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

Alexis Groleau [1*], Nicolas Escoffier [1], Lauriane Vilmin [2], Anthony Auge [1], Nathaniel Bensoussan [2], Michel Poulin [2], Vincent Rocher [4], François Metivier [1], Nicolas Flipo [2]

[1] Laboratoire de Géochimie des Eaux. Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, IPGP, UMR 7154, CNRS, F-75205 Paris, France.
[2] Centre de Géosciences. Systèmes Hydrologiques et Réservoirs. Mines ParisTech. 35, rue Saint-Honoré. 77305 Fontainebleau
[3] IPSO FACTO. Pôle Océanologie et Limnologie. 4, rue de Tilsit, F-13006 Marseille. www.ips-o.fr
[4] SIAAP - Direction du Développement et de la Prospective. 82 avenue Kléber - 92700 – Colombes
[*] groleau@ipgp.fr

1. Introduction et Objectifs

Les actions de recherche abordées dans les blocs BHR (Biogéochimie Haute Résolution) et Modèle de l'axe BAF visent à documenter, à haute fréquence, à l'aide de stations de mesures *in situ* haute fréquence, les paramètres de qualité de l'eau de la Seine à l'aval de Paris, qui renseignent sur la dynamique de son fonctionnement trophique. Les deux premières années de la phase 6 du PIREN nous ont permis de déployer les stations de mesures, de valider les procédures de métrologie des capteurs, et de qualifier les chroniques de données. Pour les aspects relatifs à la modélisation, le découplage du module biogéochimique RIVE vis à vis du module de transport a conféré à l'outil de modélisation ProSe une considérable amélioration de ses fonctionnalités ergonomiques. Ainsi le transport sédimentaire a pu être révisé, entrainant un calage plus robuste de la représentation du phosphore dissous.

Pour ce rapport annuel 2013, nous avons pu mettre en application le couplage entre mesure haute fréquence et modélisation tel que conceptuellement imaginé dans les deux blocs de travail BHR et Modèle de l'axe BAF (Figure 1).

A ce titre, nos objectifs scientifiques étaient de comparer l'analyse des données haute fréquence avec les capacités de simulation de ProSe pour deux types de processus affectant les paramètres de qualité de l'eau.

Un premier ensemble de résultats sera présenté sur le métabolisme du fleuve. L'amélioration des calculs de métabolisme à partir des données mesurées doit fournir des informations sur la variabilité et l'alternance des périodes d'autotrophie et d'hétérotrophie de l'écosystème Seine. La recherche des facteurs de contrôle du métabolisme est également un objet de recherche abordé en 2013. Les indicateurs de métabolisme sont en parallèle comparés aux flux calculés par ProSe concernant la croissance de la biomasse chlorophyllienne algale et la production/consommation d'oxygène dissous. La simulation de la biomasse algale, jusqu'alors très mal représentée par les simulations ProSe, doit bénéficier des observations ainsi que de l'amélioration de nos connaissances sur la dynamique des blooms.

Un second ensemble de résultats porte sur la variabilité de la concentration en phosphore à pas de temps fin (échelle horaire). Malgré des séries de mesures parfois incomplètes dans le temps et l'espace, la pertinence de la mesure haute fréquence doit être démontrée en comparant les estimations obtenues à l'aide du modèle ProSe avec les chroniques temporelles relatives au phosphore dissous.

Sur le plan opérationnel, un bilan du fonctionnement pluri annuel (2011-2013) du réseau de mesure CarboSeine (investissement financé par le DIM R2DS de la région Ile de France) est établi.

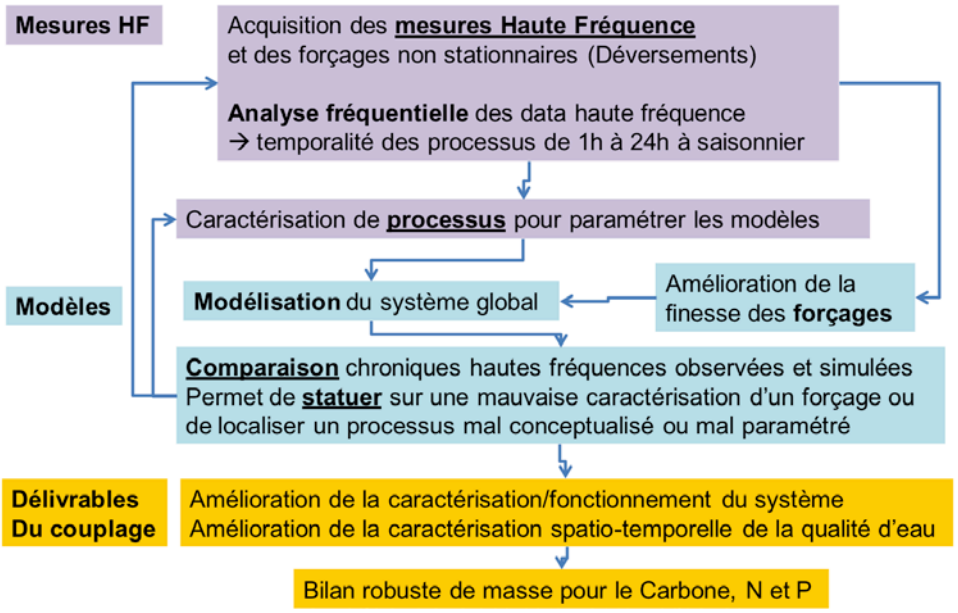

Figure 1: Méthodologie conceptuelle du couplage mesures HF et modélisation dans l'axe BAF

2. Fonctionnement du réseau de mesure

Le réseau CarboSeine sert à mesurer à haute fréquence *in situ* et en continu des observables témoignant de la qualité de l'eau de la Seine. Huit paramètres physico-chimiques en milieu aquatique (Conductivité, T°, O_2 dissous, turbidité, pH, chlorophylle multi-classes d'algues et phosphore réactif soluble) et six paramètres météorologiques (T°air, humidité relative, pression atmosphérique, vent (vitesse et direction), pluviométrie et irradiance) sont enregistrés toutes les 15 minutes (sauf 4 heures pour le phosphore).

A l'heure actuelle, trois stations autonomes sont déployées à différents endroits stratégiques sur un bief de Seine de 55 km (Cf. Figure 2). Le site de Suresnes (pk 673) est en aval de l'agglomération parisienne et en amont de la STEP de Seine Centre (Colombes). Le site de Bougival (pk 705) est lui en aval de la STEP de Seine Centre (+12 km) de même qu'à l'aval des déversoirs d'orage de Clichy / La Briche (+ 20 et 25 km). Enfin, Andrésy (pk 729), le dernier site d'étude mis en place est positionné en aval de la confluence avec l'Oise et de la STEP Seine Aval.

Cependant, la station d'Andrésy est hors service depuis avril 2013, suite à une collision par une barge de la société VNF. La procédure de dédommagement est en cours suite à un long processus d'expertise des dommages. La dernière étape liée remonte à janvier 2014 avec la contre expertise d'un bureau d'étude en assurance missionné pour régler le dossier. Les travaux de réparation pourraient commencer au printemps 2014.

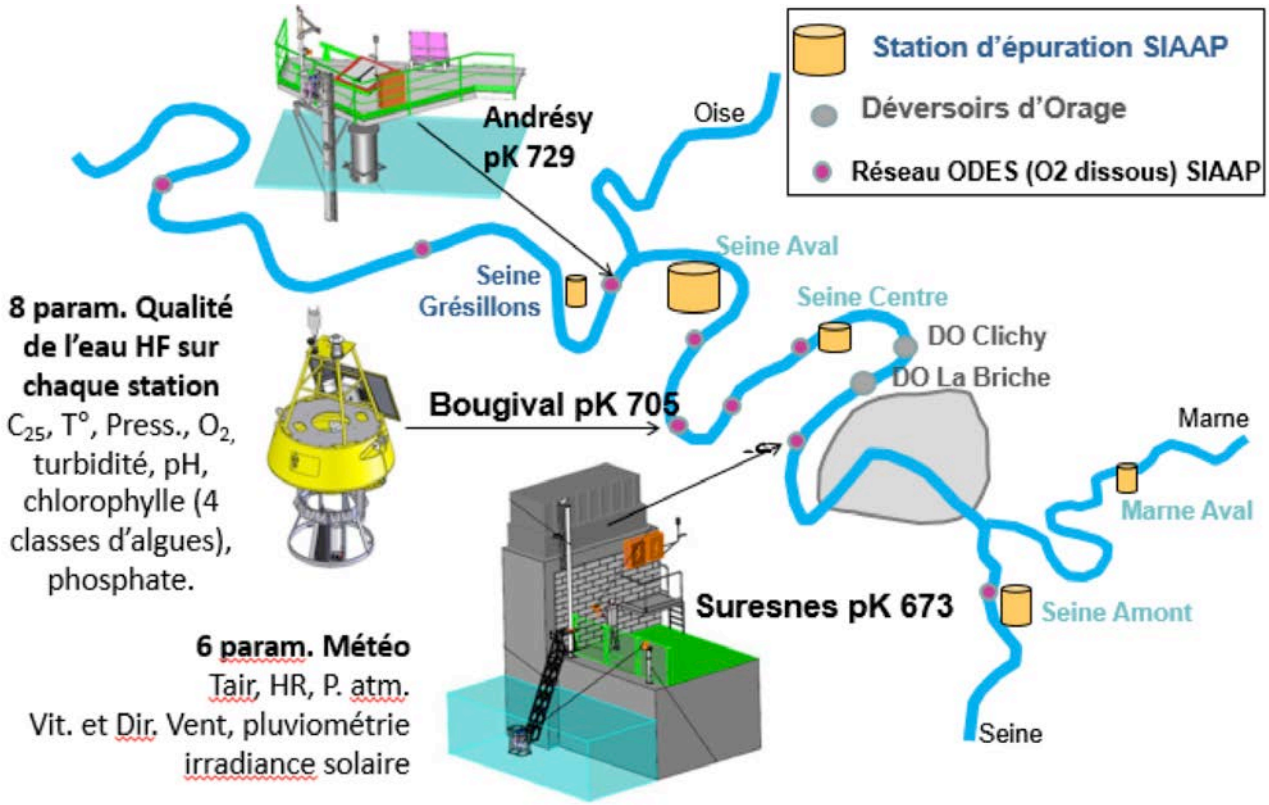

Figure 2: Présentation de l'implantation des stations de mesures CarboSeine

2.1. Modifications matérielles

Depuis la mise en place de la première station de mesures à haute fréquence en juillet 2010 à Bougival, le schéma type d'une station d'acquisition CarboSeine a évolué pour s'adapter aux contraintes locales, ainsi qu'à un cahier des charges assez évolutif. A ce jour, la configuration matérielle des trois sites est la même et tous les capteurs sont interfacés avec l'automate ABIN de troisième génération développé par NKE-Instrumentation (Cf. Figure 3). Chaque type de difficultés rencontrée sur le plan matériel ou logiciel entraine systématiquement un retard allant de 4 à 12 mois.

A titre d'exemple on peut citer un point de blocage concernant l'interfaçage de la nouvelle génération de fluorimètre BBE (FPIII) pour la mesure des différentes classes d'algues sur un système initialement conçu pour un fluorimètre BBE FPII. Plus d'une année s'est écoulée entre la détection du dysfonctionnement (mai 2012) et la fourniture d'une solution (novembre 2013). En ce qui concerne l'alimentation énergétique, deux stations sont raccordées au 220V et suppléées par une batterie 12V en cas de coupure électrique (autonomie 15 jours, Bougival et Suresnes). La Station d'Andrésy reste alimentée via panneau solaire.

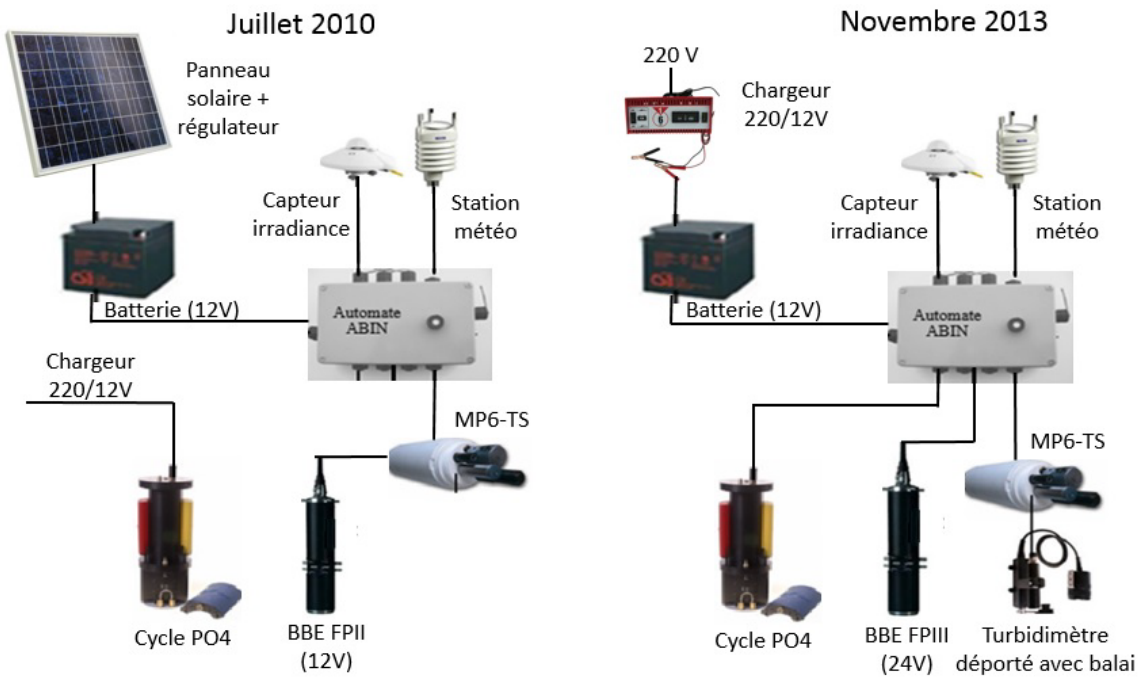

Figure 3: Evolution matérielle de la partie mesure des stations CarboSeine entre juillet 2010 et novembre 2013

2.2. Guide technique de maintenance et de métrologie

Initié en 2012 par l'IPGP conjointement avec le SIAAP, le guide technique peut être caractérisé de manuel d'utilisation des stations CarboSeine (92 pages). C'est un document indispensable pour l'opérateur lorsqu'il y a une intervention sur les stations. En effet, il est décrit pour chaque capteur : son principe de fonctionnement, les différentes opérations de nettoyages, de calibrations, et de mesures contradictoires à réaliser. Grâce aux retours d'expériences depuis maintenant plus de 3 ans, ce document est d'une très grande richesse technico-scientifique puisqu'il rassemble tous les problèmes rencontrés et les solutions associées.

Par ailleurs, un fichier Excel (classeur de suivi) propre à chaque station a été créé. Il permet à l'opérateur de noter tous ce qui a été fait lors d'une intervention terrain : calibration des sondes, mise à jour du logiciel de l'automate ABIN, nettoyage des capteurs, mesures contradictoires, observations particulières…Ce document est indispensable dans la mesure où il permet de connaitre très rapidement l'historique des interventions effectuées sur les stations CarboSeine et de mettre à jour régulièrement le guide technique lorsque des problèmes sont survenus.

Le déploiement des trois stations de mesures à haute fréquence mobilise beaucoup de moyens matériels et humains. Sur le plan des ressources humaines, une thèse de doctorat Cifre a été dédiée au projet. Depuis 2011, trois stages ingénieurs de 6 mois ont été réalisés (4ème stage en cours). Un total de 125 interventions ont eu lieu sur les trois stations CarboSeine confondues (cf Tableau 1). La durée de ses interventions est de l'ordre de la demi-journée, ou de la journée entière. Du fait que la première station de mesure à haute fréquence soit située à Bougival (2010), ce site est celui où le plus de déplacements a été effectué. La station d'Andrésy ayant fonctionné à peine une année (collision par une barge de la société VNF), le nombre d'interventions est relativement faible.

