènes d'adsorption des orthophosphates (ou phosphore réactif dissous) sur les matières en suspension et par la redéfinition de la proportion de P dans la matière organique [VILMIN *et al.*, 2015a]. Un travail de couplage entre les manipulations en laboratoire et la modélisation biogéochimique a été mis en œuvre afin d'actualiser la définition et le comportement des populations bactériennes nitrifiantes présentes et apportées en Seine [RAIMONET *et al.*, 2015]. Enfin, la caractérisation fine des dynamiques algales observées ces dernières années en Seine a permis la redéfinition des espèces phytoplanctoniques du modèle. L'objectif de cette partie est de présenter ces ajustements en se basant principalement sur les travaux de VILMIN [2014]. Les modifications apportées au modèle et discutées ci-après sont synthétisées dans le *tableau I*.

Paramètre et sous-paramètre		Variable	Valeur VP5	Valeur VP6	Unité
Paramètre d'érosion					
Coef. d'érosion lié à la puissance hydraulique		eta	1,5	–	Sans dimension
Coef. d'érosion lié à la puissance hydraulique %		eta_pourc	–	0,003	Sans dimension
Coef. d'érosion lié à la navigation		energ	0,00025	0,0015	gm ⁻² .s ⁻¹
Phosphore inorganique particulaire					
Capacité d'adsorption du P sur les MES minérale (Langmuir)		Pac	–	12,8	mgP.gMESmin ⁻¹
Constance de demi-saturation vis-à-vis du phosphore (Langmuir)		Kps	–	0,01	mgP.L ⁻¹
Composition de la matière organique					
Ratio C/P		C/P	40	100	mgC.mgP ⁻¹
Bactéries nitrifiantes (intégration et caractérisation)					
AOB – Rivières – STEP	Conc.		0,004	0,0075	mg C.L ⁻¹
	Km		1,5	2	mgN.L ⁻¹
	μ max		0,05	0,04	.h ⁻¹
	Rdmt		0,07	0,077	mgC.mgNH ₄ ⁺ .h ⁻¹
NOB – Rivières – STEP	Conc.		0,0008	0,0008	mg C.L ⁻¹
	Km		0,04	10	mgN.L ⁻¹
	μ max		0,025	0,07	.h ⁻¹
	Rdmt		0,02	0,017	mgC.mgNH ₄ ⁺ .h ⁻¹
AOB – usine SAV	Conc.		–	0,027	mg C.L ⁻¹
	Km		–	1,5	mgN.L ⁻¹
	μ max		–	0,05	.h ⁻¹
	Rdmt		–	0,077	mgC.mgNH ₄ ⁺ .h ⁻¹
NOB – usine SAV	Conc.		–	0,008	mg C.L ⁻¹
	Km		–	0,3	mgN.L ⁻¹
	μ max		–	0,04	.h ⁻¹
	Rdmt		–	0,017	mgC.mgNH ₄ ⁺ .h ⁻¹
Espèces phytoplanctoniques					
Chlorophycée	Taux de croissance maximum	μ max	0,125	–	.h ⁻¹
	Température optimale	Topt	30	–	°C
Diatomée	Taux de croissance maximum	μ max	0,0625	–	.h ⁻¹
	Température optimale	Topt	15	–	°C
Diatomée estivale	Taux de croissance maximum	μ max	–	0,025	.h ⁻¹
	Température optimale	Topt	–	23	°C
Diatomée printanière	Taux de croissance maximum	μ max	–	0,05	.h ⁻¹
	Température optimale	Topt	–	10	°C

Tableau I. Modifications apportées entre les versions VP5 et VP6 de ProSe

2.1. Comportement des particules dans la colonne d'eau

Les matières en suspension (MES) ont un rôle central dans le fonctionnement d'un écosystème aquatique et la définition de leur comportement dans la colonne d'eau s'avère essentielle. Elles influent

notamment sur les phénomènes d'adsorption/désorption du phosphore, sur l'intensité de l'activité photosynthétique, sur le transport d'éléments dans la colonne d'eau (nutriments, carbone organique, pathogènes...) ainsi que sur le pompage benthique à travers le stock de vase constitué. Dans le logiciel

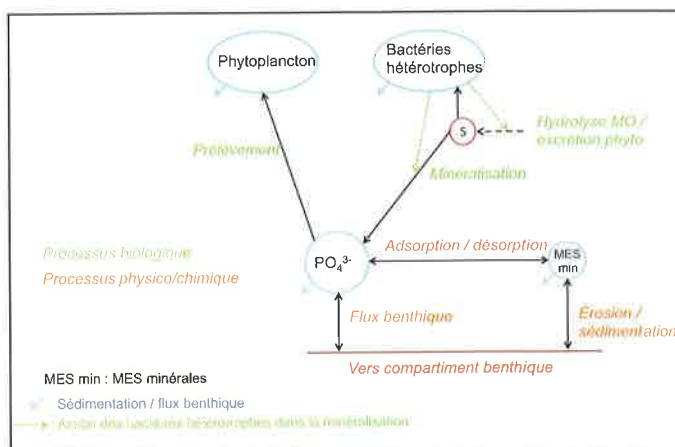
ProSe, le transport de particules résulte d'un équilibre entre les phénomènes d'érosion et de sédimentation modélisés simultanément [EVEN, 2006 ; VILMIN, 2014 ; VILMIN *et al.*, 2015b]. Ils sont calculés pour chaque espèce particulaire à partir de la puissance hydraulique totale, correspondant à la puissance hydraulique de l'écoulement (prédominante en Seine en période de hautes eaux) et à l'énergie fournie par la navigation (prédominante en Seine en période de basses eaux). La capacité érosive de l'écoulement est déterminée par la théorie de la capacité de transport qui considère que seule une partie de la puissance hydraulique totale contribue au maintien des particules dans la colonne d'eau [VILMIN, 2014].

