Biogéochimie Haute Résolution : Bilan méthodologique et présentation des observations pour l'année 2011

Groleau Alexis[1*], Escoffier Nicolas[1], Bensoussan Nathaniel[2], Flipo Nicolas[3], Poulin Michel[3], Vilmin Lauriane[3], Bernard Cécile[4], Rocher Vincent[5], Métivier François[6].

[1] Laboratoire de Géochimie des Eaux. Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, IPGP, UMR 7154, CNRS , F-75205 Paris, France.
[2] IPSO FACTO. Pôle Océanologie et Limnologie. 4, rue de Tilsit, F-13006 Marseille. www.ips-o.fr
[3]Centre de Géosciences. Systèmes Hydrologiques et Réservoirs. Mines ParisTech. 35, rue Saint-Honoré. 77305 Fontainebleau
[4] FRE3206, Muséum National d'Histoire Naturelle -CNRS
[5] SIAAP - Direction du Développement et de la Prospective. 82 avenue Kléber - 92700 - Colombes
[6] Laboratoire Dynamique des Fluides Géologiques. Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, IPGP, UMR 7154, CNRS , F-75205 Paris, France
[*]personne à contacter: Alexis Groleau: groleau@ipgp.fr

1 Introduction

1.1 Contexte général du bloc BHR et objectifs dans la phase 6

Dans le cadre général de BAF, Le bloc Biogéochimie Haute Résolution (BHR) vise à bénéficier de l'architecture et de l'investissement matériel du projet CARBOSEINE (Financement R2DS 2011-2013, http://carboseine.ipgp.fr/index.php), pour documenter les concentrations des éléments liés à la réactivité du carbone. Le bloc BHR s'intéresse au fonctionnement trophique et au métabolisme de la Seine.

Une attention particulière sera portée en 2012 et 2013 aux concentrations de CO_2 dans la rivière, ainsi qu'aux flux correspondant émis vers l'atmosphère. Dans un fleuve ou une rivière drainant un bassin versant carbonaté, nous avons établi dans la précédente phase qu'il était possible de relier pH de l'eau et pCO_2 (Groleau *et al*, 2008 ; Gelabert *et al*, 2009). L'origine du CO_2 est partagée entre une contribution géologique (équilibres de précipitation/dissolution des carbonates) et une composante biologique (photosynthèse respiration).

Les objectifs généraux du bloc BHR pour la phase 6 sont : (1) de quantifier le fonctionnement trophique de la Seine à partir des mesures haute fréquence de qualité de l'eau, (2) de construire des indicateurs du fonctionnement trophique, (3) d'estimer de manière robuste les flux de CO_2 à l'interface eau atmosphère dans la Seine sur son chenal principal à l'aval de Paris, en différentes stations, sur de longues périodes, à partir de mesures haute résolution ; d'associer ces flux aux processus qui les génèrent, et quantifier la contribution respective des processus géochimiques et biologiques.

Par ailleurs, en liaison avec les blocs MO, PHYTO, BIF également constitutifs de l'axe BAF : (4) d' identifier les grandeurs pertinentes vis à vis de questions sélectionnées, parmi les observables biogéochimiques mesurés en continu sur les stations Carboseine.

Le bloc BHR abordera ses différents objectifs avec une méthode commune : coupler les observations et mesures haute résolution, les cinétiques des processus, avec la modélisation ProSe (Figure 1).