Par ailleurs, avant chaque déploiement d'un capteur dans le milieu naturel, ce dernier subi tout une série de tests en laboratoire, ainsi que dans le hall d'essai du SIAAP (DDP Colombes) pour une partie d'entre eux. Ces procédures requièrent beaucoup de temps mais elles s'avèrent être indispensables puisqu'elles permettent d'assurer une métrologie rigoureuse des capteurs, et de gérer les recalibrations si besoin. Ce type de diagnostic a notamment permis de renvoyer à un fabriquant un analyseur de phosphore dissous défectueux (cycle P).

De plus, le récent renforcement de moyen humain sur le réseau CarboSeine permet d'intervenir sur site beaucoup plus rapidement en cas de problèmes. Depuis le recrutement d'un ingénieur d'étude en octobre 2013, trente-deux interventions au total ont eu lieu sur les deux sites fonctionnels (Suresnes et Bougival). Les stations CarboSeine ont évolué au cours de l'autonome 2013, notamment avec la livraison d'une nouvelle génération d'automate ABIN capable d'interfacer les sondes fluoroprobe (FPIII 24V) et les analyseurs de phosphore dissous. Ces déplacements sur sites étaient indispensables afin de résoudre les pannes et de rendre opérationnel aujourd'hui un système satisfaisant le cahier des charges. Par ailleurs, ce chiffre prend en compte les interventions d'entretien et de maintenance habituelles. Ces interventions sont également l'occasion d'opérations de maintenances (nettoyage, ..) des capteurs et de s'assurer de la validité des mesures en faisant des analyses contradictoires et le cas échéant de re-calibrer l'appareil.

A noter que toutes les interventions sur les stations CarboSeine se font obligatoirement en binôme (IPGP-SIAAP) afin de respecter les règles de sécurités établies par le plan de prévention et de sécurité (PPS renouvelé chaque année). Ces PPS et la vérification de leur respect scrupuleux font partie de la compétence de Voies Navigables de France (VNF) qui a autorité sur le domaine fluvial.

Tableau 1: Nombre d'interventions réalisées sur les stations CarboSeine. (*) date d'installation sur site.

Stations CarboSeine	Nombre d'interventions sur site
pk 673 Suresnes (06/06/2012*)	42
pk 705 Bougival (01/07/2010*)	79
P729 Andrésy (11/05/2012 - 01/04/2013*)	10

2.3. Interface STARTmel

Le logiciel développé en Open Source (STARTmel) gère la base de données pour la rendre accessible via un site internet sécurisé. Les 8 paramètres physico-chimiques et les 7 paramètres météorologiques mesurés à une fréquence de 15 minutes (sauf 4 heures pour le phosphore), sont envoyés par mail toutes les deux heures en transitant par le service SMTP d'Orange vers un serveur dédié hébergé par la compagnie OVH (Cf. Figure 4) Après acheminement des mails dans le service POP3, ceux-ci sont lus et mis en base par le service CRON. CRON interroge chaque minute les nouveaux mails réceptionnés dans la boite de réception POP3. Chaque mail est analysé par un script « Mail 2 data » qui sépare les différents éléments contenus. Enfin, le service MYSQL permet d'incrémenter et gérer cette base de données en différenciant mails, pièces jointes, stations, capteurs suivant leurs numéros d'identification (ID) respectifs.

En 2013, il a été constaté un certain nombre de problèmes liés aux caractéristiques du serveur initialement utilisé et hébergé par l'IPGP (capacité et vitesse de traitement, administration restrictive, black-listing récurent du SMTP d'Orange). Ces limitations parasitaient régulièrement la transmission des données et le bon fonctionnement de STARTmel. Il a ainsi été décidé de migrer vers l'opérateur privé OVH. Depuis le 22 janvier 2014, date de basculement de l'émission des données vers le serveur OVH, le système a retrouvé sa capacité de fonctionnement nominale. En cas de problème avec le serveur, les données des stations CarboSeine sont par ailleurs toujours accessibles via l'opérateur Orange puisqu'elles sont envoyées en doublon depuis le 19/12/2013 par chaque station vers une seconde adresse orange. L'une des conclusions essentielle résultant des différentes phases de développement de STARTmel concerne la sécurisation de la transmission des données afin de se prémunir d'éventuels actes de piratages du système. Parmi les perspectives envisagées en matière de sécurisation, figurent diverses options de codage des mails pour que l'envoi GSM, et le transit par SMTP Orange ne puisse être corrompu. Pour autant, ce type d'amélioration nécessitera une modification importante des automates ABIN.

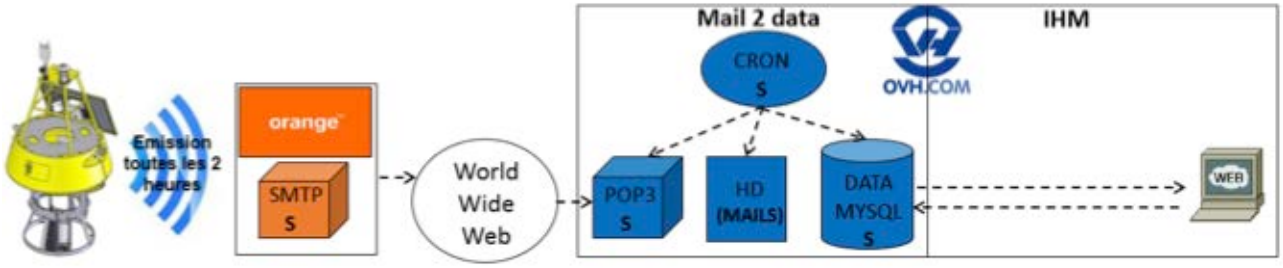

Figure 4: Système de réception et mise en base des données

2.4. Le site internet CarboSeine (www.CarboSeine.fr)

Le site internet présenté permet à l'opérateur de visualiser en temps réel la qualité physico-chimique et biologique de la Seine sur 55 km depuis l'aval de Paris (Suresnes) jusqu'à la confluence Seine-Oise (Andrésy). Certaines données sont affichées de manière publique. Il ne s'agit pas seulement d'un simple site de visualisation de données, il permet à l'opérateur de mener une véritable expertise technico-scientifique. En effet, il a été développé un module « expert » qui permet de regarder à différentes échelles spatiales et temporelles l'évolution des paramètres. Il est ainsi tout à fait possible de comparer sur un même graphique les valeurs de l'oxygène entre la station Suresnes et Bougival (Figure 5) et de les tracer sur de longues périodes de temps (un an ou plus). Avec la visualisation de ces données en temps réels, il est possible de diagnostiquer rapidement l'état physique d'un capteur : encrassement, dysfonctionnement, dérive, panne…..Par ailleurs, l'opérateur est immédiatement informé en cas d'avarie. Un des exemples pour illustrer ceci, est l'envoie de mails automatique d'alarmes sur adresses mails lorsque les données n'ont pas été collectées depuis plus de cinq heures.

Au 1er mars 2014, la base de données CarboSeine s'élève à près de 6,3 millions d'enregistrements.

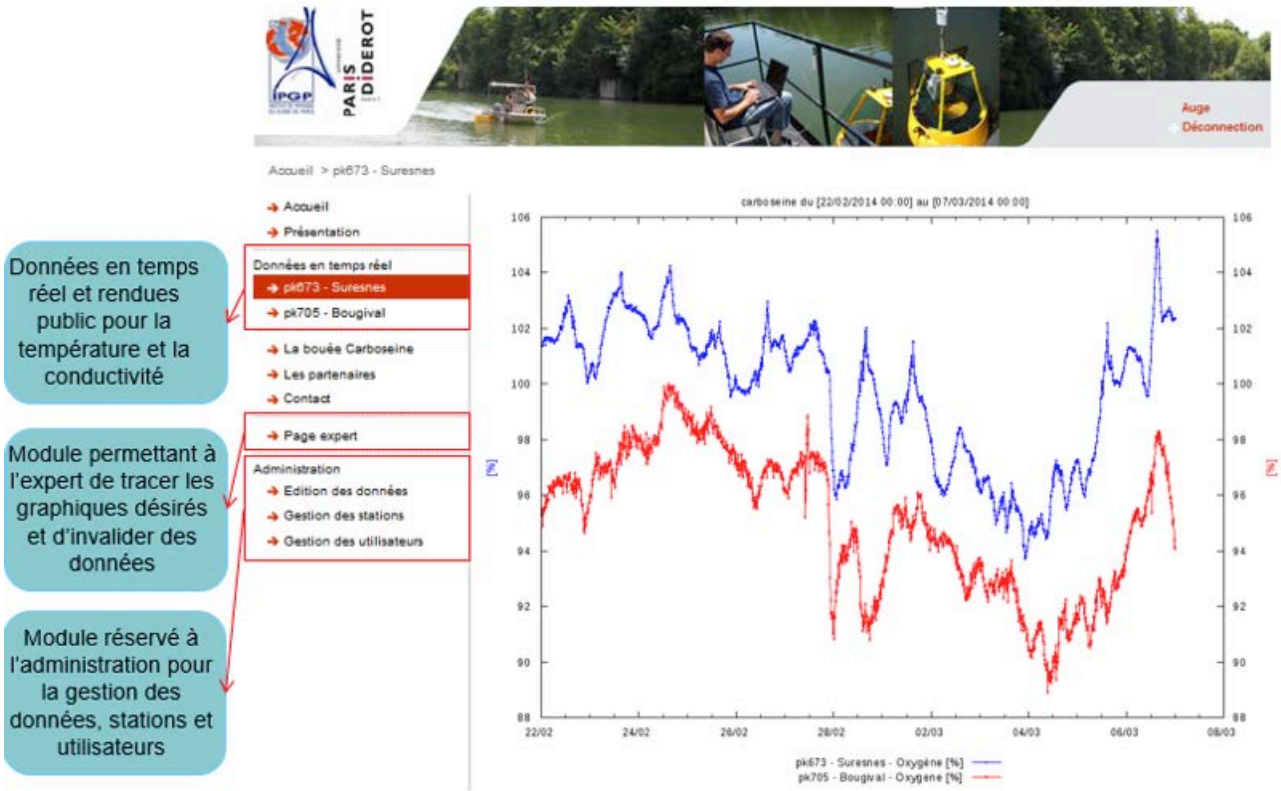

Figure 5: Copie d'écran du site internet CarboSeine. Comparaison entre Suresnes et Bougival des concentrations en oxygène dissous en février et mars 2014.

2.5. Statistiques d'acquisition

Le Tableau 2 rend compte des taux de couvertures du réseau CarboSeine à partir du capteur Smatch de NKE. Il s'agit d'un capteur multiparamétriques (O_2, pH, conductivité, turbidité, pression, température de l'eau) cadencé à la fréquence de 15 min. Sur l'ensemble de ces trois stations, le taux de couverture est toujours supérieur à 70%. Seule l'année 2013 pour la station Bougival présente un taux de couverture trop faible relativement aux années précédentes. Deux causes principales sont identifiées : (1) Des milliers de mails transitant par le SMTP orange ont été black-listés par intermittence par les listes antispam Renater auxquelles notre serveur IPGP se réfère. Tout mail non délivré revient 24h après son émission vers la boite d'envoi, à savoir celles auxquels les automates ABIN se réfèrent. La présence de ces mails a corrompu aléatoirement le fonctionnement de l'automate, empêchant l'acquisition de nouvelles mesures. Le bilan est que des arrêts nombreux et intermittents d'enregistrements ont eu lieu en 2013 (cf par. 2.3). La solution de remédiation (migration vers OVH) a été longue à mettre en place. (2) Au cours de l'été 2013, la station Bougival est tombée en panne suite à une avarie matérielle au niveau du système régulateur/panneau solaire. Il a ainsi été décidé de passer la station au 220V et de rajouter en plus une batterie de secours (Cf. Figure 3). Aucun enregistrement n'a pu être réalisé pendant cette période.

En revanche, depuis les modifications de notre réseau par une migration des données vers le serveur OVH et la création d'une adresse Orange de secours, nous sommes depuis le 20 décembre 2013 dans un système parfaitement nominal puisque 99,6 % des 96 mesures théoriques journalières par paramètres physico-chimiques et biologiques nous sont envoyées sur le premier trimestre.

Tableau 2 : Taux de couverture du capteur Smatch

Taux de couverture Smatch % (référence)	2010	2011	2012	2013	2014
pk 673 Suresnes (06/06/2012) (1)			86.7	70.9	99.7
pk 705 Bougival (01/07/2010) (1)	77.2	88.4	83,1	52.3	99.6
pk 729 Andrésy (11/05/2012 - 01/04/2013) (1)			90	(2)	(2)

(1) dates de mise en eau de la station

(2) Station hors service suite à l'endommagement de la station par une barge de la société VNF

3. Simulation de la croissance algale sur l'année 2011

3.1. Chronique haute fréquence de chlorophylle a mesurée à Bougival

La série de mesures haute fréquence de chlorophylle *a* à Bougival, qui a été qualifiée pour les années 2011 et 2012 selon les procédures décrites par Escoffier *et al.* (2014, soumis à Journal of Plankton Research), présente une forte variabilité *via* les quatre blooms de mars, mai et juillet 2011 et de mars 2012. Ce jeu de données est donc pertinent pour tester la simulation des dynamiques algales avec le modèle ProSe (Even, 1995 ; Even *et al*, 1998). Pour les deux années étudiées, les principaux blooms surviennent au mois de mars, lorsque la température de l'eau est proche de 10°C. Ces blooms sont associés à des pics de production d'oxygène dissous, dont les concentrations peuvent atteindre plus de 130% de la concentration à saturation, et dont la dynamique illustre une augmentation des fluctuations nycthémérales. Les mesures de la sonde BBE (FPII) indiquent que les principales familles phytoplanctoniques présentes dans le milieu sont les diatomées et les chlorophycées. Les chlorophycées sont toutefois présentes à des concentrations négligeables par rapport aux concentrations en chlorophylle *a* totale.

Au début des travaux du PIREN-Seine, ces deux familles d'algues étaient déjà identifiées comme dominantes dans le milieu. Garnier *et al.* (1995, 1998) ont dénombré environ 200 espèces de phytoplancton dans la Seine, dont 90 appartenaient aux diatomées et 60 aux chlorophycées. Les diatomées centriques (*Stephanodiscus hantzschii*) ainsi que *Stephanodiscus tenuis*, *Aulacoceira ambigua* et *Aulacoceira granulata* dominaient dans le milieu au printemps, parfois accompagnées de diatomées pennées (*Fragilaria ulna*, *Diatoma tenue*).

Des prélèvements manuels d'échantillons au niveau de la station de Bougival ont permis de réaliser des mesures de biovolume des différentes espèces constitutives des blooms, afin de compléter les données fournies par la sonde BBE. Les deux blooms de mars 2011 et 2012 sont dominés par les espèces de diatomées *Synedra Ulna*, *Cyclotella sp.* et *Nitzschia sp.*, tandis que le bloom estival de juillet 2011 est constitué principalement de *Cyclotella sp*. Enfin le bloom de mai 2011 est constitué de dinoflagellées (*Peridinium sp.*), qui sur la base de leurs propriétés spectrales de fluorescence, ne peuvent pas être différenciées des diatomées par la sonde BBE (Catherine et al, 2012). Même si les diatomées sont toujours prédominantes dans les blooms observés en Seine, les espèces constitutives des blooms ont évolué ; la question se pose alors de la validité des caractéristiques physiologiques des diatomées identifiées dans les années 1990 pour représenter le fonctionnement des espèces actuelles. L'objectif de se travail est d'étudier cette question à l'aide du modèle ProSe.

3.2. Simulation des dynamiques algales avec ProSe

Dans le modèle ProSe, le comportement des producteurs primaires est représenté avec les formalismes du modèle AQUAPHY (Lancelot *et al.*, 1991). Les espèces phytoplanctoniques y sont représentées par trois constituants cellulaires : les macromolécules constitutives de la cellule (protéines), les produits de synthèse (précurseurs de la synthèse des protéines) et les produits de réserve. La production des produits de synthèse suit la relation de photosynthèse-irradiance de Platt *et al.* (1977). Ces produits de synthèse sont soit transformés en protéines lors de la croissance du phytoplancton, soit en produits de réserve. La croissance est limitée par les concentrations en NH_4^+, NO_3^-, phosphore réactif dissous et la quantité de produits de synthèse par rapport à la biomasse phytoplanctonique totale. La conversion entre biomasse et concentration en chlorophylle *a* est faite avec un ratio C/chl*a* = 0.035 mgC/µgchl*a* constant (Garnier *et al.*, 1998). Ce ratio est ici réduit de 30% pour traduire la plus grande efficacité de la méthode d'extraction au méthanol pour la mesure de la chlorophylle *a* par rapport à l'extraction à l'acétone (Papista *et al.*, 2002).