Cette fraction de l'énergie, initialement dépendante de la pente de l'écoulement [EVEN, 1995], a été redéfinie et est dorénavant constante, en accord avec la littérature [VILMIN, 2014]. Les deux paramètres d'érosion (puissance hydraulique de l'écoulement et puissance transmise par la navigation) ont été ajustés par une procédure de calibration et de validation simultanées [VILMIN *et al.*, 2015b] (tableau I). Ces ajustements permettent notamment d'éviter une suraccumulation de vase en fond de Seine et de modéliser plus justement la remise en suspension des particules lors des épisodes de crues.

2.2. Comportement du phosphore dans la colonne d'eau

Le phosphore réactif dissous, correspondant aux orthophosphates, peut être prélevé dans le milieu pour les croissances bactériennes (*via* la consommation du substrat S) ou phytoplanctoniques. Les échanges de PO_4^{3-} entre la colonne d'eau et le compartiment benthique sont également pris en compte [EVEN, 1995]. La matière organique est composée d'une part de P qui peut être restituée au milieu lors de sa minéralisation par les bactéries (figure 3). La part de ce phosphore est définie selon le ratio C/P du logiciel.

ProSe-VP6 intègre dorénavant le processus d'adsorption du PO_4^{3-} sur la fraction minérale des MES [VILMIN *et al.*, 2015a]. Le complexe constitue alors du phosphore inorganique particulaire (PIP) [NÉMERY, 2003 ; GROUZ *et al.*, 2012]. Une fois adsorbée, cette fraction du phosphore peut sédimenter et n'est plus disponible pour la croissance des organismes vivants.



MES min : MES minérales
Sédimentation / flux benthique
Adsorption / désorption, minéralisation

Figure 3. Concept de modélisation du phosphore intégré dans la dernière version de ProSe (ProSe-VP6)

La teneur en P de la matière organique a également été redéfinie afin d'être plus représentative des observations en Seine (tableau I).

L'adsorption est représentée par une loi de Langmuir déterminant l'équilibre entre les concentrations en PO_4^{3-} , PIP et MES minérales. Elle est conditionnée par deux paramètres : la capacité maximale d'adsorption monocouche (Pac) et une constante d'équilibre liée à l'énergie de liaison (Kps). La concentration potentielle de PIP à un instant t répond à la formule :

$$[PIP_{pot}]_t = [MES_{min}]_t \cdot Pac \cdot \frac{[PO_4^{3-}]_t}{[PO_4^{3-}]_t + Kps}$$

[Équation 1]

La différence (ΔPIP) entre la concentration potentielle de PIP et la concentration de PIP modélisée à l'instant t détermine s'il y a adsorption ou désorption d'une quantité ΔPIP de P [VILMIN *et al.*, 2015a ; VILMIN, 2014] :

Si $\Delta PIP > 0$

si $\Delta PIP > [PO_4^{3-}]_t$; alors $\Delta' PIP = [PO_4^{3-}]_t$

si $\Delta PIP < [PO_4^{3-}]_t$; alors $\Delta' PIP = \Delta PIP$

Si $\Delta PIP < 0$ alors il y a désorption de P sous forme de PO_4^{3-} et $\Delta' PIP = \Delta PIP$

Dans les deux cas, la concentration en PO_4^{3-} à l'instant $t + dt$ est :

$$[PO_4^{3-}]_{t+dt} = [PO_4^{3-}]_t - \Delta' PIP \cdot \frac{dt}{dt + Kdt}$$

[Équation 2]

Kdt est un coefficient d'amortissement numérique régulant les échanges.

Afin d'être caractéristique des conditions du milieu modélisé, les valeurs des paramètres Pac et Kps ont été déterminées sur des échantillons d'eau de Seine prélevés en quatre points (Bougival, Conflans-Sainte-Honorine, Vernon et Poses) et pour plusieurs dates en périodes de basses eaux en 2012 [GROUZ et al., 2012; VILMIN et al., 2015b]. Une méthodologie fondée sur la validation des concentrations en PO_4^{3-} a ensuite été appliquée pour définir le couple de paramètres optimal : $Pac = 12,8 \text{ mgP/g}$, $Kps = 0,01 \text{ mgP/L}$ [VILMIN et al., 2015b].

2.3. Dynamique des populations bactériennes nitrifiantes

Trois formes azotées dissoutes sont modélisées : l'ammonium, les nitrites et les nitrates. L'azote est également intégré au modèle en tant qu'élément constitutif de la matière organique. La part de l'azote organique est définie selon le ratio C/N des espèces organiques. Le schéma conceptuel de la modélisation des espèces azotées dissoutes est présenté à la figure 4. Globalement, la part issue de la dégradation de la matière organique est utilisée pour la croissance bactérienne. L'ammonium et, dans une moindre mesure, les nitrates sont pompés pour la croissance du phytoplancton. L'activité bactérienne nitrifiante est également modélisée par la prise en compte d'espèces bactériennes nitrosantes (*ammonium oxidizing bacteria*, AOB) et nitratantes (*nitrite oxidizing bacteria*, NOB) [VILMIN, 2014; EVEN, 2006; EVEN, 1995; RAIMONET et al., 2015]. La croissance de la biomasse bactérienne est directement liée à la concentration en azote (ammonium ou nitrites) et en oxygène (figure 4). Les quantités d'ammonium et de nitrites nitrifiées sont proportionnelles au rendement de croissance des bactéries (Y exprimé respectivement en mgC/mgNH_4^+ et mgC/mgNO_2^-), à leur taux de croissance (μ) ainsi qu'à leur concentration dans le milieu $[BN]$. Elles se calculent par la formule :

$$NH_4^+ \text{ ou } NO_2^- \text{ nitrifiées} = \frac{\mu_{BN}}{Y_{BN}} \cdot [BN]$$

[Équation 3]