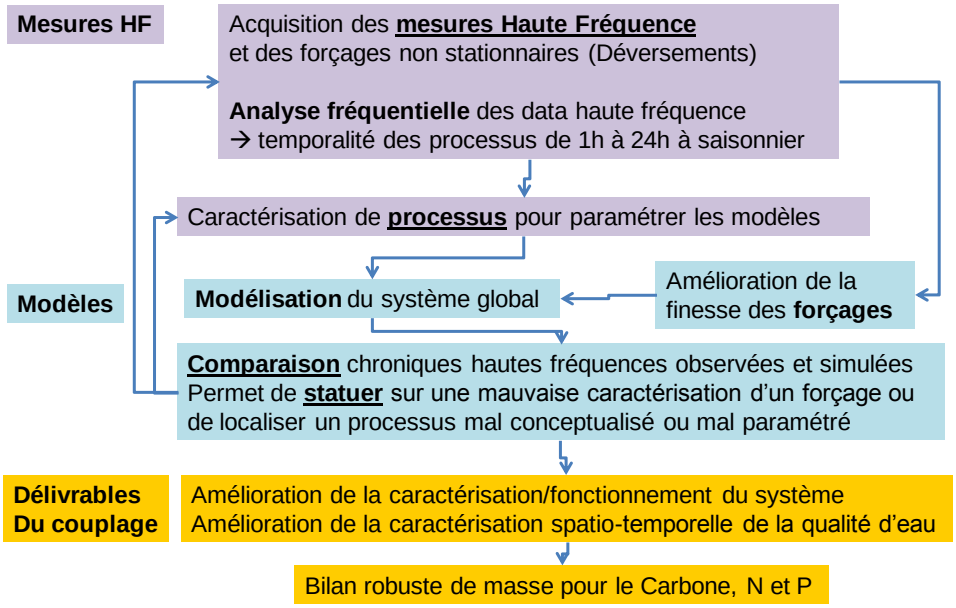


Figure 1: Méthodologie générale du bloc BHR

Le bief retenu s'étend sur 55 km depuis l'aval de Paris (Suresnes) jusqu'à la confluence Seine-Oise (Andrésy). Le temps de transfert de l'eau dans le bief et le fait qu'il traverse une zone très fortement anthropisée (présence de nombreux déversoir d'orage, des stations d'épuration de Seine Centre et Seine Aval) en font un site privilégié pour y étudier le devenir du carbone. La méthodologie de quantification de la vulnérabilité est basée sur un dispositif de mesure en continu et en temps réel de la qualité de l'eau. Les paramètres sélectionnés documentent le fonctionnement trophique du fleuve relatif aux transformations de différentes formes de carbone (organique et minéral). Nous élaborerons des descripteurs du fonctionnement trophique et de la vulnérabilité de l'écosystème sur la base de l'intégration des mesures. Ces descripteurs constitueront une information élaborée à différentes échelles de temps (de la journée à la saison), à destination des scientifiques et des opérateurs (Figure 2).