Les sections amont du domaine simulé sont situées à Ablon sur la Seine et Noisiel sur la Marne (Figure 6). Les concentrations en chlorophylle *a* à l'amont du domaine sont décrites par :

- une chronique haute fréquence (mesurée à Gournay) fournie par le SEDIF pour la Marne,
- des mesures hebdomadaires (à la station de Choisy) fournies par le SIAAP pour les périodes estivales, complétées par des mesures du Réseau de Contrôle et de Surveillance, pour la Seine.

La chronique amont en Seine, très peu dense, est interpolée linéairement. Les variations rapides de chlorophylle *a* risquent donc d'être lissées et certains pics peuvent ne pas être captés par la mesure. Un manque de données dans la chronique amont en Marne au mois de mars 2011 empêche de décrire le début du bloom avec précision.

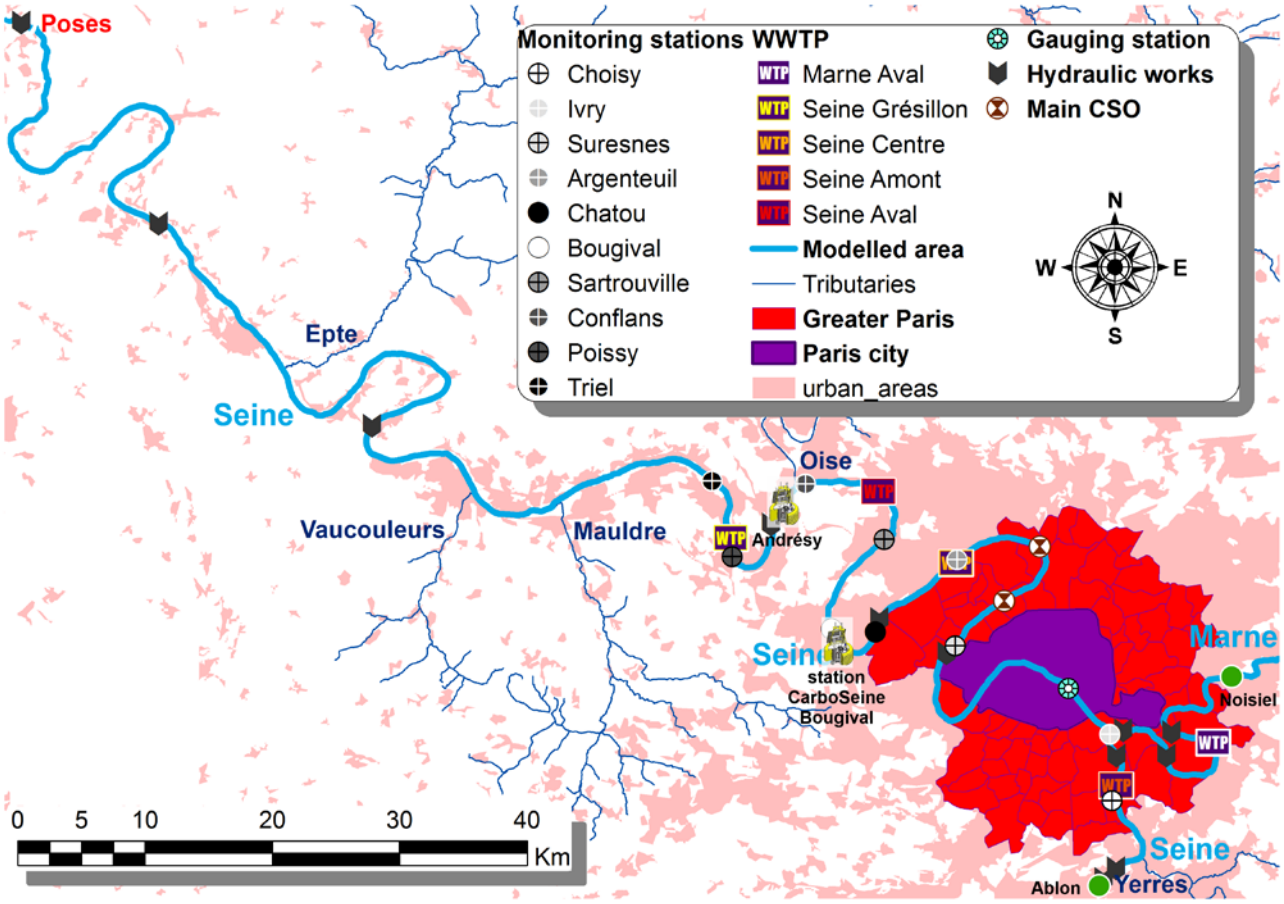

Figure 6 : Domaine simulé, localisation des conditions limite amont, des stations CarboSeine de Bougival et d'Andrésy, ainsi que des stations de mesure d'auto-surveillance du SIAAP et des principaux rejets anthropiques

La chlorophylle *a* amont est répartie entre les différentes familles d'algues simulées. Dans les études antérieures réalisées avec ProSe, elle était répartie à 50/50 entre la famille des diatomées et des chlorophycées. La paramétrisation utilisée pour ces deux familles d'espèces est celle de Garnier *et al.* (1995).

Deux premières simulations ont été réalisées avec cette paramétrisation : l'une avec une répartition de 50% de diatomées et 50% de chlorophycées et l'autre avec uniquement des diatomées (ce qui est plus cohérent avec les mesures de la sonde BBE, cf Figure 10). Les concentrations en chlorophylle *a* totale obtenues à la station de Bougival par ces deux simulations sont très peu différentes (Figure 7). Avec cette paramétrisation, le modèle surestime fortement les concentrations en chlorophylle *a* pendant la période estivale de 2011. La succession de deux pics de chlorophylle *a* d'environ 50 µgchl*a*L^{-1} pendant le bloom de mars 2011 est correctement simulée, malgré le manque de données amont pendant cette période. La croissance algale simulée devient extrêmement forte après l'évènement pluvieux qui marque la fin du bloom de mars 2011. Les concentrations en chlorophylle *a* sont ainsi surestimées d'un ordre de grandeur entre avril et juin 2011 et atteignent des concentrations allant jusqu'à 150 µgchl*a*L^{-1}. Le pic simulé au mois de juillet 2011 est synchrone avec le pic observé mais est 3 fois plus important. Enfin, le pic de chlorophylle *a* (d'environ 35 µgchl*a*L^{-1}) observé pendant le bloom de mars 2012 est correctement reproduit, aussi bien en termes de concentration qu'en termes de synchronisation des pics.

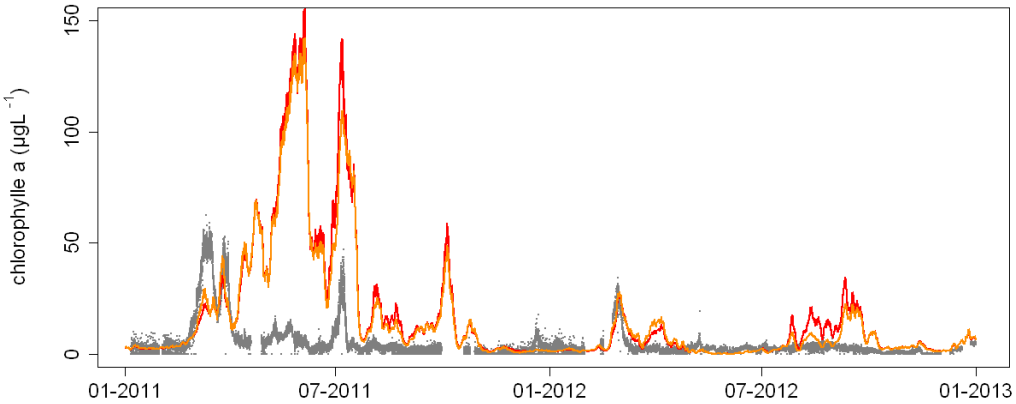

Figure 7 : Concentration en chlorophylle a observée (gris) et simulée à la station de Bougival, avec une répartition 50% de diatomées et 50% de chlorophycées en amont (rouge) et avec seulement des diatomées (orange)

3.3. Tests de nouvelles paramétrisations de ProSe

La croissance des diatomées semble surestimée par le modèle, surtout pendant les périodes estivales, où la température est plus élevée. Les blooms algaux de mars 2011 et 2012 surviennent tous les deux par des températures d'environ 10°C (Figure 8 a et b). Ceci laisse supposer que les communautés constitutives de ces blooms ont des températures optimales de croissance relativement faibles, ou du moins que les conditions propices à ces développements phytoplanctoniques (température, nutriments, lumière) soient réunies à ces périodes.

La croissance maximale du phytoplancton à un instant *t* est fonction de la température :

$$\mu_{\max}(t) = \mu_{\max,T_{\mathrm{opt}}} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{(T(t)-T_{\mathrm{opt}})^2}{\sigma^2}}$$

Des paramètres prospectifs ont été déterminés numériquement pour le cortège d'espèces constitutives des blooms de mars 2011 et 2012. La nouvelle paramétrisation permet de conserver les valeurs de taux de croissance pendant les blooms de mars 2011 et 2012, qui sont correctement simulés avec l'ancienne paramétrisation, et de réduire la croissance pendant la période estivale (Figure 8 c). La température optimale est réduite à 10°C, $\mu_{\max,T\mathrm{opt}}$ est fixé à 0.05 h^{-1} et le paramètre σ est passé de 13 à 8°C. Ces paramètres de température correspondent à la gamme des valeurs faibles rencontrées dans la littérature. Descy *et al.* (2012) utilisent par exemple dans le modèle POTOMAN une température optimale de 11°C et un σ de 8°C pour l'espèce de diatomées *Stephanodiscus hantzschii*. Avec ces nouveaux paramètres, le taux de croissance est maximal pendant la fin de l'hiver et le début du printemps, alors que pour les espèces observées en Seine dans les années 1990, le taux de croissance était maximal plus tardivement dans l'année, en période plus chaude.

Ce premier test permet de correctement simuler les deux blooms de mars 2011 et 2012 et de réduire la surestimation des concentrations en chlorophylle *a* à Bougival pendant la période estivale de 2011 (Figure 9, ligne bleue). La RMSE (racine de l'écart quadratique moyen) est réduite de 14.3 pour la simulation avec diatomées seules avec l'ancienne paramétrisation à 9.4 µgchl*a*L^{-1} pour la simulation avec les nouveaux paramètres prospectifs. Des pics de concentration qui ne sont pas observés sont cependant encore simulés en avril et mai 2011. Ces deux pics sont présents dans les conditions limite amont et aucun facteur extérieur ne justifie d'une augmentation de la mortalité pendant le transit jusqu'à la station de Bougival.

Cependant, d'après les mesures de biovolume effectuées via quelques prélèvements parallèles ponctuels, le pic de mai 2011 semble quasiment totalement constitué de dinoflagellées. A ces dates, les dinoflagellés se révèlent enkystées à l'examen microscopique. Enfin, le pic de juillet 2011 n'est plus simulé. Les espèces constitutives de ce bloom de diatomées sont différentes des deux blooms de mars, il est donc normal que des paramètres physiologiques ajustés pour simuler le fonctionnement des communautés des blooms de mars

2011 et 2012 ne permettent pas d'expliquer le bloom de juillet 2011. Ceci souligne la nécessité d'aller au-delà d'une répartition en familles et de décrire les espèces ou assemblages d'espèces, qui peuvent avoir des paramètres physiologiques très variables.

Un second test consistant à introduire dans le modèle la famille des dinoflagellées a été réalisé. La chlorophylle *a* amont est répartie entre les familles des diatomées et des dinoflagellées en fonction des proportions de biovolume mesurées en laboratoire. Les dinoflagellées observées dans le milieu étant enkystées, la croissance simulée dans le modèle pour cette famille est nulle. Ce second test permet de simuler correctement le bloom de mai 2011 à Bougival (Figure 9, ligne noire). La RMSE pour la période 2011-2012 est réduite à 6.4 µgchl*a*L^{-1}. Ces résultats montrent que la différentiation entre les espèces constitutives de chacun des blooms permet de simuler correctement l'enchaînement de ces différents épisodes de développements phytoplanctoniques.

Sur la base de ces premiers résultats numériques, il semble urgent de mener prochainement des expériences de croissance et de mortalité en laboratoire sur les espèces constitutives des blooms observés afin de pouvoir mettre à jour la paramétrisation des modèles de simulation de la qualité de l'eau du PIREN Seine.

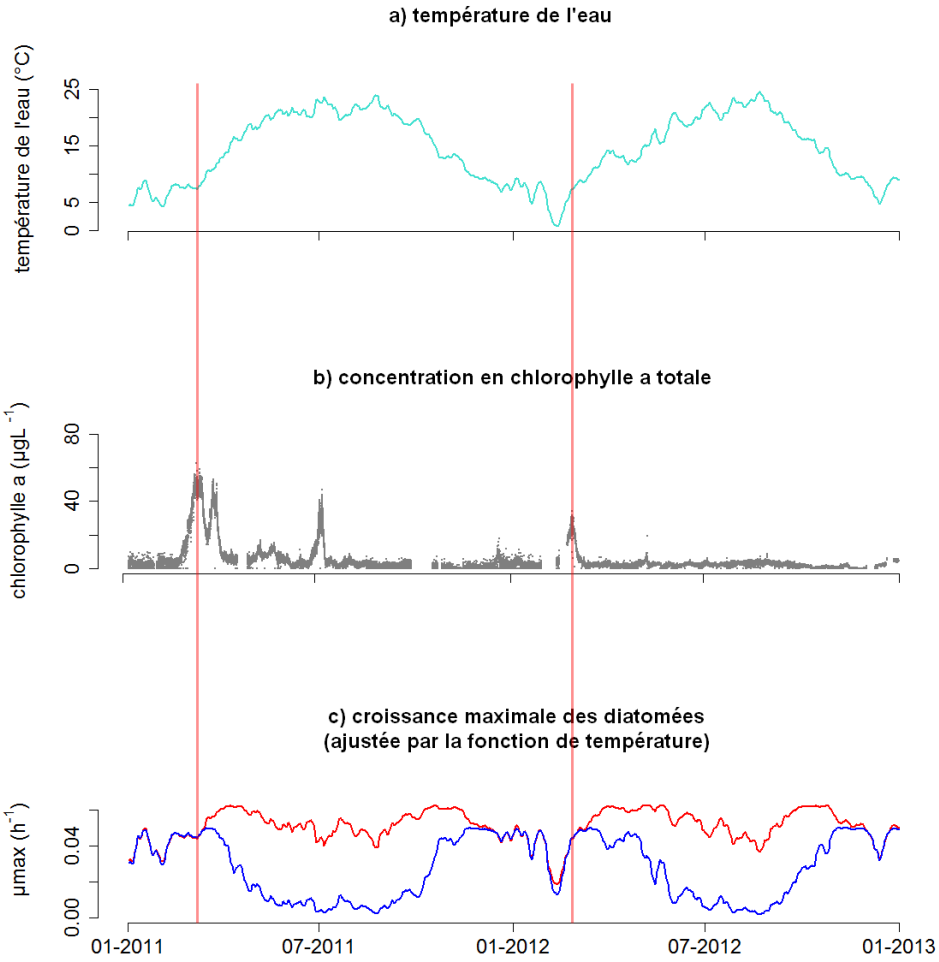

Figure 8 : a) Température de l'eau, b) chlorophylle a observée à Bougival, c) taux de croissance maximal des diatomées observées dans les années 1990 (rouge) et avec les paramètres des nouvelles espèces, estimés numériquement (bleu)

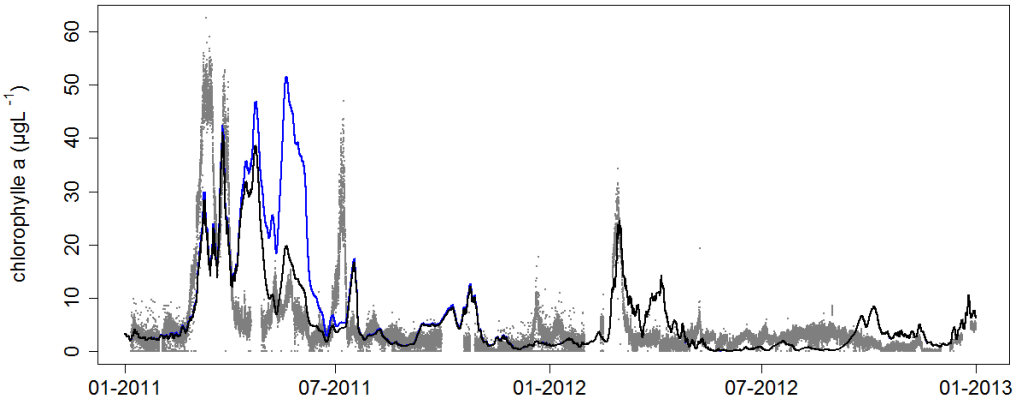

Figure 9 : Concentration en chlorophylle a observée (gris) et simulée à la station de Bougival, avec les paramètres de croissance prospectifs pour les diatomées, avec des diatomées seules (bleu) et avec l'introduction de dinoflagellées dans le modèle (noir)

3.4. Pistes d'amélioration de simulation de la dynamique algale

Les formalismes utilisés dans ProSe pour simuler les dynamiques phytoplanctoniques permettent de reproduire les successions de blooms pour les deux années d'étude 2011-2012.