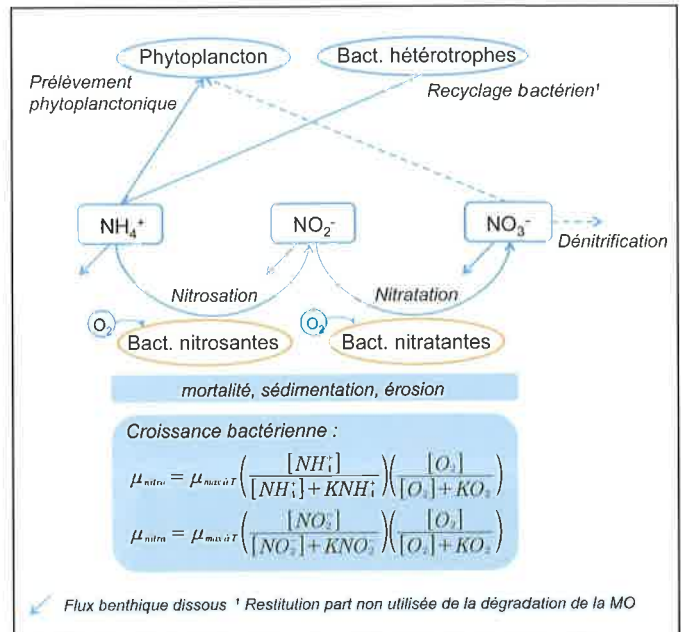


Figure 4. Schéma conceptuel de la modélisation des espèces azotées dissoutes

ProSe-VP5 permettait la prise en compte d'une population d'AOB et d'une population de NOB commune à l'ensemble des matrices considérées (rivières et apports urbains [rejets STEP, déversoirs d'orage, rejets permanents]). Des expérimentations en laboratoire ont permis de déterminer les communautés bactériennes caractéristiques des eaux de rivières et des rejets de STEP (type et concentration) et de définir leurs constantes cinétiques respectives [RAIMONET et al., 2015] (tableau I).

2.4. Ajustement des espèces phytoplanctoniques aux évolutions des dynamiques de bloom

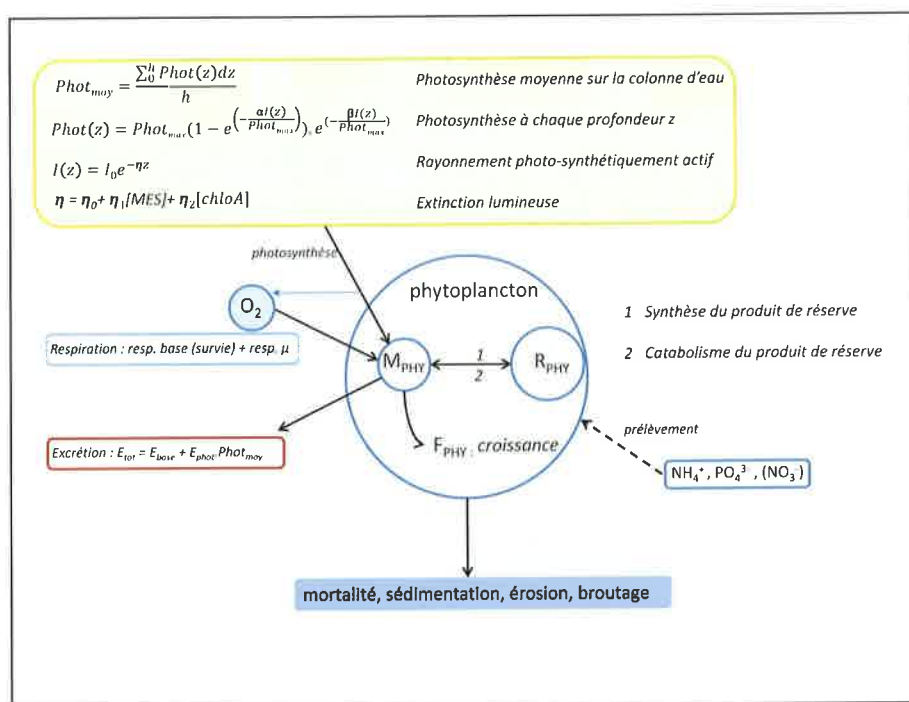
Le développement algal est modélisé via la définition de plusieurs espèces phytoplanctoniques. Celles-ci ont une incidence sur les concentrations en nutriments ainsi que sur la concentration en oxygène. Le concept de modélisation des différentes espèces d'algues considérées est identique. Chaque espèce constitue son stock de matière organique sous forme de molécules précurseurs (M) par photosynthèse. Ces molécules deviendront soit des produits de réserve (R), pouvant être remobilisés, soit des protéines et donc du matériel cellulaire (F) conduisant à la croissance de la biomasse phytoplanctonique (figure 5). La biomasse totale de phytoplancton est la somme de F , R et M . Plusieurs espèces de phytoplanctons

peuvent être modélisées dans ProSe sous ce même concept général. La concentration de chacune de ces espèces est calculée en fonction de la concentration totale en chlorophylle *a*. Initialement, la biomasse phytoplanctonique était appréhendée par une espèce de diatomées et une espèce de chlorophycées présentes chacune en proportion égale [GARNIER *et al.*, 1995]. Les récentes évolutions du suivi des espèces chlorophylliennes en Seine, notamment dans le cadre du projet CarboSeine, ont permis une étude plus fine des dynamiques algales [ESCOFFIER, 2014; GROLEAU *et al.*, 2013; ROCHER *et al.*, 2013]. L'analyse des blooms algaux de 2011 et 2012 a ainsi permis d'identifier que le cortège phytoplanctonique était principalement constitué de diatomées, les chlorophycées étant, ces dernières années, détectées à des niveaux négligeables au regard des mesures en chlorophylle *a* totale. Par ailleurs, les blooms de 2011 et 2012 sont intervenus à des périodes différentes (mars, mai et juillet) et par conséquent dans des conditions variables, notamment en matière de température. La VP6 prend donc en compte deux types de diatomées : une population « printanière » se développant préférentiellement dans des eaux fraîches

(10 °C) et une estivale se développant plutôt dans des eaux tempérées (23 °C). Leurs concentrations relatives sont calculées pour chaque journée en fonction de leur taux de croissance (*tableau I*) (VILMIN, 2014).