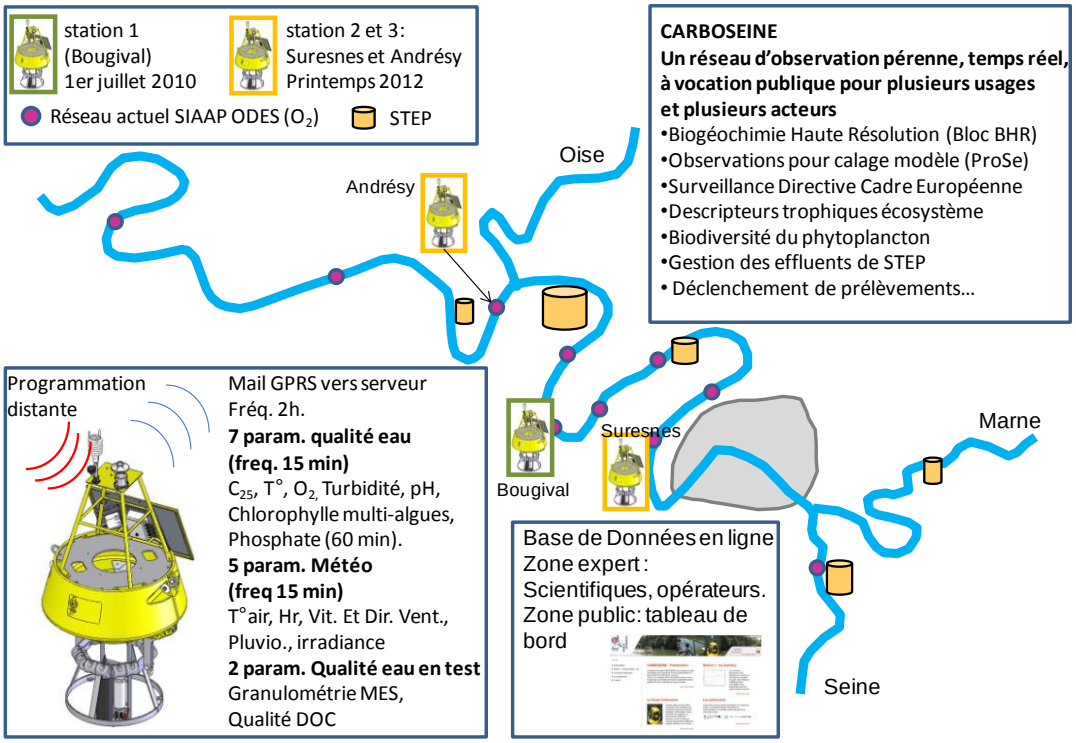


Figure 2 : Schéma de synthèse du projet Carboseine

1.2 Objectifs 2011

En juillet 2010, la première station de mesure multi instrumentée en temps réel a été installée sur le site de Bougival à l'aval de Paris. En 2012, deux stations supplémentaires seront déployées à l'amont (Suresnes) et à l'aval (Andrésy) de cette première station.

L'année 2011 a été consacrée à

(1) la validation métrologique de l'acquisition des données de qualités de l'eau: T°, Cond., O_2, pH, Chlorophylle discrétisée pour 4 classes d'algues, phosphates dissous.

(2) L'évaluation de l'endurance du système complet sur une année de mesures.

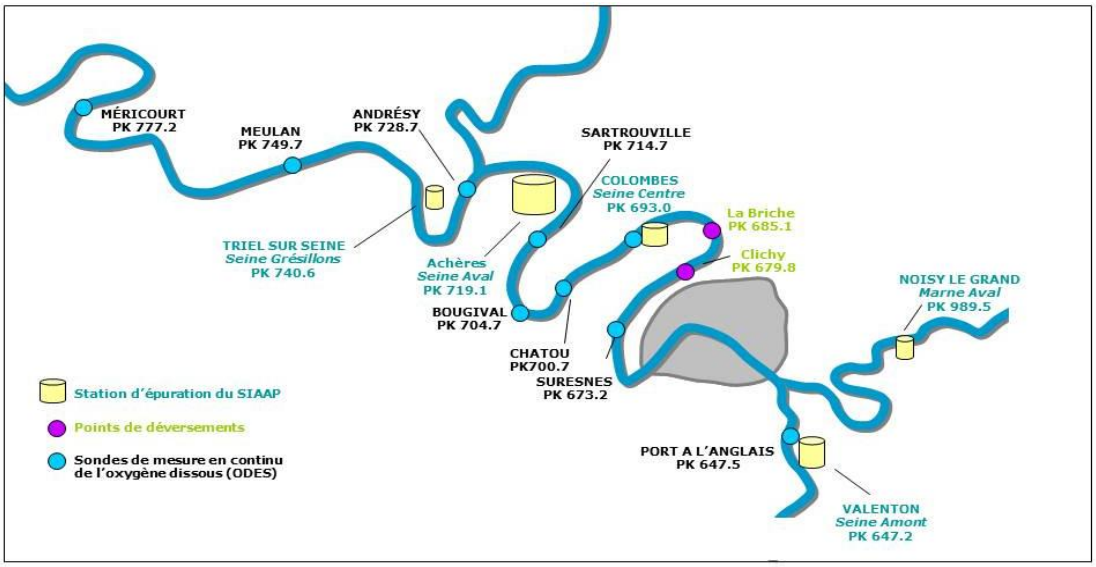
(3) Le développement d'un système de réceptions des données, de mise en base, de qualification, et d'affichage web expert.

2 Présentation de la station de mesure

2.1 Site(s) d'étude

Une première station de mesure a été installée en juillet 2010 à Bougival avec le concours de l'équipe ODES du Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP). Le choix de ce premier site a été conditionné par des raisons pratiques ainsi que par le fait que Bougival se situe entre les STEP de Seine Centre (Colombes) et Seine Aval. La station est ainsi localisée à 12 km (en linéaire simulé) en aval de la STEP de Seine Centre et respectivement à 20 et 25 km des principaux déversoirs d'orage de La Briche et de Clichy. Le printemps 2012 verra l'installation des 2 prochaines stations de mesure Carboseine en amont de l'usine de Colombes, à Suresnes, et en aval de Seine Aval et de la confluence avec l'Oise, à Andrésy. Les sites choisis correspondent à des retenues de barrages gérées par Voies Navigables de France (VNF), sur lesquels le SIAAP dispose déjà de sondes O_2. L'ensemble des 3 stations couvrira ainsi un linéaire simulé de Seine de 55 km entre Suresnes et Andrésy.