Ces premiers tests de simulation de la chronique de chlorophylle *a* haute fréquence à la station de Bougival montrent tout d'abord l'importance d'une bonne description de la condition limite amont. Une mauvaise estimation de la condition limite amont peut se répercuter sur les concentrations simulées tout au long du domaine. De plus, pour correctement simuler l'évolution des communautés phytoplanctoniques pendant leur transit vers l'aval, la mesure à pas de temps fin des concentrations en chlorophylle *a* à l'amont doit être couplée à des manipulations permettant de déterminer les espèces ou cortèges d'espèces constitutives de chacun des blooms, ou du moins d'établir une typologie des successions algales plus fine que celle adoptée jusqu'ici, sur la base d'une meilleure connaissance de ces successions (Descy *et al.*, 2012). La mesure haute fréquence proposée par CarboSeine, a minima couplée à des reconnaissances d'espèces, devrait permettre, en quelques années, d'atteindre cet objectif. Il conviendra aussi de valider expérimentalement les valeurs des paramètres physiologiques de ces espèces ou cortèges d'espèces constitutifs, pour le moment estimé numériquement à l'aide de ProSe sur les cas particuliers des années 2011 et 2012.

4. Métabolisme de la Seine en 2011

4.1. Indicateurs du métabolisme et méthode de calcul

La méthodologie retenue pour l'estimation du métabolisme communautaire correspond à la 'open-channel single station approach' initialement développée par Odum (1956) à partir des courbes de variations journalières d'oxygène dissous. La méthodologie a été affinée depuis, notamment de par les avancées réalisées en termes d'instrumentation et de mesures *in situ* haute fréquence, et les traitements réalisés suivent les spécifications préconisées dans la littérature récente (Staehr et al., 2010 ; Needoba et al., 2012).

L'équation bilan des variations d'oxygène dissous sur un bief de rivière peut s'écrire sous la forme simplifiée suivante:

$$\frac{d[O_2]}{dt} = GPP_{(t)} + K([O_2]_{sat} - [O_2]) + ER_{(t)} \pm Adv$$

Équation 1

On désigne par « Gross Primary Production » (GPP) la production brute communautaire d'oxygène dissous supportée par la composante autotrophe du système. La Respiration communautaire, notée ER par la suite pour « Ecosystem Respiration », correspond cette fois aux processus combinés de Respiration des composantes autotrophes et hétérotrophes de l'écosystème et elle est de signe négatif par convention. Cette grandeur n'est pas discriminante des contributions relatives pélagiques ou benthiques et l'influence de la Demande Benthique (DB) y est ainsi intégrée.

Le terme *Adv* de l'équation (1) correspond aux phénomènes d'Advection qui ne seront pas pris en compte dans un premier temps. Nous posons ainsi l'hypothèse d'un régime stationnaire, hypothèse potentiellement fausse *a priori* pour des temps longs (plusieurs jours), mais plus robuste pour les échelles de temps horaires et journalières considérées.

La correction des échanges diffusifs entre la masse d'eau et l'atmosphère est nécessaire dans la paramétrisation des calculs (Hornberger & Kelly, 1975 ; Aristegi &al., 2009). Les flux d'échanges d'oxygène entre eau et atmosphère sont décrits dans l'équation 1 par le terme :

$$K([O_2]_{sat(t)}-[O_2]_{(t)}) \qquad \textbf{Equation 2}$$

K correspond au coefficient de ré-aération exprimé en h^{-1}, $[O_2]_{sat}$ est la concentration en oxygène dissous à saturation à un instant t (fonction de la température de l'eau, de la salinité et pression barométrique) et $[O_2]_{(t)}$, la concentration en oxygène dissous à un instant t. Toute la difficulté de cette correction réside dans la définition du coefficient K. Ceci a été réalisé selon l'algorithme utilisé dans le modèle ProSe à partir des données de vitesses de vent et d'écoulement en m s^{-1} (Thibodeaux & al., 1994). Les vitesses de courant sont calculées à partir des débits enregistrés en continu (10 min) à la station d'Austerlitz.

L'équation 1 est donc appliquée aux courbes de variations d'oxygène dissous enregistrées au pas de temps 15 min afin de définir les taux métaboliques instantanés.

Les taux de variations instantanés d'oxygène dissous, corrigés des flux d'échange avec l'atmosphère, définissent les taux de production nets instantanés, notés NEP_{light} ou NEP_{dark} selon qu'ils sont respectivement considérées pendant la période éclairée ou la nuit.

La respiration communautaire instantanée $ER_{(t)}$ est définie comme la moyenne des NEP_{dark} la nuit suivant la photopériode du jour considéré. ER(t) est supposée constante à l'échelle de la journée et son intégration sur 24h définit la valeur d'ER journalière.

Durant la photopériode, la GPP correspond à l'intégration des NEP_{light} corrigés à chaque instant des taux d'ER_{light}, soit l'intégration de leur différence à chaque instant.

Enfin, la production nette communautaire, ou Net Ecosystem Metabolism (NEM) correspond au bilan journalier de différence entre ces deux derniers processus que l'on peut écrire sous la forme :

$$NEM = GPP + ER \qquad \textbf{Equation 3}$$

Les résultats de métabolisme communautaire sont présentés par unités de volume (gO_2 m^{-3} j^{-1}) et non de surface (g $O_2.m^{-2}.j^{-1}$) tel que fréquemment reportés dans la littérature. Ce changement d'échelle peut se réaliser simplement en multipliant les grandeurs obtenues par la profondeur moyenne. Mais pour plus de rigueur, il apparaît important au préalable de mieux définir l'influence de la variabilité de profondeur euphotique sur la colonne d'eau et sa résultante sur l'extrapolation de la GPP.

4.2. Variabilité du métabolisme à l'échelle journalière

L'année 2011 représente un cas idéal pour l'étude du métabolisme de la Seine. Trois efflorescences marquées ont été observées en mars, mai et juillet. Ces développements rapides de biomasse phytoplanctonique (exprimée en µg.L-1 Chl*a*) sont systématiquement associés à une augmentation de la concentration en oxygène dissous qui dépasse la concentration à saturation (Fig. 4).

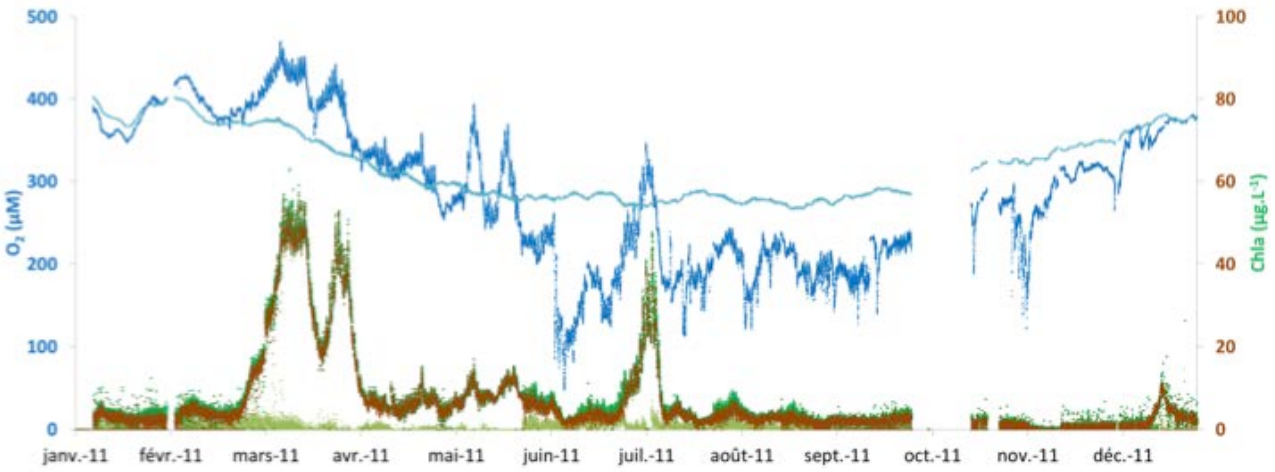

Figure 10: mesure à haute fréquence à Bougival de la biomasse algale (vert clair=chlorophycées, marron = diatomées, vert foncé = chlorophylle a totale) et de l'oxygène dissous (bleu foncé =concentration, bleu clair = concentration à saturation).

Sur l'ensemble des séries temporelles qualifiées disponibles pour 2011, les grandeurs descriptives du métabolisme de l'écosystème Seine ont été calculées sur 301 journées. Cela représente un taux de couverture brut annuel de 82,5% qui traduit un fonctionnement annuel de la station de mesure de Bougival parfaitement acceptable. Les périodes non couvertes correspondent à des pannes et à des opérations de maintenance de la station.

Parmi ces 301 estimations, 75 journées présentent des valeurs non valides, présentées en rouge dans la Figure 11. Les 2/3 de ces journées sont qualifiées d'aberrantes en raison d'estimations de GPP négatives et/ou d'ER positives ce qui est conceptuellement impossible. Ces valeurs artefactuelles peuvent être associées à une variabilité importante des paramètres hydrologiques (périodes de crues de début ou fin d'année) ou à des épisodes de pluies. Dans 1/3 des cas, nous supposons une mauvaise paramétrisation des flux d'échanges eau-atmosphère qui viendrait neutraliser la variation d'oxygène dissous liée au métabolisme. Ceci semble particulièrement critique lorsque les gradients sont faibles et que la concentration d'oxygène dissous fluctue autour de la saturation Le coefficient de réaération K est un paramètre sensible dans les calculs de métabolisme. La formulation utilisée actuellement (cf 4.1) doit être affinée. Une étude de sensibilité des variables utilisées pour le calcul de K devra être menée pour minimiser les sources d'incertitude, comme par exemple la vitesse du courant dans le bras gauche de bougival.

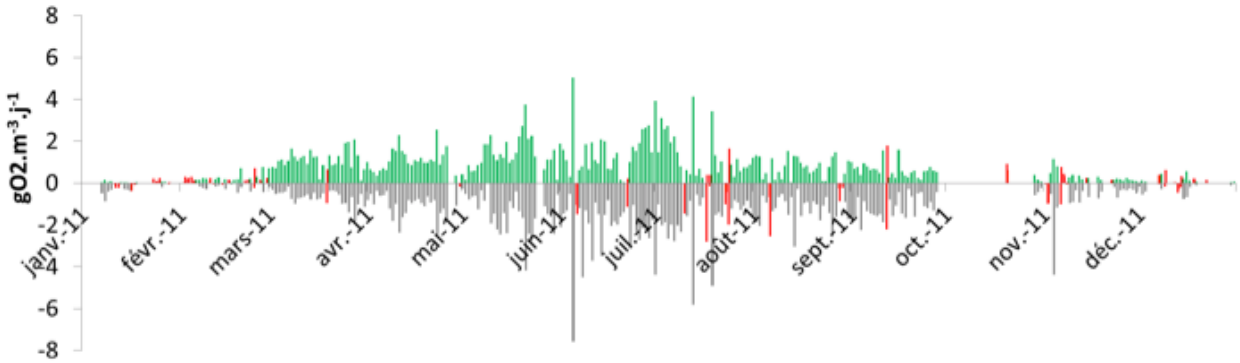

Figure 11: Gross Primary Production (GPP, en vert) et Ecosystem Respiration (ER, en gris) calculés à l'échelle journalière. Les valeurs colorées en rouge correspondent à des valeurs non valides.

Pour les 226 estimations valides du métabolisme dans la Seine à Bougival, les patterns d'évolution des grandeurs du métabolisme semblent suivre un rythme saisonnier marqué (Figure 124). Pour les mois d'hiver, les valeurs de GPP et ER sont très faibles. La concentration en oxygène dissous dans la seine est proche de la saturation, et la faible amplitude voire l'absence des oscillations journalières d'O_2 est à l'origine de ces résultats. Par ailleurs, les concentrations en Chl*a* dans la rivière sont également faibles car liées à des conditions de croissance de la biomasse non favorables (faible irradiance, turbidité plus élevée liée au régime hydrologique de crue).

A partir du mois de mars, l'intensité de la GPP et d'ER croît rapidement lors de l'efflorescence printanière de diatomées. Jusqu'au mois de juillet, les valeurs de GPP sont ainsi plus élevées que pendant le reste de l'année.

La qualification du fonctionnement autotrophe ou hétérotrophe de la rivière se caractérise à partir de la valeur de la NEM (Figure 6 b et c). Pour l'année 2011, l'autotrophie de l'écosystème Seine est associée uniquement aux périodes de blooms phytoplanctoniques.

Pendant le bloom du mois de mars, la rivière présente un métabolisme nettement autotrophe sur près de 4 semaines consécutives. Au cours de ce bloom, aucun évènement pluvieux n'intervient, et le régime hydrologique de la Seine subit une lente diminution de débit La variabilité journalière au cours de cette efflorescence reste néanmoins importante puisque la valeur de NEM peut augmenter ou diminuer d'un facteur 2 à 3 d'un jour à l'autre. Cette observation témoigne d'une dynamique très réactive des processus métaboliques dont les facteurs de contrôles restent à clarifier.

Deux autres périodes présentent un fonctionnement net autotrophe (NEM>0), correspondant aux efflorescences de mai (durée 3 semaines) et de juillet (durée 1 semaine). En mai, la variabilité de la NEM est très différente de celle observée pour le mois de mars. La Seine alterne deux courtes périodes de 3 à 4 jours en fonctionnement autotrophe, avec des périodes de durées égales de fonctionnement hétérotrophe. Les intensités des valeurs de NEM sont supérieures à celles de mars dans le sens de l'autotrophie et de l'hétérotrophie. Concernant le bloom de juillet, le fonctionnement trophique de la Seine est plus similaire à la période de mars, avec des intensités absolues comparables en autotrophie mais pendant une durée plus courte.

L'analyse de la série de données haute fréquence 2011 permet de fixer à 6 µg.L-1 la concentration seuil de Chl*a* au-delà de laquelle une efflorescence phytoplanctonique est susceptible de se produire.(cf rapport Piren Groleau et al 2011). Dans la figure 6c les valeurs de NEM correspondantes à ce critère sont repérées en vert. Cette illustration permet ainsi de visualiser les épisodes de forte respiration qui peuvent également intervenir lors du déclin des blooms. Ces épisodes peuvent ainsi résulter en un fonctionnement global hétérotrophe de l'écosystème malgré la présence d'une forte composante autotrophe. . Pendant ces périodes, ER est principalement associée à la composante autotrophe liée aux producteurs primaires.