3. Validation de la nouvelle version ProSe-VP6

Le bénéfice des ajustements apportés au logiciel a été évalué en confrontant le résultat des simulations aux mesures « terrain » disponibles, que ce soit les données acquises dans le cadre de l'autosurveillance du Siaap, des réseaux de mesure RCS/RCO ou en utilisant le réseau de suivi CarboSeine. Pour apprécier les progrès du modèle liés aux travaux de la phase VI du Piren, les simulations ont été réalisées en utilisant la nouvelle version du logiciel, ProSe-VP6, mais également une version plus ancienne livrée à la suite des travaux de la phase V (2007-2010) du Piren-Seine (VP5). Les modélisations ont été réalisées sur une période de 5 années : de 2009 à 2013. Il est à noter que la version ProSe-VP6 permet de réaliser des modélisations pluriannuelles et de prendre en compte les caractéristiques finales de l'année 2008 (qualité des eaux, stocks et qualité des vases).



z : profondeur dans la colonne d'eau; *Phot(z)* : activité photosynthétique à *z*; *Phot_{max}* : activité photosynthétique max; η : extinction lumineuse, η_0 due à la colonne d'eau, $\eta_1[MES]$ due à la concentration en MES et $\eta_2[chloA]$ due à la concentration en chlorophylle *a*; α = capacité photosynthétique; β = capacité de photo-inhibition.

Figure 5. Schéma conceptuel de la modélisation de la biomasse phytoplanctonique

3.1. Évaluation de la qualité des prédictions de la version ProSe-VP6

Les résultats obtenus sont évalués par une double approche : graphique et numérique. La première repose sur la comparaison graphique des chroniques temporelles prédites et mesurées ainsi que sur l'étude des diagrammes observations *versus* prévisions (figure 6). L'approche numérique correspond au calcul d'un ensemble d'indicateurs statistiques qui permettent de quantifier les écarts prédictions/mesures sur le long terme (tableau II). Ces derniers ont été calculés pour l'ensemble des mesures disponibles pour les deux versions.

3.1.1. Cas de l'oxygène

La prédiction des concentrations en O_2 est satisfaisante. Les résultats obtenus avec la version VP6 ne présentent plus les décrochages significatifs observés avec la version VP5, notamment sur l'année 2010 pour laquelle le logiciel sous-estimait fortement les concentrations en O_2 . Ce constat, fondé sur l'observation de la chronique de données, est confirmé par le diagramme prédictions *versus* observations et par l'ensemble des scores statistiques qui apparaissent plus favorables pour la VP6 du logiciel. Les meilleurs résultats obtenus sur ce paramètre s'expliquent par deux phénomènes : l'ajustement des phénomènes d'érosion et de sédimentation et la possibilité de mener des modélisations pluriannuelles permettant une meilleure représentation des MES et des stocks de vases. Ces derniers s'accumulaient dans la VP5 et induisaient une surestimation du pompage benthique qui se traduisait par une sous-estimation des concentrations en oxygène dissous dans la colonne d'eau.

Par ailleurs, l'ajustement des dynamiques des populations de phytoplanctons a permis de réduire fortement la surestimation des blooms algaux et par conséquent la production d'oxygène associée à la photosynthèse. Ce phénomène induisait de fortes variations nycthémérales et une légère surestimation des concentrations modélisées en période estivale. La VP6 permet une représentation fidèle des concentrations observées en Seine, l'EM et l'EMA étant respectivement de -2 et 7 %. Les principaux décrochages encore observés interviennent principalement en période estivale, la concentration en oxygène dissous y étant plus sensible. Il apparaît alors que plusieurs « creux » liés à des événements pluvieux sont mesurés mais pas fidèlement modélisés. Ce phénomène est lié au type de données utilisées pour l'alimentation du modèle. Plus précisément, les flux apportés par les STEP et les déversoirs d'orage sont définis à l'échelle de la journée (utilisation de moyennes journalières). Ce mode d'intégration des flux ne permet pas de rendre compte de leur caractère hautement transitoire, les déversements de temps de pluie ne pouvant durer que quelques heures.

3.1.2. Cas de la pollution azotée

La prédiction des concentrations en NH_4^+ est globalement satisfaisante. La chronique temporelle montre que le modèle est en accord avec les observations, décrochant seulement lors des augmentations ponctuelles et brusques de NH_4^+ . Il convient de souligner que ces décrochages ponctuels ne sont pas nécessairement liés à un biais de simulation, mais peuvent être induits par le mode d'alimentation du modèle ProSe, le modèle étant alimenté avec des données moyennes journalières, que ce soit pour

	Nbre de données	AME (mg/L)		EM (mg/L)		EM (%)		EMA (mg/L)		EMA (%)		RMSE (mg/L)	
		VP5	VP6	VP5	VP6	VP5	VP6	VP5	VP6	VP5	VP6	VP5	VP6
O_2	1 785	7,42	3,93	0,45	-0,06	4 %	-2 %	0,94	0,54	12 %	7%	1,31	0,69
NH_4^+	279	3,89	1,68	-0,01	-0,07	-36%	-35%	0,29	0,26	54%	51%	0,51	0,39
NO_2^-	278	7,97	1,90	-0,12	-0,07	-31 %	-22%	0,27	0,13	58%	32%	0,89	0,27
PO_4^{3-}	209	0,83	0,36	-0,22	-0,02	-77 %	-8%	0,23	0,07	77%	25%	0,27	0,09
Chlo a	69	126,64	31,77	-32,46	-2,01	-1 015 %	-49%	32,84	3,66	435%	44%	45,05	7,47

Tableau II. Scores statistiques calculés à Triel et à Andrésey pour l'oxygène sur la période 2009-2013