Le site de Bougival, dont la situation est positionnée sur la Figure 3, est situé dans le département des Yvelines. La station instrumentée est arrimée à une cabane flottante, propriété du SIAAP, située sur l'Ile de la Loge. Au niveau de ce site d'étude, la Seine est divisée en 2 bras principaux. Le premier est le lieu d'implantation des écluses de Bougival, tandis que le second, sur lequel est installée la station de mesure, correspond à un bras non navigable. La profondeur du fleuve à l'aplomb du site de mouillage est de 4.3 m. Les vitesses de courant minimales enregistrées à ce point sont de l'ordre de 0.1 à 0.2 m s^{-1}. Le débit moyen enregistré sur ce bief du fleuve est de 300 m^3 s^{-1}. Le débit maximal enregistré lors de la crue centennale a atteint les 2600 m^3 s^{-1}, soit un débit Q100 de 800 m^3 s^{-1} dans ce bras et une vitesse maximale associée de 2 m s^{-1}.



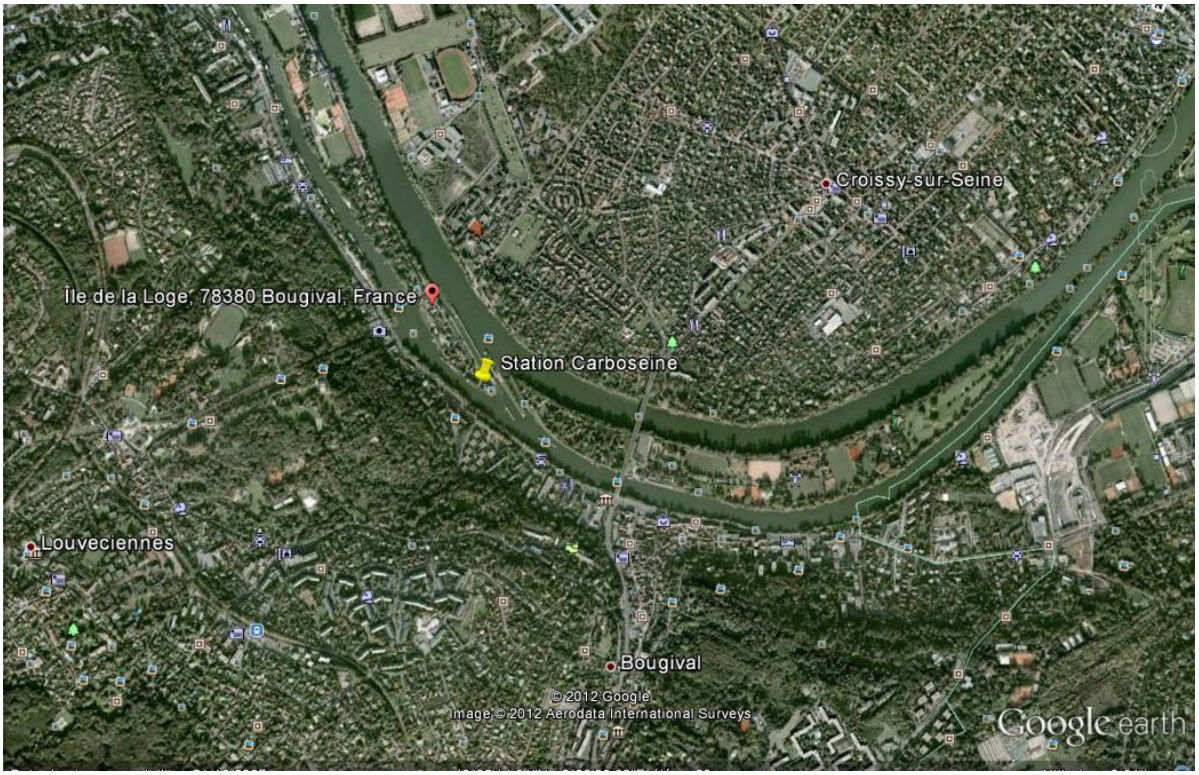


Figure 3: Implantation de la station de mesure Carboseine à Bougival

2.2 La station instrumentée Carboseine

La Figure 4 présente les caractéristiques techniques de la station instrumentée Carboseine actuellement déployée à Bougival.