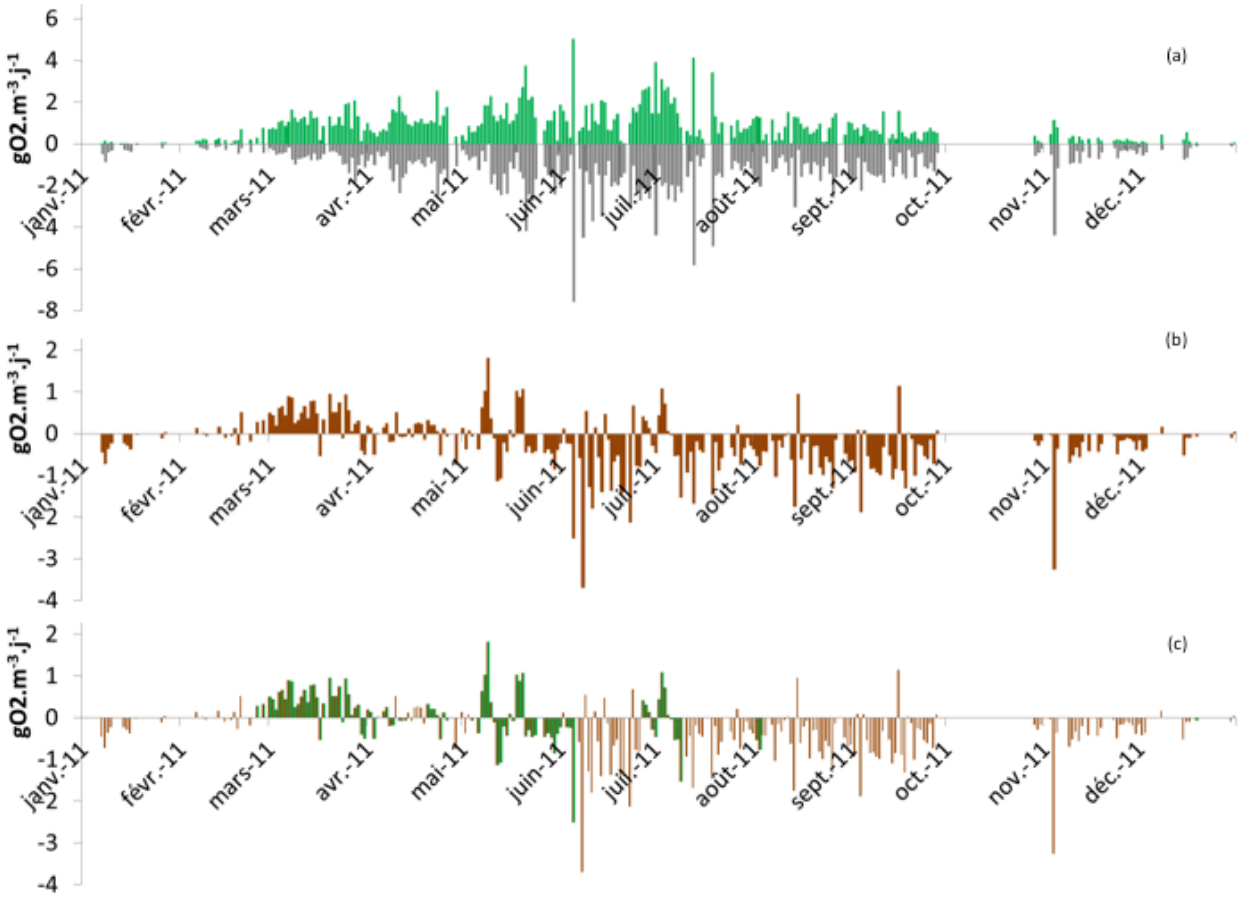

Figure 12: (a) GPP et ER valides, (b) Net Ecosystem Metabolism (NEM), (c) NEM identique à (b) avec code couleur indiquant les périodes de bloom (en vert)

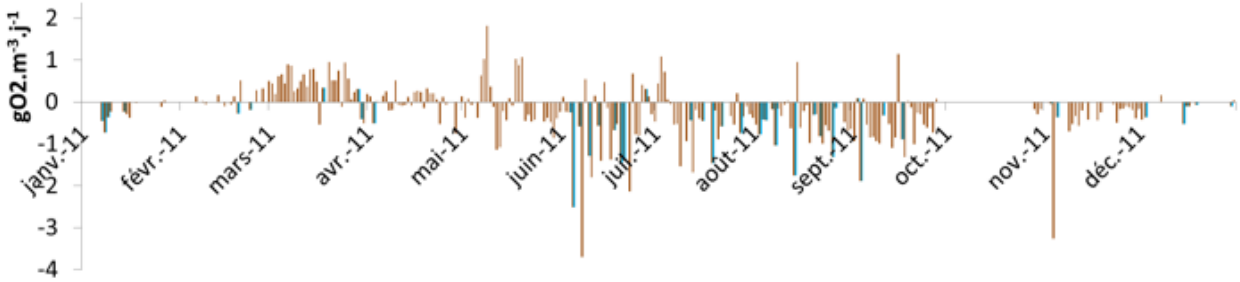

Figure 13: Net Ecosystem Metabolism (NEM) avec code couleur indiquant les journées de temps de pluie (en bleu)

Globalement, la Seine présente de plus longues périodes de fonctionnement hétérotrophe qu'autotrophe. En 2011, ceci est particulièrement vrai pour la seconde partie de l'année à partir du mois de Juin. Cette séparation apparente en deux modalités de fonctionnement trophique apparaît liée à un facteur de contrôle d'origine climatique. A partir de début juin, des épisodes pluvieux de plus ou moins grandes intensités vont se succéder très fréquemment (Figure 7). Ces épisodes pluvieux peuvent ainsi entrainer un écart à la saturation en oxygène assez prononcé (Figure 10) ainsi que des estimations de NEM très hétérotrophes. *Seule la période du bloom de juillet se démarque de ce fonctionnement trophique.*

Ces estimations mettent donc en évidence une nette amplification de l'hétérotrophie de l'écosystème en périodes de temps de pluie. Un épisode de temps de pluie tel qu'il est surligné (Figure 13) peut être constitué d'une pluie suivie ou non de déversements au niveau des différents déversoirs d'orage situés à l'amont. Pour explorer plus avant les facteurs de contrôle de l'hétérotrophie pendant la période estivale, l'utilisation des

seules mesures haute fréquence et du modèle de calcul de métabolisme atteint ses limites. Il est nécessaire de pouvoir intégrer les épisodes de temps de pluie, tant en quantité de rejets qu'en qualité de rejets. Seul un couplage adéquat du modèle ProSe, renseigné avec des conditions limites de rejets de temps de pluie au bon pas de temps (horaire ou sub horaire) pourra permettre d'avancer sur cette question. De même, l'appréhension du métabolisme de l'écosystème par une approche amont-aval basée sur un couple de stations de mesures permettra de mieux comprendre l'influence temporelle et spatiale associées à ces évènements de rejets.

4.3. Bilan de fonctionnement trophique à l'échelle saisonnière

De manière à résumer le fonctionnement trophique de l'année 2011, des bilans mensuels ont été calculés à partir des indicateurs journaliers. Le découpage calendaire ne constitue pas une approche qui tient compte de la dynamique naturelle de l'écosystème, toutefois il permet un premier niveau de simplification à l'échelle temporelle (Figure 14). Certains facteurs de contrôle environnementaux sont en effet mieux contraints lorsqu'intégrés selon une dynamique d'évolution moyenne mensuelle voire saisonnière.

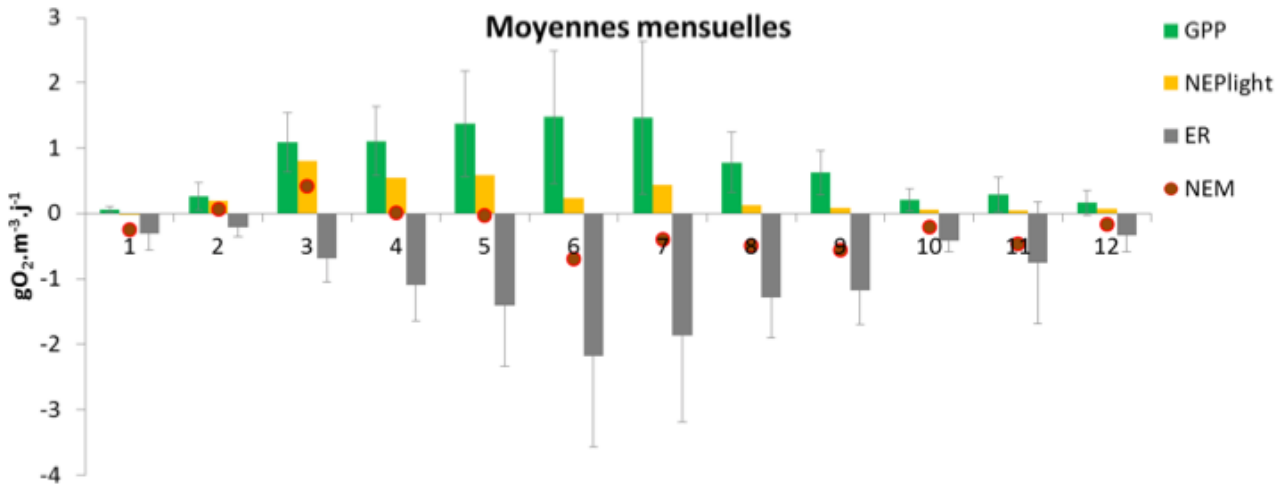

Figure 14: Moyenne journalières mensuelles (mois numérotés de 1 à 12) des indicateurs de métabolisme dans la Seine. Pour chaque valeur de GPP et de ER est figurée l'écart type mensuel.

A l'échelle annuelle, l'intensité moyenne des processus métaboliques semblent suivre une dynamique saisonnière vraisemblablement fonction des conditions d'ensoleillement et de température. Toutefois, les écarts types observés sur ces valeurs moyennes dénotent une plus forte variabilité journalière pendant les mois de Juin et Juillet.

A l'échelle mensuelle, l'écosystème fonctionne de manière autotrophe uniquement au mois de mars (NEM>0). Malgré des intensités de GPP importantes en avril et en mai, les valeurs moyennes de NEM sont nulles. A partir du mois de juin et jusqu'à la fin de l'année, l'hétérotrophie domine le métabolisme du fleuve même si les valeurs max de GPP sont observées durant cette période. La représentation de la NEP_{light}, qui correspond à la somme de la production brute et de la respiration sur la phase éclairée, apporte un renseignement supplémentaire. La valeur de NEP_{light} illustre à quel point la GPP compense ou non la respiration communautaire de l'écosystème (ER). En ce sens, de fortes valeurs de GPP ne signifient pas forcément un fonctionnement autotrophe de l'écosystème tel qu'observé au mois de Juin et Juillet Pour cette échelle de temps, l'un des facteurs de contrôle de l'autotrophie est donc avant tout lié à la résultante des processus physiques et biogéochimiques se déroulant pendant la phase éclairée.

L'une des perspectives de cette approche reste de définir les meilleures échelles d'intégration temporelle pour calculer les flux associés, en tenant compte des débits écoulés. Tous les calculs de NEM étant exprimés en $gO_2\ m^3\ j^{-1}$ la prochaine étape sera d'évaluer la variabilité de la NEM observée, par rapports aux différents facteurs de contrôle, d'origine anthropique et hydrologique, selon les échelles d'intégration pertinente. La NEM constituera alors un indicateur quantitatif robuste de la capacité de l'écosystème à métaboliser les différentes sources de carbone.

5. La simulation de l'oxygène dissous

5.1. Simulation du fonctionnement trophique du milieu

Le bloom de mars 2011 étant correctement simulé par le modèle ProSe en termes de biomasse phytoplanctonique, le métabolisme simulé lors de ce bloom est comparé au métabolisme calculé à partir des mesures *in situ* (Figure 15). Le métabolisme simulé est déduit des bilans de flux d'oxygène simulés sur un tronçon de 100 m encadrant la station de mesure de Bougival.

Le terme ER du bilan du fonctionnement trophique correspond à la somme de la respiration des producteurs primaires, de la respiration hétérotrophe dans le système et du pompage benthique. Les ordres de grandeur des flux journaliers de production primaire d'oxygène (GPP) et de respiration globale du système (ER) sont proches de ceux estimés sur la mesure par la méthode présentée dans la section précédente (cf par. 4.2). Le terme ER est cependant surestimé, notamment après l'évènement pluvieux en milieu de bloom (indiqué par la barre verticale sur la Figure 15). Le système simulé à Bougival est moins autotrophe que le système réel au point de mesure. Il devient même hétérotrophe après l'évènement pluvieux de mi-mars 2011, ce qui n'est pas validé par les mesures.

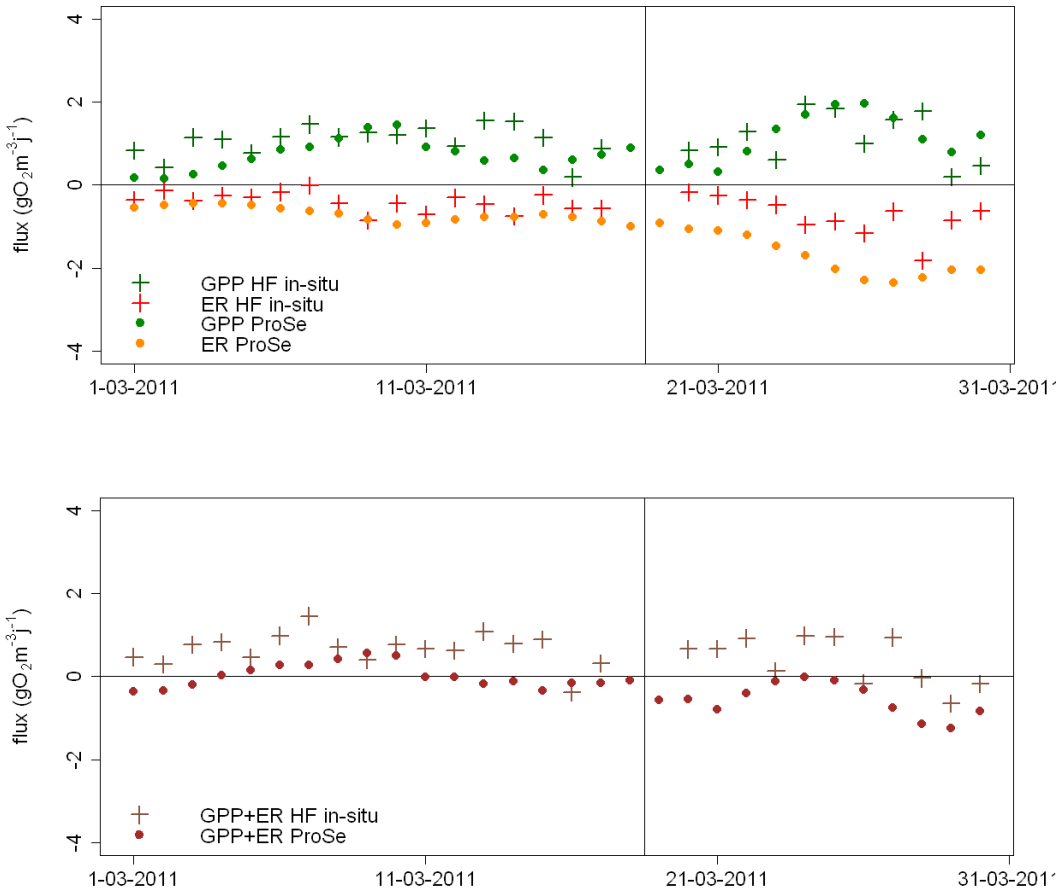

Figure 15 : Métabolisme estimé avec les mesures in-situ (croix) et simulé (points) pendant le bloom de mars 2011

Cette différence entre fonctionnements trophique observé et simulé peut être liée à une mauvaise simulation des processus hydro-sédimentaires dans le bras de Bougival. Le débit à Bougival est effectivement régulé par deux barrages (l'un sur le bras gauche, à Bougival, et l'autre sur le bras droit, à Chatou). Le fonctionnement de ces barrages n'est pas renseigné de manière précise dans le modèle, ce qui peut avoir un impact sur les débits et flux sédimentaires simulés. Parmi les 10 stations d'auto-surveillance du SIAAP situées sur la Seine le long du domaine simulé, celles de Chatou et Bougival sont en effet celles où les variations de concentrations en matières en suspension (MES) simulées sont les plus éloignées des observations. Les concentrations en MES et leur variabilité sont correctement simulées tout au long de l'axe principal de la Seine, aux 8 autres stations d'auto-surveillance du SIAAP (Vilmin *et al.*, soumis a), ce qui confirme que l'écart entre les variabilités des concentrations en MES simulées et observées à Bougival est bien dû à une erreur dans la répartition des flux à la diffluence en amont de cette station.