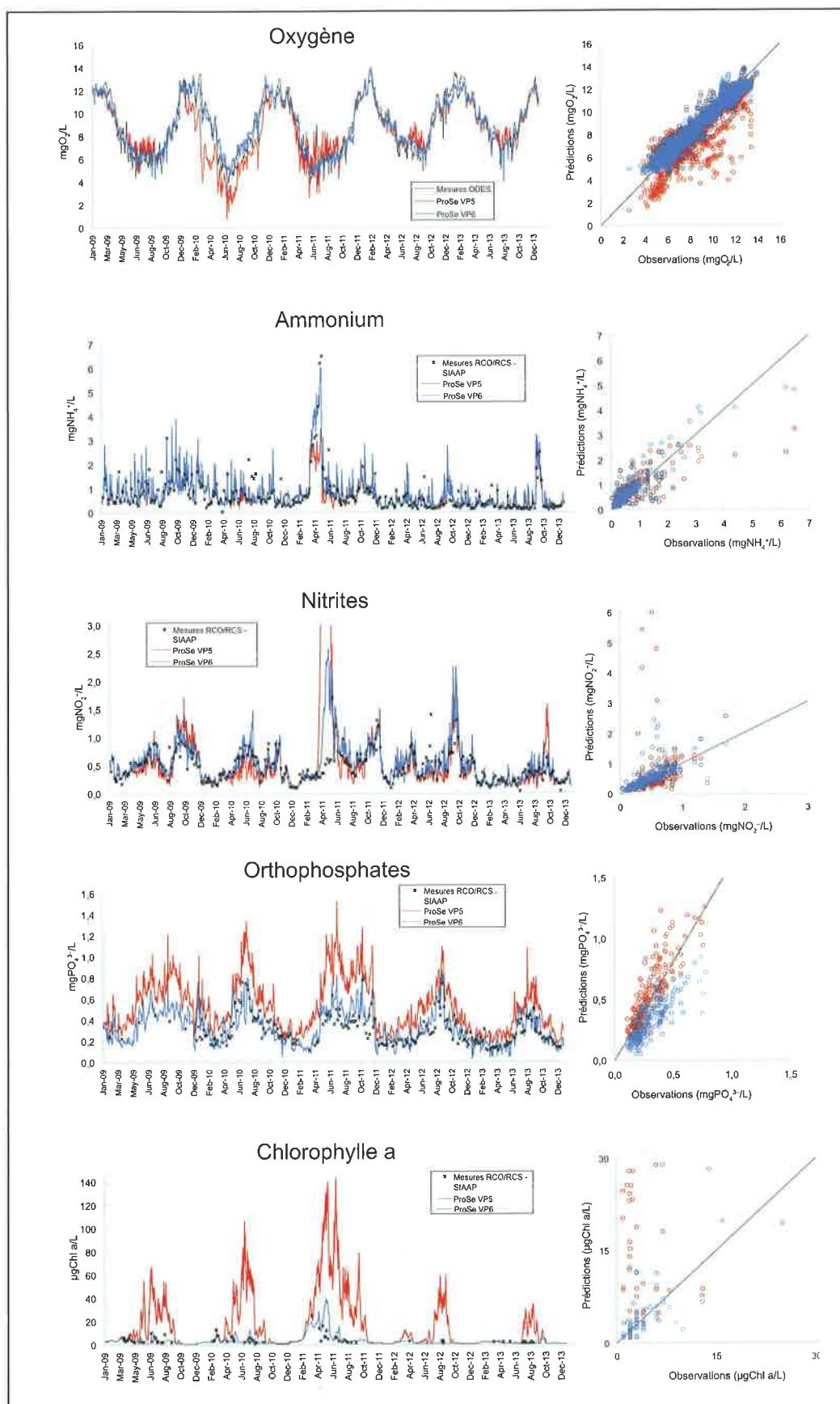


Figure 6. Comparaison des résultats de ProSe-VP5 (courbe et points rouges) à la ProSe-VP6 (courbe et points bleus) ainsi qu'aux mesures à Andrésey (O₂) et Triel-sur-Seine (NH₄⁺, NO₂⁻, PO₄³⁻ et chlorophylle a) sur les années 2009 à 2013

les concentrations ou les débits. De ce fait, un dysfonctionnement court de l'unité de nitrification de Seine Aval ou un déversement d'eau non traitée (RUTP), qui induira ponctuellement l'introduction d'un flux d'ammonium important dans la rivière, pourra être identifié par la mesure (si le prélèvement est effectué au moment du passage de la masse d'eau concernée par ce rejet), mais pas ou peu par la simulation puisque l'augmentation de la concentration dans le rejet pendant les quelques heures de dysfonctionnement sera lissée dans l'échantillon moyen 24 h servant à l'alimentation du modèle. Les augmentations brutales et ponctuelles mesurées dans la rivière en août 2010 et juin 2012, et non simulées, peuvent par exemple s'expliquer de cette manière. À l'inverse, on observe que le prélèvement peut avoir lieu en dehors du pic modélisé. L'ensemble des indicateurs statistiques témoigne de la meilleure représentativité de ProSe VP6 hormis l'erreur moyenne. En effet, elle passe de 0,01 à 0,07 mgNH₄⁺/L entre la VP5 et la VP6 témoignant de la très légère surestimation générale du modèle. Une analyse plus poussée de ces écarts permet de mettre en exergue que les niveaux bas de NH₄⁺ (inférieurs à 1 mgNH₄⁺/L) sont prédits avec la même sensibilité entre les deux versions (EM de -0,13 pour les deux versions). À l'inverse, la prédiction des valeurs hautes (supérieures à 1 mgNH₄⁺/L) s'avère significativement plus précise en VP6; l'EM évolue de 0,47 à 0,15 mgNH₄⁺/L entre les deux versions mais témoigne toujours d'une sous-estimation de certains pics de pollutions.

Les divergences d'envergure, telles que celles observées en avril/mai 2011 avec la VP5, ont été corrigées. Pour ces périodes, les conditions particulières du système d'assainissement francilien (période de chômage des unités de nitrification/dénitrification de Seine Aval) ont induit de fortes concentrations en NH₄⁺ dans le milieu qui étaient mal représentées en VP5. Les ajustements des populations bactériennes nitrifiantes en VP6 permettent de réduire le taux de nitrification en Seine. Par conséquent, les flux d'ammonium apportés par Seine Aval sont dorénavant plus stables et les concentrations sont modélisées à des niveaux proches de ceux mesurés. Cette amélioration est à rapprocher de la modélisation des NO₂⁻. En effet, tout comme pour le NH₄⁺, la représentation globale de ce paramètre s'avère satisfaisante au regard de la

chronique temporelle, toutefois la VP5 surestimait largement les niveaux des NO₂⁻ prédits en avril/mai 2011. La modification des espèces bactériennes nitrifiantes apportée en VP6 a permis de réduire la nitrification à l'aval de Seine Aval et ainsi de permettre une apparition du nitrite beaucoup plus proche de celle observée dans le milieu. La prédiction des NO₂⁻ en VP6 apparaît donc satisfaisante. L'EM et l'EMA calculés pour ce paramètre témoignent de l'amélioration de prédiction entre les deux versions, passant respectivement de -0,12 et 0,27 mgNO₂⁻/L en VP5 à -0,07 et 0,13 mgNO₂⁻/L, en VP6. Notons que les faibles écarts mis en évidence en VP6 apparaissent plus importants lorsqu'on les rapporte à la concentration dans le milieu, l'EMA atteignant dans ce cas 32 %.