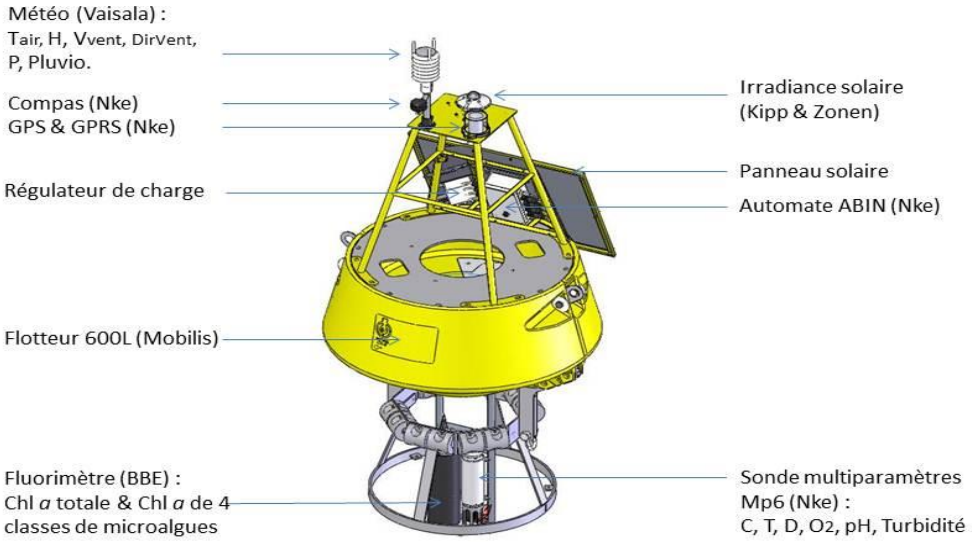


Figure 4: Station de mesure Carboseine

L'ensemble du système repose sur un flotteur Mobilis DB200 dont le poids seul est de 125 kg. Le système, dans son intégralité, est piloté par l'automate ABIN développé par Nke Instrumentation. L'autonomie énergétique est assurée par un panneau solaire SOLARA (Centrosolar Gmbh, Allemagne) de 68 W. L'énergie accumulée étant régulée et adéquatement distribuée à une batterie de 33 Ah par l'intermédiaire d'un régulateur de charge/décharge. La partie supérieure émergée accueille le panneau photovoltaïque, régulateur, batterie et coffret Automate ainsi que la station météo WXT 510 (Vaisala S.A.S, France), le capteur d'Irradiance CMP 11 (Kipp and Zonen, Pays-Bas) et les compas et GPS développés par la société Nke. La partie inférieure immergée supporte, au moyen d'un chassis en métal armé, la sonde multiparamètres Mp6 (Nke) et le spectrofluorimètre Fluoroprobe II (FPII, bbe-Moldaenke, Gmbh, Allemagne). Ces deux capteurs réalisent leurs mesures à une profondeur de 80 cm.

Le capteur d'irradiance est un pyranomètre qui intègre l'énergie des radiations lumineuses sur un spectre de 310 à 2800 nm. Les résultats sont exprimés en W.m-2.

La station météo mesure la température de l'air (°C), la pression atmosphérique (hPa), l'humidité relative (%), la pluviométrie (en mm cumulé depuis le dernier créneau de mesure), la vitesse du vent en rafales, ainsi que les vitesses minimales, maximales et moyennes sur une période d'interrogation définie (en m s^{-1}). Le compas installé en proximité permet de corriger la direction du vent mesurée par la station en direction réelle (en °, 0° ou 360° correspondant au Nord).

Le spectrofluorimètre FPII permet de mesurer la biomasse phytoplanctonique totale (exprimée en µg de chlorophylle a.L-1) mais également de discriminer la contribution relative de 4 grandes Classes phytoplanctoniques (Chlorophycées, Diatomées, Cyanobactéries, Cryptophycées) à ce total. L'instrument prend également en compte l'influence des substances humiques dissoutes (CDOM ou substances jaunes).