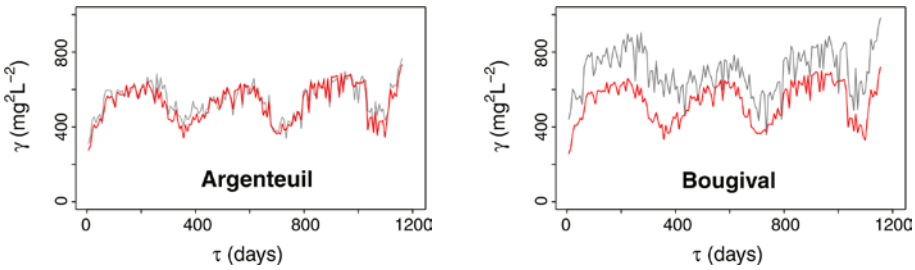

Figure 16 : Variogrammes des concentrations en MES mesurées aux stations de mesure d'auto-surveillance du SIAAP (gris) et simulées (rouge) à Argenteuil et Bougival

La comparaison des variogrammes des concentrations en MES aux stations d'Argenteuil (juste en amont de la diffluence du bras de Bougival) et de Bougival montre que la variabilité des concentrations de matières en suspension dans l'eau est moins bien simulée dans les bras secondaires que dans les tronçons uniques de Seine (Figure 16). Il est probable que l'accumulation de vase dans le bras de Bougival, dont l'épaisseur double au cours du bloom de mars 2011, soit surestimée par le modèle, entraînant une surestimation du pompage benthique et donc du terme ER du métabolisme.

5.2. Pistes d'amélioration pour la simulation de l'oxygène dissous

Ces résultats montrent l'importance d'une bonne simulation des processus physiques (hydrodynamiques et hydro-sédimentaires) pour simuler correctement le fonctionnement biogéochimique du système.

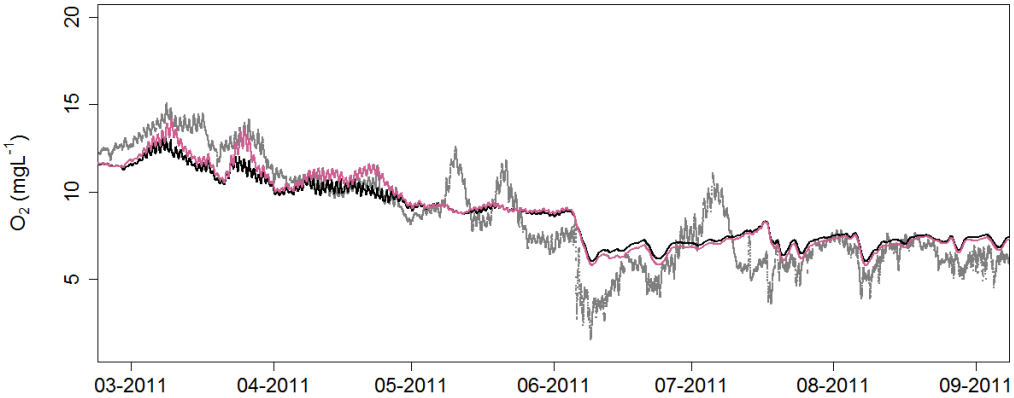

Figure 17 : Concentrations en oxygène dissous mesurées HF (en gris) et simulées pendant les blooms de mars et mai 2011, avec la paramétrisation prospective des espèces phytoplanctoniques, dégazage à 110% de la saturation (noir) et à 130% de la saturation (rose)

L'oxygène dissous est une variable intégrative de l'ensemble du fonctionnement biogéochimique du milieu. Plusieurs pistes d'amélioration, liées à la simulation de ces différents processus sont envisageables. Tout d'abord, la détermination des paramètres physiologiques des différentes espèces constitutives des blooms permettra d'améliorer l'estimation des flux de production primaire et des variations nycthémérales par le modèle. Ces fluctuations ne sont par exemple pour le moment pas reproduites pendant le bloom de dinoflagellées de mai 2011.

La paramétrisation des échanges aux interfaces, et notamment à l'interface eau-air, a également un impact fort sur les concentrations en oxygène dissous. Pour le moment, un processus de dégazage de l'oxygène dissous est simulé lorsque la concentration dépasse 110% de la saturation. L'augmentation de ce seuil à 130% permet par exemple de correctement reproduire les concentrations en oxygène dissous pendant le bloom de mars 2011 (Figure 17). Enfin, une description temporelle fine des rejets anthropiques, comme les

déversements d'orage, permettra de reproduire les chutes rapides de concentration en oxygène dissous dans le milieu à la suite d'évènements pluvieux.

6. La mesure à haute fréquence et la simulation du phosphore dissous

6.1. Instrumentation et métrologie

La sonde Cycle P de WetLabs (Figure 18) est un instrument *in-situ* capable de mesurer le phosphore dissous. Le principe est basé sur la mesure classique des orthophosphates par colorimétrie en application de la méthode de Murphy et Ryley en 1962 (Dubus, 1997).

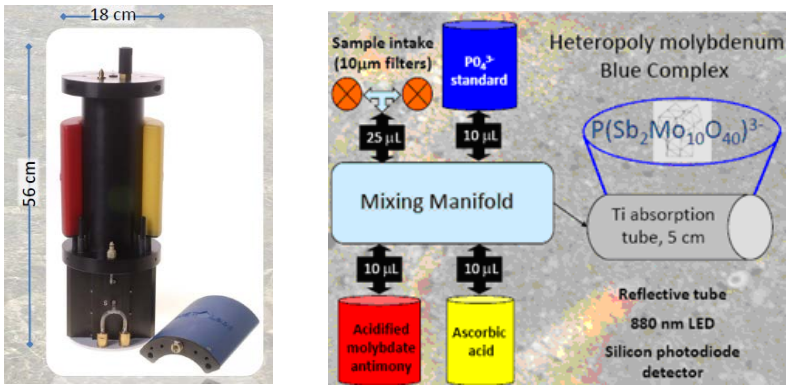

Figure 18 : Photographie et principe chimique simplifié de la sonde Cycle P (WetLabs)

L'eau du milieu naturel est filtrée à travers un filtre de type crépine cylindrique de 10 µm et introduite dans la cellule optique par l'intermédiaire d'une chambre de mélange via une micro-pompe. Les ions phosphates vont réagir avec le réactif de molybdate (et le standard PO_4^{3-} dans le cas du contrôle d'étalonnage) dans un milieu acide (acide sulfurique) pour former un complexe phosphomolybdique. Puis, il est réduit par l'acide ascorbique qui va lui donner une coloration bleu (bleu de phosphomolybdène). L'instrument est capable de déterminer la concentration en orthophosphates après avoir pris en compte un coefficient de calibration interne à la sonde. Il s'agit d'une mesure du signal de transmission optique du complexe coloré à 880 nm après l'avoir comparé au signal de transmission relevé dans l'eau ambiante (exprimé en nombre de « counts »). L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration en phosphates du milieu. Le Tableau 3 présente ces caractéristiques techniques.

Tableau 3 : Caractéristiques techniques de la sonde Cycle P (WetLabs)

Limite de détection (LD)	75 nmol/L = 0,0071 mg PO_4^{3-}/L
Précision	50 nmol/L = 0,0047 mg PO_4^{3-}/L
Gamme de mesure nominale	0-10 µmol/L = 0-0,95 mg PO_4^{3-}/L
Gamme de mesure maximum mais la linéarité n'est plus garantie	0-40 µmol = 0-3,7 mg PO_4^{3-}/L
Nombre d'analyses avec un jeu de réactifs	~ 1100
Fréquence d'analyse	40 min au minimum
Stabilité des réactifs	3 mois à 18 °C
Fréquence de nettoyage	Mensuelle

Un des deux principaux problèmes rencontrés avec ce capteur est la diminution anormalement rapide de la transmission optique. D'après les nombreux échanges avec le constructeur, il semblerait que ce problème provient d'un dépôt du complexe de phosphate de bleu de molybdène ($P(Sb_2Mo_{10}O_{40})^{3-}$) sur la fenêtre optique au cours du temps. Le Cycle P a été programmé de sorte à avoir accès sous forme de fichier texte

aux détails de chaque cycle de mesure et en particulier aux valeurs du signal du détecteur. Ce signal est traduit en nombre de « counts » et nous permets de tracer et d'analyser un cycle de mesure pour s'assurer de la validité des données (Cf. Figure 19).

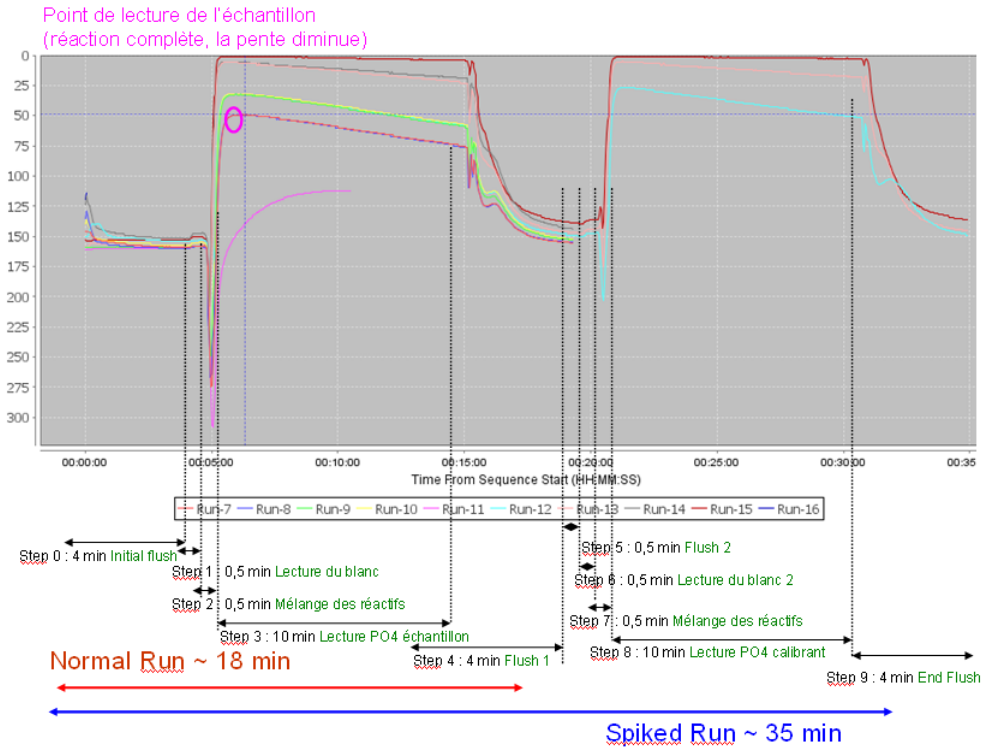

Figure 19 : Détails d'un cycle de mesure du capteur Cycle P (WetLabs). En ordonnée le nombre de counts.

Une des colonnes de ce fichier renseigne sur le nombre de counts pour l'eau ambiante « flush1 » (pas encore de réactifs ajoutés). Le Flush1 correspond à la mesure de la transmittance, utilisée pour déterminer l'absorbance due aux orthophosphates après la réaction chimique (Cf. Figure 20).

$$T = e^{-ab} \longrightarrow \frac{-\ln T}{b} = a = a^{*}C$$

$$A = -\log T = -\log\frac{\Phi}{\Phi_0} = \varepsilon b C \qquad a = 2.303\, A/b \qquad a^{*} = \varepsilon$$

$$A = -\log\frac{E_{SMPL} - E_{0\%T}}{E_{Ambient\sim 100\%T} - E_{0\%T}}$$

Figure 20 : Equation mathématique de l'absorbance (A) pour évaluer la concentration en orthophospahtes

Avec :

A : absorbance

a : coefficient d'absorption (m^{-1})

a* & e = absorption (m^{-1})

b = longeur d'onde (m ou cm)

T = transmittance (lumière sortante / lumière entrante)

E = signal de détection

ϕ = puissance rayonnée

C = concentration

Lorsque que le capteur est neuf, cette valeur est d'environ 3600 counts et va diminuer peu à peu en raison de la coloration par le complexe de la fenêtre optique. A titre de comparaison, un flush1 de 720 counts laisse passer seulement 20% de la lumière optique ce qui entraine une moins bonne résolution dans la détermination du phosphore soluble. Si le nombre de counts passe sous la barre des 100, il faut remettre en cause la validité des résultats. Il peut diminuer de manière plus rapide avec des valeurs concentrations en orthophosphates plus élevées, mais les valeurs mesurées en Seine sont dans la gamme de mesure du capteur (Cf. Tableau 3). Cependant, il a été remarqué que la transmission optique baisse très rapidement lorsque la turbidité en Seine augmente (Cf. Figure 21). En effet, la présence de particules dans l'eau impacte la transmission optique du blanc puisque la lecture de ce blanc se fait avec l'eau de Seine et non avec de l'eau ultra pure. Un exemple de ce type de phénomène est visible fin décembre 2013 (Figure 21). En l'espace de deux jours, la turbidité est passée de moins de 2-3 NTU à 120 NTU. Dans le même temps, la transmission optique des blancs du Cycle P chute de près de 50%. Une remonté de cette transmission optique était attendue lorsque la turbidité a de nouveau chutée, mais le nombre de counts est resté contant. Un dépôt de molybdate et/ou de particules allochtones s'est donc formé sur la fenêtre optique. Pour remédier à ce problème, le constructeur préconise d'effectuer des cycles de rinçages avec des solutions chimiques détergentes type micro90 ou Liqui-nox®. Ces deux produits contiennent tous deux de l'EDTA qui a un fort pouvoir complexant. Le résultat est efficace puisque le nombre de counts est revenu quasiment à son niveau d'origine après exécution de la procédure.

L'utilisation de ces tensio-actifs est effective depuis 2013, au préalable un rinçage à l'acide sulfurique concentré à 1% était réalisé.