3.1.3. Cas du phosphore réactif dissous

La prédiction des concentrations en PO₄³⁻ est satisfaisante. La surestimation globale du modèle observée en VP5 a été corrigée. La chronique temporelle montre que désormais le modèle suit bien les observations et le diagramme prédictions *versus* observations confirme cette tendance, les points étant équirépartis autour de la droite Y = X. L'erreur moyenne est désormais de -8 % alors qu'elle était de l'ordre de -77 % avec la VP5. L'ensemble des scores statistiques calculés témoigne de la bonne concordance des prévisions du modèle avec les mesures sur le terrain, l'EM et l'EMA étant respectivement de -0,02 et 0,07 mgPO₄³⁻/L.

Les chroniques de données acquises en continu grâce au réseau CarboSeine mettent également en exergue les bonnes performances de ProSe VP6. La chronique de données présentée à la figure 7 correspond à des données acquises en continu sur le site d'Andrésy, à une fréquence de 4 heures, entre les mois de juin et décembre 2012 (analyseur WetLabs Cycle P 131). On voit que, malgré son mode d'alimentation journalier précédemment évoqué, ProSe est capable de simuler de manière très fine la dynamique des orthophosphates à courte échelle de temps. Ce résultat confirme les conclusions faites sur la base de la comparaison ProSe *versus* données autosurveillance (figure 6), mais permet également d'être optimiste quant à une utilisation de ProSe à un pas de temps plus fin.

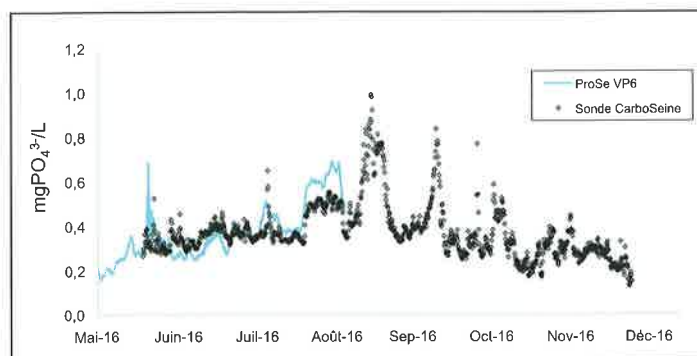


Figure 7. Concentration en PO_4^{3-} mesurée avec la sonde CarboSeine et modélisée avec ProSe VP6 au point de contrôle d'Andrézy

Cette amélioration significative des prédictions fait écho à deux modifications majeures du module biogéochimique de ProSe. En effet, la conceptualisation de l'adsorption permet de mieux représenter les phénomènes qui prennent place dans la colonne d'eau [NÉMERY, 2003 ; GROUZ *et al.*, 2012]. Une part du phosphore réactif dissous peut alors s'adsorber aux particules et ne se trouve plus en phase dissoute. Par ailleurs, la redéfinition des phénomènes de sédimentation/érosion, en permettant une meilleure prédiction des MES présentes dans la colonne d'eau, s'avère un complément nécessaire et essentiel à la bonne modélisation du phosphore.

3.1.4. Cas de la chlorophylle *a*

La précédente version du modèle présentait d'importants biais, probablement dus à la prise en compte d'espèces qui ne sont plus observées en Seine à l'heure actuelle. Ainsi les résultats obtenus avec la VP5 surestimaient fortement les concentrations en chlorophylle *a* totale observées en Seine. La redéfinition des espèces présentes en Seine permet d'améliorer significativement les prédictions du modèle. Ce constat repose à la fois sur l'observation de la chronique temporelle, du diagramme observations *versus* prédictions et du calcul des scores statistiques. L'EM et l'EMA sont de $-2,01$ et $3,66 \mu\text{g}$ chlorophylle *a*/L mais apparaissent plus importantes lorsqu'elles sont ramenées aux mesures (respectivement de -49 et 44 %). Ces meilleures performances devront néanmoins être confirmées lors de prochaines efflorescences algales dans la mesure où le bloom de 2011, principal bloom sur la période d'étude, a servi à la calibration de la version VP6.

Conclusion

Le logiciel ProSe développé depuis les années 1990 par Mines ParisTech dans le cadre du Piren-Seine est utilisé en routine par le Siaap pour la conduite d'études d'impact sur la qualité des eaux réceptrices. Cette utilisation opérationnelle nécessite une grande finesse de prédiction afin de répondre précisément aux enjeux portés par les évolutions réglementaires encadrant la politique de l'eau.

Cet article consacré à la validation opérationnelle de la dernière version du logiciel permet de faire un retour sur les mises à jour apportées lors de la phase VI du programme Piren-Seine. Celles-ci intègrent quatre modifications majeures : la calibration des phénomènes de sédimentation/érosion ; la paramétrisation du concept d'adsorption des orthophosphates aux MES minérales ; la redéfinition des biomasses bactériennes nitrifiantes véhiculées par la colonne d'eau et par les stations d'épuration et enfin la redéfinition des espèces de phytoplancton présentes en Seine et en Marne. Les performances du modèle ont été évaluées pour des paramètres clefs de l'évaluation de l'état des masses d'eau au sens de la directive cadre sur l'eau : l' O_2 , le NH_4^+ , le NO_2^- , le PO_4^{3-} et la chlorophylle *a* totale. Les chroniques temporelles et les diagrammes observations *versus* prédictions témoignent de la meilleure qualité prédictive du modèle dans sa dernière version et ce, pour l'ensemble des paramètres étudiés.

Le groupe de travail ProSe, composé des ingénieurs du Siaap et des scientifiques du Piren-Seine, continue à travailler à l'amélioration du modèle ProSe. Un des axes de travail concerne l'amélioration des performances du modèle lorsque le système assainissement-rivière ne fonctionne plus en conditions nominales, c'est-à-dire lorsque les entrées du modèle sont atypiques (chômages d'usine, par exemple). Les modes d'alimentation et d'ensemencement du modèle définis pour un fonctionnement nominal du système assainissement-rivière ne sont plus nécessairement adaptés et peuvent conduire à des biais de simulation plus importants. Outre cette piste de travail, l'un des grands défis consiste à adapter le modèle ProSe afin qu'il puisse être à long/moyen termes utilisé en temps réel pour optimiser l'exploitation du système d'assainissement et ainsi atteindre les objectifs de qualité du milieu récepteur.

Bibliographie

- BILLEN G., GARNIER J., HANSET P. (1994) : « Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the Riverstrahler Model applied to the Seine river system ». *Hydrobiologia* ; 289 : 119-37.
- ESCOFFIER N. (2014) : *Apports de la biogéochimie haute fréquence pour l'étude de la qualité de l'eau et la quantification du fonctionnement trophique de la Seine* [thèse]. Institut physique du globe de Paris, Université Paris Diderot.
- EVEN S. (1995) : *Modélisation d'un écosystème fluvial : la Seine - Le modèle ProSe* [thèse]. Centre d'information géologique, École nationale supérieure des mines de Paris.
- EVEN S. (2006) : *Notice d'utilisation du logiciel ProSe - Logiciel de simulation de l'hydrodynamique, du transport et du fonctionnement biogéochimique d'un réseau hydrographique - Version 4.*
- EVEN S., MOUCHEL J.M., SERVAIS P., FLIPO N., POULIN M., BLANC S., *et al.* (2007) : « Modeling the impacts of combined sewer overflows on the river Seine water quality ». *The Science of the Total Environment* ; 375 : 140-51.
- EVEN S., MOUCHEL J.-M., SERVAIS P., SEIDL M., POULIN M. (2004) : « Modelling oxygen deficits in the Seine River downstream of combined sewer overflows ». *Ecological Modelling* ; 173 : 177-96.
- EVEN S., POULIN M., GARNIER J., BILLEN G., SERVAIS P., CHESTERIKOFF A., COSTE M. (1998) : « River ecosystem modelling: application of the PROSE model to the Seine river (France) ». *Hydrobiologia* ; 373-374 : 27-45.
- FLIPO N., EVEN S., POULIN M., TUSSEAU-VUILLEMIN M., AMÉZIANE T., DAUTA A. (2004) : « Biogeochemical modelling at the river scale: plankton and periphyton dynamics (Grand Morin case study, France) ». *Ecological Modelling* ; 171 : 333-46.
- FLIPO N., RABOUILLE C., POULIN M., EVEN S., TUSSEAU-VUILLEMIN M., LALANDE M. (2007) : « Primary production in headwater streams of the Seine basin: The Grand Morin river case study ». *The Science of the Total Environment* ; 375 : 98-109.
- GARNIER J., BILLEN G., COSTE M. (1995) : « Seasonal succession of diatoms and *Chlorophyceae* in the drainage network of the Seine River: Observations and modelling ». *Limnol. Oceanogr.* ; 40(4) : 750-65.
- GROLEAU A., ESCOFFIER N., VILMIN L., AUGÉ A., BENSOUSSAN N., POULIN M., *et al.* (2013) : *Apports croisés des mesures haute fréquence pour le calcul d'indicateurs et pour la modélisation du fonctionnement trophique de la Seine à l'aval de Paris*. Rapport d'étude Piren-Seine phase VI.
- GROUZ N., GARNIER J., BILLEN G., MERCIER B., MARTINEZ A. (2012) : *Apports et devenir du phosphore dans le bassin de la Seine*. Rapport d'étude Piren-Seine phase VI.
- GROUZ N. (2015) : *Eutrophisation et dynamique du phosphore et de l'azote en Seine. Un nouveau contexte suite à l'amélioration du traitement des eaux usées* [thèse]. Paris, Université Pierre et Marie Curie.
- 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]. Université Paris 6 - Pierre et Marie Curie.
- RAIMONET M., VILMIN L., FLIPO N., ROCHER V., LAVERMAN A.M. (2015) : « Modelling the fate of nitrite in an urbanized river using experimentally obtained nitrifier growth parameters ». *Water Research* ; 73 : 373-87.
- ROCHER V., GROLEAU A., ESCOFFIER N., GARCIA-GONZALEZ E., POUILLAUDE J., GUÉRIN S., *et al.* (2013) : « Suivi en continu de la qualité des eaux de surface - Premiers résultats du projet CarboSeine ». *Technique Science Méthode* ; 1/2 : 18-29.
- VILMIN L., FLIPO N., POULIN M. (2012) : *Le module de simulation biogéochimique C-RIVE*. Rapport d'étude Piren-Seine phase VI.
- VILMIN L. (2014) : *Modélisation du fonctionnement biogéochimique de la Seine de l'agglomération parisienne à l'estuaire à différentes échelles temporelles* [thèse]. MINES ParisTech.
- VILMIN L., AISSA-GROUZ N., GARNIER J., BILLEN G., MOUCHEL J.-M., POULIN M., FLIPO N. (2015a) : « Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River ». *Biogeochemistry* ; 122 : 229-51.
- VILMIN L., FLIPO N., DE FOUQUET C., POULIN M. (2015b) : « Pluri-annual sediment budget in a navigated river system: The Seine River (France) ». *Science of The Total Environment* ; 502 : 48-59.