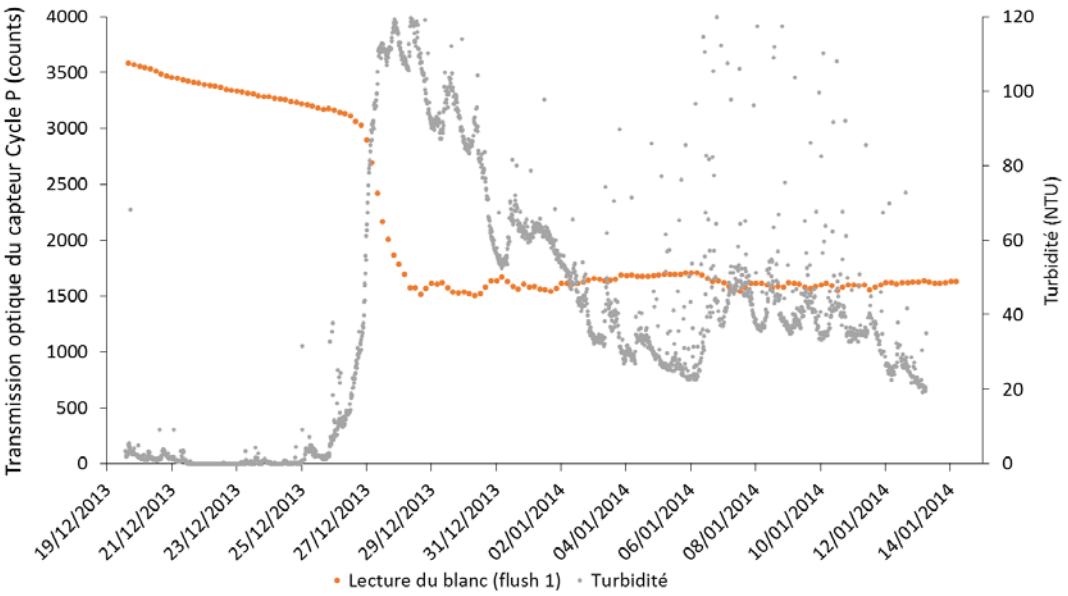

Figure 21 : Comparaison de la transmission optique pendant la mesure du blanc du cycle P (counts) avec la turbidité en Seine entre le 19/12/2013 et le 14/01/2014 à la station Bougival

En plus d'un contrôle minutieux au niveau de l'analyse du signal d'un cycle de mesure, la métrologie des capteurs cycle P est complétée par une comparaison avec les valeurs hebdomadaires de l'auto-surveillance du SIAAP. Cette comparaison n'a pas le statut de validation car les deux mesures ne sont pas effectuées au

même endroit, ni au même moment. Les prélèvements CarboSeine à Bougival se font sur le bras non navigable de la Seine et non sur le bras principal comme le fait l'auto-surveillance, qui est un peu plus en aval. L'heure de corrélation la plus probable entre la sonde et l'auto-surveillance pour cette étude est estimée à 8h00. Le cycle P réalise une mesure in situ sur eau filtrée à 10 µm, l'échantillon d'eau de l'auto-surveillance est filtré à 0,4 µm et analysé à la fois par la DDP et par le laboratoire IPL (Eurofins). Notre référence pour cette comparaison est le laboratoire de la DDP. Par la mise en place de cet outil de comparaison, la Figure 22 montrent que la sonde fonctionne correctement puisque les concentrations enregistrées suivent les tendances du réseau d'auto-surveillance.

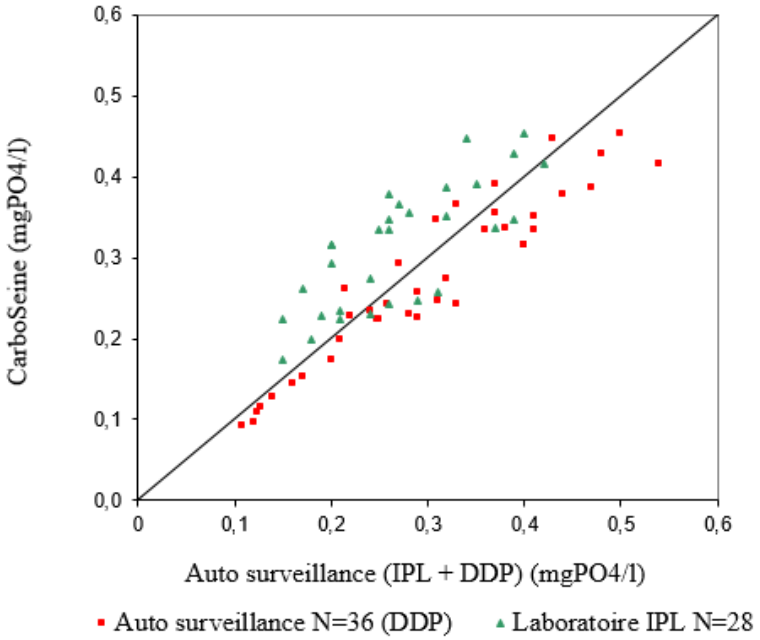

Figure 22 : Suivi des tendances de la sonde (Cycle P-116) avec le réseau d'auto-surveillance sur le long terme (30/05/2011 au 12/11/2012) sur Bougival

6.2. Série temporelle Bougival et Andrésy

Les séries temporelles de mesures à haute fréquence du phosphore dissous dans la Seine à Bougival sont affectées par de nombreuses périodes d'absence d'enregistrements. Celles si sont liés à trois types de facteurs.

En premier lieu la nouveauté de ce type de capteur, commercialisé en 2010, à entrainé des mise à jour matérielle et logicielle réalisée par le fabricant lui même. Ce type de procédure est usuel pour les nouvelles technologies de mesures.

Un second facteur tient à la prise en main opérationnelle et à l'optimisation du capteur dans l'écosystème Seine. Nous avons du adapter des procédures de maintenance, de contrôle de calibration, en éprouver ainsi l'endurance de l'instrumentation par rapport à nos propres capacités de supervision et de détection de défaillances (alimentation, épuisement des cartouches de réactifs, bouchage des crépines de prélèvement).

La troisième raison s'explique par les difficultés d'interfaçage du capteur avec l'automate de gestion ABIN. Lors des phases de test et d'endurance, associées à des défaillances logicielles de communication, l'immobilisation du capteur empêchait l'acquisition des mesures.

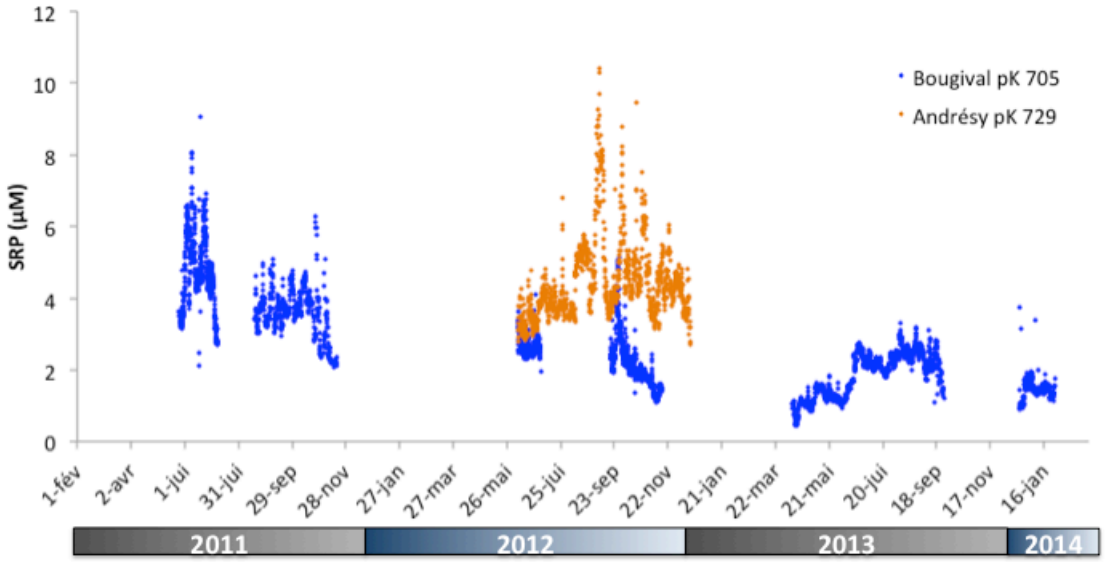

Figure 23: Mesures haute fréquence du phosphore réactif soluble à Bougival et Andrésy de 2011 à 2014

Le bilan des ces trois années d'acquisition est que le taux de couverture pour les mesures de phosphore est de 50% pour la station Bougival. Pour le cas d'Andrésy, le taux de couverture a été de 100% pendant la phase de test de 2012 qui a duré 6 mois.

La variabilité temporelle des concentrations de P dissous est très importante. Les concentrations peuvent varier d'un facteur 2 à 3 en moins de 48h. Ces observations déjà formulées préalablement (cf rapports Piren Groleau et al 2011, Groleau et al 2012) illustrent la nécessité de la haute fréquence pour décrire le fonctionnement de l'écosystème, tant sur le plan des processus que sur le plan du respect des normes de qualité environnementales imposées par la DCE.

Pour la période de 6 mois au cours de l'année 2012 pendant laquelle les mesures sont ininterrompues à Andrésy (Figure 24: Mesures à haute fréquence des concentrations en phosphore dissous à Andrésy (en marron) et Bougival (en bleu) de juin à décembre 2012Figure 24), l'analyse de la variabilité temporelle des concentrations en phosphore dissous révèle les observations suivantes :

La concentration dans la Seine ne descend jamais sous le seuil de 2,5 µM de P (0,24 mg PO_4/L)

A partir de la mi-août les concentrations en P dépassent régulièrement, pendant plusieurs journées consécutives la NQE fixée à 0,5 mg PO_4/L.

Trois augmentations significatives de concentrations au delà de la NQE sont enregistrées début septembre, fin septembre et fin octobre.

La valeur maximale de 10,4 µM (0,99 mg PO_4/L) enregistrée est atteinte le 5 septembre à 19h05.

L'absence de données à Bougival sur une majeure partie de cette période limite l'interprétation que l'on peut réaliser en matière d'origines de sources de ces variations. L'approche adaptée d'interprétation consiste à coupler ces mesures à haute fréquence avec le modèle ProSe.

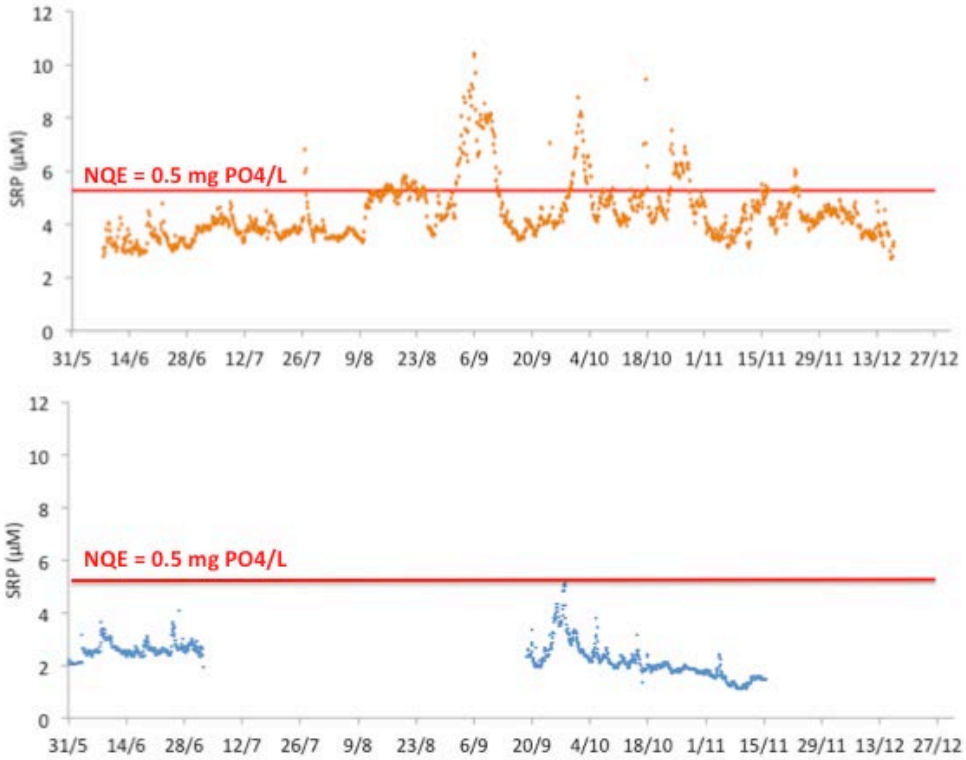

Figure 24: Mesures à haute fréquence des concentrations en phosphore dissous à Andrésy (en marron) et Bougival (en bleu) de juin à décembre 2012

6.3. Le couplage de l'analyse des données avec les simulations ProSe

Le phosphore réactif dissous (PRD) est simulé sur le même secteur que les dynamiques algales et l'oxygène dissous, depuis Ablon, sur la Seine et Noisiel sur la Marne (Figure 6). Les concentrations amont sont renseignées par les mesures journalières fournies par le SEDIF. Les résultats de simulation sont comparés aux mesures aux stations CarboSeine de Bougival et d'Andrésy.

Avec une description des conditions limite au pas de temps journalier, les formalismes utilisés dans ProSe permettent d'obtenir de bonnes performances sur la simulation des concentrations en PRD et de leur variabilité sur une grande extension spatiale et sur 6 ans, à un pas de temps hebdomadaire (Vilmin *et al.*, soumis b).

Avec cette même description des apports anthropiques au pas de temps journalier, le modèle permet de simuler les chroniques CarboSeine à pas de temps fin aux stations de Bougival (Figure 25) et d'Andrésy (Figure 26). Pour l'année 2012, les RMSE obtenues sur les concentrations en PRD simulées aux stations de Bougival et d'Andrésy sont respectivement de 0.023 mgP L^{-1} et 0.038 mgP L^{-1}. Les chroniques simulées et observées aux stations CarboSeine sur l'année 2012 sont fortement corrélées, avec des coefficients de corrélation de 0.85 pour la station de Bougival et de 0.61 pour celle d'Andrésy. La mesure haute fréquence permet également d'accéder à la variabilité à petites échelles de temps des concentrations. La comparaison des variogrammes des concentrations en PRD observées et simulées aux stations CarboSeine montre que la variabilité des concentrations en PRD, qui est correctement simulée le long de l'axe Paris-Poses pour des pas de temps hebdomadaires à pluri-annuels (Vilmin *et al.*, soumis b), est aussi bien reproduite à des pas de temps plus faibles (Figure 27).

Ceci montre que les processus contrôlant les concentrations en phosphore, comme l'adsorption, sont bien simulés par le modèle, même à des pas de temps fins. La loi d'adsorption utilisée dans le modèle est effectivement déterminée sur des expériences en laboratoire de 4 h et son implémentation dans le modèle à des échelles spatio-temporelles plus grandes permet de bien reproduire les interactions entre MES et PRD à pas de temps fin.

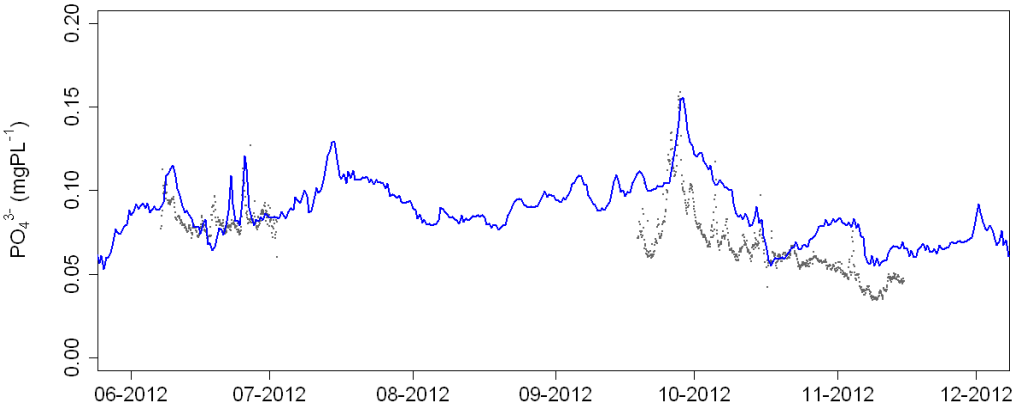

Figure 25 : Phosphore réactif dissous observé (gris) et simulé (bleu) à la station CarboSeine de Bougival

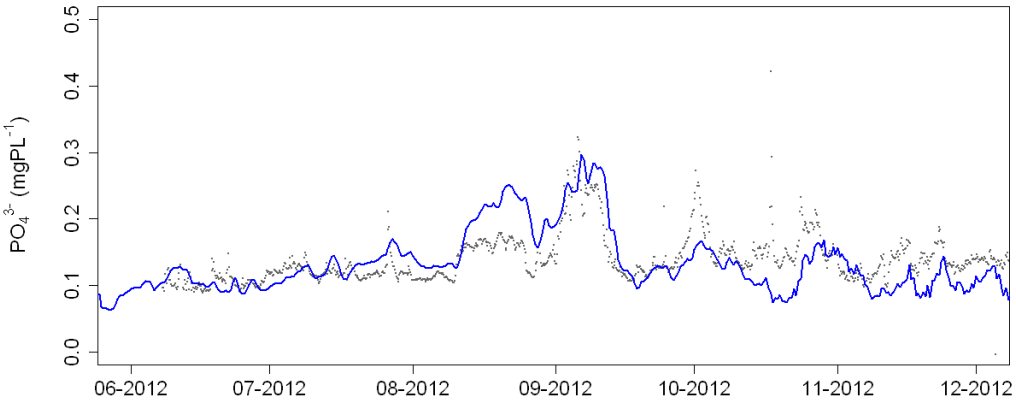

Figure 26 : phosphore réactif dissous observé (gris) et simulé (bleu) à la station CarboSeine d'Andrésy