Acronymes

banque HYDRO	Base de données nationale sur l'hydrologie des cours d'eau de France
CarboSeine	Programme de surveillance multiparamètre de la qualité des eaux de Seine
ODES	Réseau de mesure de l'oxygène dissous en Seine
Piren-Seine	Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement de la Seine
ProSe	Programme Seine
ProSe-VP5	Programme Seine - Version Phase 5
ProSe-VP6	Programme Seine - Version Phase 6
RCO	Réseau de contrôle opérationnel – Réseaux de surveillance de la qualité des masses d'eau
RCS	Réseau de contrôle de surveillance - Réseaux de surveillance de la qualité des masses d'eau
RIVE	Modèle des processus microbiologiques s'opérant dans la colonne d'eau et les sédiments
RUTP	Rejets urbains de temps de pluie
SAV	Station d'épuration des eaux usées de Seine Aval (Achères, 78)
STEP	Station d'épuration des eaux usées

Institutions

DE 92	Direction de l'eau du département des Hauts-de-Seine
DEA 93	Direction de l'eau et de l'assainissement du département de Seine-Saint-Denis
DSEA 94	Direction des services de l'environnement et de l'assainissement du département du Val-de-Marne
SAP	Service assainissement de la ville de Paris
Sedif	Syndicat des eaux d'Île-de-France
Siaap	Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne

Paramètres du modèle

AOB	Bactéries nitrosantes – <i>ammonium oxidizing bacteria</i>
C/N	Ratio carbone/azote
C/P	Ratio carbone/phosphore
F	Matériel cellulaire des espèces phytoplanctoniques
M	Molécules précurseurs produites par les espèces phytoplanctoniques
MES	Matière en suspension
MESmin	Matière en suspension minérale
MOD	Matière organique dissoute
MOP	Matière organique particulaire
NH ₄ ⁺	Ammonium
NO ₂ ⁻	Nitrites
NO ₃ ⁻	Nitrates
NOB	Bactéries nitrifiantes - <i>nitrite oxidizing bacteria</i>
O ₂	Oxygène dissous
P	Phosphore
PIP	Phosphore inorganique particulaire
PIPpot	Concentration potentielle en phosphore inorganique particulaire
PO ₄ ³⁻	Orthophosphates
Ptot	Phosphore total
R	Produits de réserve des espèces phytoplanctoniques

Variables statistiques

AME	Erreur maximale absolue
EM	Erreur moyenne
EMA	Erreur moyenne relative
RMSE	Erreur quadratique moyenne

Résumé

B. LABORIE, V. ROCHER, L. VILMIN, M. POULIN, M. RAIMONET, L. BENARD, J. BERNIER, S. GUÉRIN, A. CUSSONNEAU, J. POUILLAUDE, N. ESCOFFIER, A. GROLEAU, J.-M. MOUCHEL, N. FLIPO

Le modèle de prédiction de la qualité de la Seine ProSe. Améliorations apportées par les récents travaux de recherche (Piren-Phase VI)

Le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (Siaap) évalue l'impact du système d'assainissement francilien sur la qualité du milieu récepteur : la Seine et la Marne. Cette évaluation passe par le déploiement de réseaux de mesures opérationnels, ainsi que par la mise en place d'outils de modélisation de la qualité des eaux. Le logiciel de modélisation ProSe (Programme Seine) a été développé par l'École des mines de Paris dans le cadre du programme de recherche Piren-Seine (programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement de la Seine). ProSe permet de simuler l'impact des apports de pollutions anthropiques (rejets transitoires de station d'épuration, rejets urbains de temps de pluie, rejets permanents) sur la qualité de la Seine et de la Marne lors de leur traversée de l'agglomération parisienne. Le Siaap utilise ce modèle à des

fins opérationnelles pour orienter les choix d'exploitation, notamment pour la programmation des chômages d'ouvrage. Les simulations faites avec le modèle ProSe servent également à orienter les programmes d'investissement. En constante évolution, le logiciel s'est doté d'une nouvelle version dans le cadre du 6^e programme de recherche du Piren-Seine (2011-2014). À la suite de ces évolutions, le groupe de travail ProSe, composé des ingénieurs et experts du Siaap et des scientifiques du Piren-Seine, a souhaité rédiger un document de synthèse décrivant les ajustements et améliorations apportés au modèle et présentant les principaux tests de validation de cette nouvelle version du logiciel. Ce travail a permis de mettre en avant l'amélioration des prédictions de plusieurs variables essentielles dans l'évaluation de la qualité des eaux : l'O₂, le NH₄⁺, le NO₂⁻, les PO₄³⁻ et la chlorophylle a.

Abstract

B. LABORIE, V. ROCHER, L. VILMIN, M. POULIN, M. RAIMONET, L. BENARD, J. BERNIER, S. GUÉRIN, A. CUSSONNEAU, J. POUILLAUDE, N. ESCOFFIER, A. GROLEAU, J.-M. MOUCHEL, N. FLIPO

The predictive model of the Seine river quality: ProSe. Improvements resulting by recent research (Piren Phase VI)

Siaap (Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne) evaluates the impact of the Île-de-France wastewater treatment system on its receiving water body: the Seine and Marne rivers. This evaluation involves both a river water quality monitoring and modeling activity. The ProSe (Programme Seine) simulation software has been developed by the École des mines de Paris in the framework of the Piren-Seine (Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement de la Seine) research program. ProSe simulates the impact of anthropogenic pollution sources (WWTP effluents, CSOs and permanent point source pollutions) on the Seine and Marne water quality in the greater Paris region. Siaap uses this model as an operational tool to assist in decision-making, such

as wastewater routing choices during partial or complete WWTP stoppage. ProSe simulations are also used to direct investments made by Siaap towards improving the Seine and Marne water quality. ProSe is frequently updated to better simulate the river water quality, and a new version was recently developed during the 6th phase of the Piren-Seine program (2011-2014). The ProSe Task Group, composed of Siaap experts and engineers as well as Piren-Seine scientists, proposes an overview of the modifications and improvements that were brought to the ProSe model in its latest version, along with some of the validation results that were obtained in the process. This overview shows that improvements were made on the prediction of several key water quality variables: O₂, NH₄⁺, NO₂⁻, PO₄³⁻ and chlorophyll a.