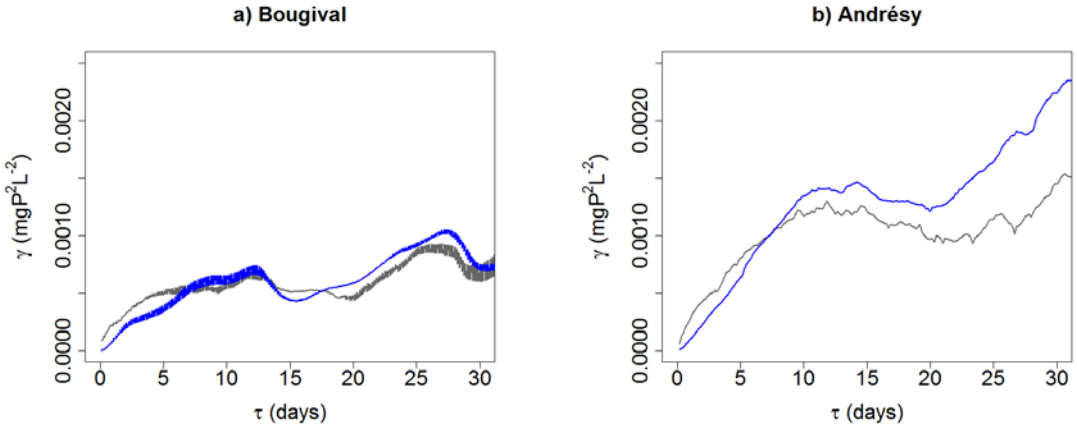

Figure 27 : Variogrammes des concentrations observées (gris) et simulées (bleu) a) à la station CarboSeine de Bougival et b) à la station CarboSeine d'Andrésy

En plus d'estimer les concentrations en espèces dissoutes ou particulaires dans le milieu, le modèle permet d'accéder à des informations qui sont difficilement accessibles par la mesure. Il permet par exemple de tracer l'origine des pics de concentration observés dans le milieu, de quantifier la part de chaque processus biogéochimique dans le contrôle de ces concentrations ou encore de quantifier les interactions entre les

différentes espèces biogéochimiques. Les différents flux biogéochimiques affectant les concentrations en PRD sur le domaine simulé (Paris-Poses) sont calculés pour la période 2011-2012 (Figure 28). Les flux abiotiques (diffusion à l'interface eau-sédiments et adsorption) de PRD dominent tout au long de la période simulée. Les flux calculés pendant les deux années 2011 et 2012 sont cependant très différents. Ceci est lié aux caractéristiques hydrologiques de cette période. L'année 2011 a connu une longue période sèche (Figure 29), de mai à décembre. Le flux de MES transporté par l'écoulement pendant cette période est faible et les flux abiotiques et biotiques (minéralisation et prélèvement par les producteurs primaires) sont du même ordre de grandeur. Au cours de l'année 2011, le flux de prélèvement du PRD par les producteurs primaires peut représenter en valeur absolue jusqu'à 1/3 du flux de PRD adsorbé sur les MES minérales et jusqu'à 55% du flux de PRD relargué par diffusion par la couche sédimentaire.

Un flux important de MES est transporté par l'écoulement pendant l'hiver 2011-2012, au cours duquel la quantité de sédiments accumulés dans le chenal double. Cette accumulation conduit à une augmentation des flux abiotiques d'un facteur 5. L'année 2012 ne connaissant pas de période sèche prolongée (Figure 29), des concentrations en MES importantes sont transportées tout au long de l'année et les flux abiotiques restent de ce fait fortement prédominants par rapports aux flux de minéralisation de la matière organique et de prélèvement par les producteurs primaires.

Ces résultats soulignent l'importance d'une bonne simulation des processus hydro-sédimentaires, qui peuvent avoir un fort impact sur les concentrations en espèces dissoutes comme le PRD. Dans la Seine, les concentrations en PRD sont le plus souvent principalement contrôlées par des flux abiotiques de diffusion et d'adsorption. Pendant les périodes où les concentrations en MES dans la colonne d'eau et l'accumulation de vase sont faibles, la production de PRD par minéralisation et son prélèvement par les algues peuvent devenir non négligeables. Pendant ces périodes, la bonne description de la constitution de la matière organique (notamment par le ratio C/P) et des paramètres physiologiques des espèces phytoplanctoniques a une importance primordiale pour bien simuler les dynamiques de PRD.

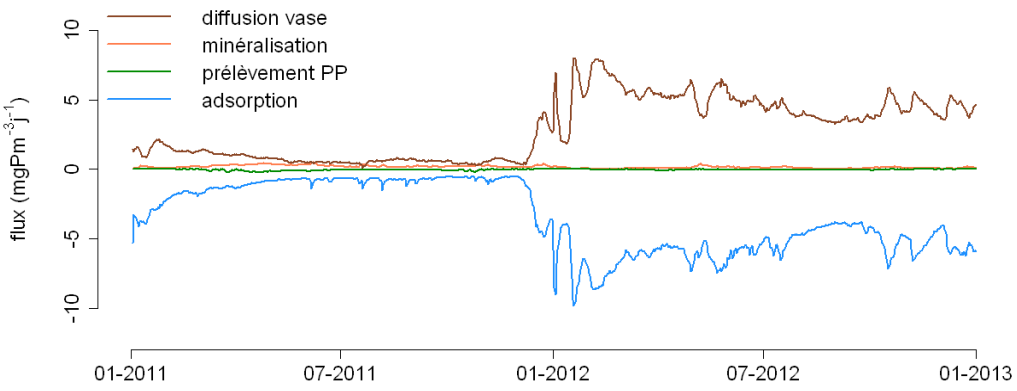

Figure 28 : Flux de PRD simulés avec le modèle ProSe

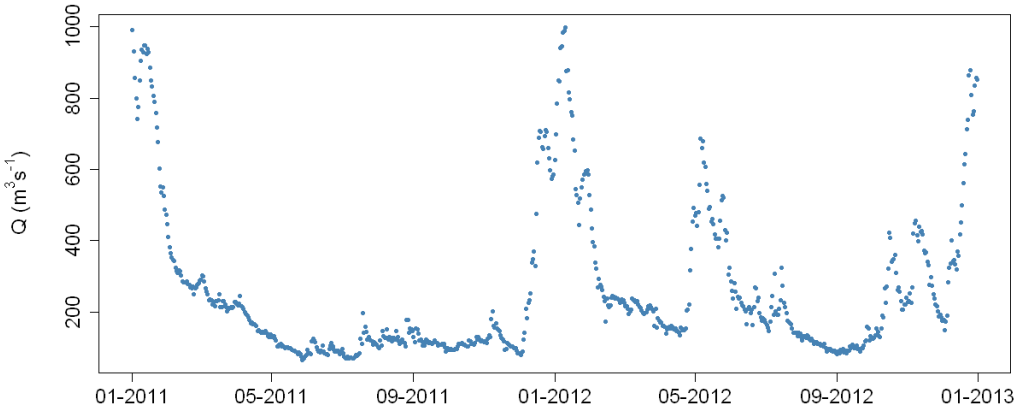

Figure 29 : Débits journaliers mesurés à la station de jaugeage de Paris Austerlitz pour la période 2011-2012

7. Conclusions et perspectives

Le réseau de mesures haute fréquence CarboSeine a fait la preuve de sa capacité opérationnelle. Son déploiement sur trois années s'achèvera en 2014 en maintenant l'effort de supervision et de maintenance indispensable à son fonctionnement. Depuis l'acquisition des mesures jusqu'à la bancarisation des données, l'amélioration de l'architecture de CarboSeine permet d'obtenir des taux de couverture moyen de 80%.

La méthodologie d'exploitation des séries temporelles haute fréquence utilisée pour calculer les indicateurs journaliers du métabolisme de l'écosystème a été affinée selon les préconisations récentes et constitue ainsi une approche robuste pour documenter le fonctionnement trophique de la Seine. Les résultats obtenus pour l'année 2011 démontrent et quantifient le fonctionnement autotrophe de l'écosystème en période d'efflorescences phytoplanctoniques. Sur une échelle annuelle, l'hétérotrophie domine ; résultat par ailleurs observé dans d'autres types d'écosystèmes aquatiques (Duarte et al., 2005). La variabilité inter journalière du fonctionnement trophique reste néanmoins forte. Une étude approfondie des facteurs de contrôle reste encore nécessaire, mais le métabolisme de l'écosystème s'avère très sensible aux périodes de temps de pluie dans le sens de l'hétérotrophie. De manière générale, l'étude des différences d'intensité entre NEPlight et ERlight en phase éclairée apparaît être une approche pertinente pour mieux contraindre la contribution relative de ces deux processus au sein de la GPP. Enfin la formulation du coefficient d'échange eau-atmosphère doit faire l'objet d'une analyse de sensibilité à ses différents paramètres, car en périodes d'équilibre de l'écosystème autour de la valeur de saturation, une juste détermination des flux eau-atmosphère devient un enjeu important.

La simulation de la croissance de la biomasse phytoplanctonique a fait l'objet d'avancées très significatives grâce à la synergie entre mesures haute fréquence et modélisation. L'amélioration des simulations de la chlorophylle-*a* dans ProSe est dû à la fois à une reparamétrisation prospective de certains facteurs de croissance en cohérence avec les observations, ainsi qu'à l'adaptation des conditions limites en fonction du cortège d'espèces phytoplanctoniques présent.

Les concentrations en phosphore réactif dissous sont également bien représentées grâce aux améliorations de la modélisation des processus de transport hydro sédimentaires. Les chroniques simulées et observées aux stations CarboSeine sur l'année 2012 présentent des coefficients de corrélation de 0.85 pour la station de Bougival et de 0.61 pour celle d'Andrésy. La mesure haute fréquence permet d'accéder à la variabilité à petites échelles de temps des concentrations. La variabilité des concentrations en PRD est correctement simulée le long de l'axe Paris-Poses pour des pas de temps hebdomadaires à pluri-annuels mais s'avère aussi bien reproduite à des pas de temps fins.

A court et moyen terme, ces stations de mesures ne pourront fournir les données robustes nécessaires au développement d'outils d'analyses et de représentation de l'écosystème Seine qu'à deux conditions : (1) disposer des ressources humaines suffisantes pour pérenniser le travail de supervision et de maintenance

entre l'IPGP et les équipes techniques du SIAAP (DDP Colombes) impliquées, (2) anticiper les modalités de gestion et d'entretien du matériel qui vont nécessiter des dépenses de fonctionnement.

La poursuite immédiate de ces travaux de recherche consiste à valoriser scientifiquement l'exploitation des mesures haute fréquence en utilisant conjointement l'outil de modélisation ProSe. L'analyse à pas de temps fin des processus implique non seulement une technologie et une fréquence de mesure adaptée, mais également un modèle mathématique de représentation des processus physiques et biogéochimiques. Une compréhension fine des facteurs de contrôle du fonctionnement trophique de la Seine impliquera nécessairement la contribution du modèle ProSe, L'amélioration de la paramétrisation et/ou de la représentation des processus au sein du modèle ProSe s'appuiera réciproquement sur les chroniques haute fréquence *in situ*. Cela implique que la résolution temporelle ainsi que la qualité des mesures des conditions limite soit en adéquation avec les échelles de simulation et de mesure.

8. Références

Aristegi L., Izagirre O., Elosegi A. 2009. Comparison of several methods to calculate reaeration in streams, and their effect on estimation of metabolism. Hydrobiologia, 635:113-124

Aristegi L., Izagirre O., Elosegi A. 2010. Metabolism of Basque stream measured with incubation chambers. Limnetica, 29(2):301-310.

Catherine, A., Escoffier, N., Belhocine, A., Nasri, A. B., Hamlaoui, S., Yepremian, C., Bernard, C., Troussellier, M. (2012) On the use of the FluoroProbe (R), a phytoplankton quantification method based on fluorescence excitation spectra for large-scale surveys of lakes and reservoirs. Water Res, 46, 1771–1784.

Descy, J.-P., Leitao, M., Everbecq, E., Smitz, J.S., Deliège, J.-F., 2012. Phytoplankton of the River Loire, France: a biodiversity and modelling study. Journal of Plankton Research 34(2), 120-135.

Escoffier N., Bernard C., Hamlaoui S., Groleau A., Arnaud C. (2014). Quantifying phytoplankton communities using spectral fluorescence: The effect of species composition and physiological state. soumis à Journal of Plankton Research – février 2014.

Integrating large river trophic functioning from real time sensors network measurements. (In Prep) Escoffier N., Bensoussan N., Metivier F., Rocher V., Bernard C., Arnaud D., Vilmin L., Flipo N., and Groleau A.

Even, S., 1995. Modélisation d'un écosystème fluvial : la Seine – le modèle ProSe. Thèse, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

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, 27-37.

Garnier, J., Billen, G., Coste, M., 1995. Seasonal succession of diatoms and chlorphycae in the drainage network of the river Seine: Observations and modelling. Limnol. Oceanogr. 40(4), 750-765

Garnier, J., Billen, G., Hanset, P., Testard, P., Coste, M., 1998. La Seine en son bassin. Fonctionnement d'un système fluvial anthropisé. Elsevier. Chap. Développement algal et eutrophisation dans le réseau hydrographique de la Seine, 593-626.

Groleau A., Escoffier N., Bensoussan N., Flipo N., Poulin M., Vilmin L., Bernard C., Rocher V., Métivier F. Biogéochimie Haute Résolution : Bilan méthodologique et présentation des observations pour l'année 2011. Rapport Piren Seine 2011.

Groleau A., Escoffier N., Bensoussan N., Flipo N., Poulin Mi., Vilmin L., Bernard C., Rocher V., Métivier F.Réseau de mesures haute fréquence Carboseine: validation métrologique et indicateurs du fonctionnement trophique. Rapport Piren Seine 2012

Hornberger G.M. and Kelly M.G. 1975. Atmospheric reareration in a river using productivity analysis. Journal of the Environmental Engineering Division ASCE 101: 729-739.

Lancelot, C., Veth, C., Mathot, S., 1991. Modelling ice-edge phytoplankton bloom in the Scotia-Weddell sea sector of the southern ocean during spring 1998. J. Mar. System 2, 333-346.

Needoba, J. A., Peterson, T. D., & Johnson, K. S. (2012). Method for the Quantification of Aquatic Primary Production and Net Ecosystem Metabolism Using In Situ Dissolved Oxygen Sensors. In S. M. Tiquia-Arashiro (Éd.), Molecular Biological Technologies for Ocean Sensing (p. 73‑101)

Odum H.T. 1956. Primary Production in Flowing waters. Limnology and Oceanography, 1: 795- 801.

Pápista, E., Ács, E., Böddi, B., 2002. Chlorophyll-alpha determination with ethanol – a critical test. Hydrobiologia 485(1-3), 191-198.

Platt, T., Denman, K., Jassby, A., 1977. The sea – Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas – Marine Modelling. Vol. 6. John Wiley and Sons. Chap. Modelling the productivity of phytoplankton, 807-856.

Staehr, P. A., Bade, D., Van de Bogert, M. C., Koch, G. R., Williamson, C., Hanson, P., … Kratz, T. (2010). Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science. Limnology and Oceanography: Methods, 8, 628–644.

Thibodeaux L., Poulin M., Even S. 1994. A model for enhanced aeration of streams by motor vessels with application to the Seine river. Journal of Hazardous Materials 37: 459-473

Vilmin, L., Flipo, N., de Fouquet, C., Poulin, M., soumis a. Pluri-annual sediment budget in an urbanized river system: the Seine River.

Vilmin, L., Aissa-Grouz, N., Garnier, J., Billen, G., Mouchel, J.-M., Poulin, M., Flipo, N., soumis b. Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River.