La sonde multi-paramètres Nke réalise les mesures de profondeur (m), de Température de l'eau (°C), de Conductivité (mS), d'O2 dissous (% sat, optode Anderraa.), de Turbidité (NTU, Seapoint turbiditymeter) et de pH (Ponsel).

Un capteur supplémentaire est également en place sur le site de Bougival en parallèle de la station Carboseine. Il s'agit du capteur Cycle P (Wetlabs) qui mesure les concentrations en orthophosphates PO43- ou Soluble Reactiv Phosphate (SRP). Ce capteur n'est pour l'instant pas interfacé avec la station de Bougival et fonctionne de manière autonome. Un travail d'interfaçage, mené par Nke, est actuellement en cours pour intégrer ce capteur supplémentaire avec les prochaines stations n° 2 et 3.

La station instrumentée est paramétrable via la communication avec l'Automate ABIN. Ceci nécessite d'établir une liaison radio avec un ordinateur au moyen d'un data pencil radio. Il est ensuite possible de configurer la fréquence de mesures des différents capteurs ainsi que la fréquence d'envoi des mails contenant les données. Pour cela, l'automate est équipé d'une carte SIM et il transmet ses mails par le réseau Orange GPRS (ou réseau 2G). Depuis le déploiement en Juillet 2010, la fréquence de mesures est de 15 min. Actuellement la fréquence d'envoi des mails est de 2h. Ces mails sont incrémentés dans une base de données, dénommée STARTmel (Systèmes Temps réel d'Archivage, de Représentation et de Traitement de données reçues par messagerie electronique : http://carboseine.ipgp.fr). Réciproquement, il est possible de configurer la station par l'envoi d'un mail à distance, c'est-à-dire à partir de n'importe quel ordinateur ayant accès à Internet.

3 Métrologie des capteurs et validation

Depuis le mouillage en Juillet 2010, nous réalisons des interventions terrain sur le site de Bougival selon une fréquence mensuelle à bi-mensuelle. En routine, ces interventions sont destinées au nettoyage ainsi qu'aux contrôles de métrologie des différents capteurs. Ces contrôles sont destinés à repérer de potentiels dysfonctionnements et dérives des capteurs suite à leur déploiement sur de longues plages temporelles. La métrologie des capteurs aériens sera réalisée en fonction des relevés de MétéoFrance à la station ClimaDéf.

L'encrassement des capteurs étant assez rapide du fait de la forte turbidité du milieu, les équipes du SIAAP effectuent également le nettoyage lors de leurs interventions à Bougival pour la maintenance du réseau ODES. On notera également que la validation métrologique des capteurs utilisés dans le système Carboseine

a fait l'objet du travail de stage de Romain Mailler au SIAAP et en collaboration avec le LGE (Mailer R. 2011).

Le taux de couverture de l'automate Abin appréhendé via sa tension de batterie en fonction du temps est de 80% pour l'année 2011. On distingue au cours de ces 12 mois de déploiement, 3 périodes principales pendant lesquelles le système n'a pas fonctionné. La première période relativement restreinte s'étend du 30/01/2011 au 02/02/2011. Cette période correspond à une mise en défaut de l'automate par manque de couverture réseau GPRS. L'automate intègre en effet une carte SIM Orange pour transmettre ses mails et la réalisation de mises à jour non gérables du réseau GPRS d'Orange par l'automate Abin a provoqué cette mise en défaut. La seconde période du 19/04/2011 au 28/04/2011 correspond à la mise en défaut du panneau photovoltaïque. Une relance a été effectuée le 28/04 avec une batterie de rechange rechargée. Suite à cela, la batterie a été inter-changée toutes les 3 semaines pour permettre au système de fonctionner. Le panneau photovoltaïque a été remplacé le 18/08 permettant la reprise d'un fonctionnement nominal. Enfin, la dernière période, qui s'étend de fin Septembre 2011 à la mi-Octobre 2011, correspond à une migration de l'adresse du serveur DNS non maîtrisée de la part de la Direction des Services Informatiques de l'IPGP qui a occasionnée la mise en attente de l'envoi des mails de données et consécutivement la mise en défaut du système par saturation de sa mémoire interne.

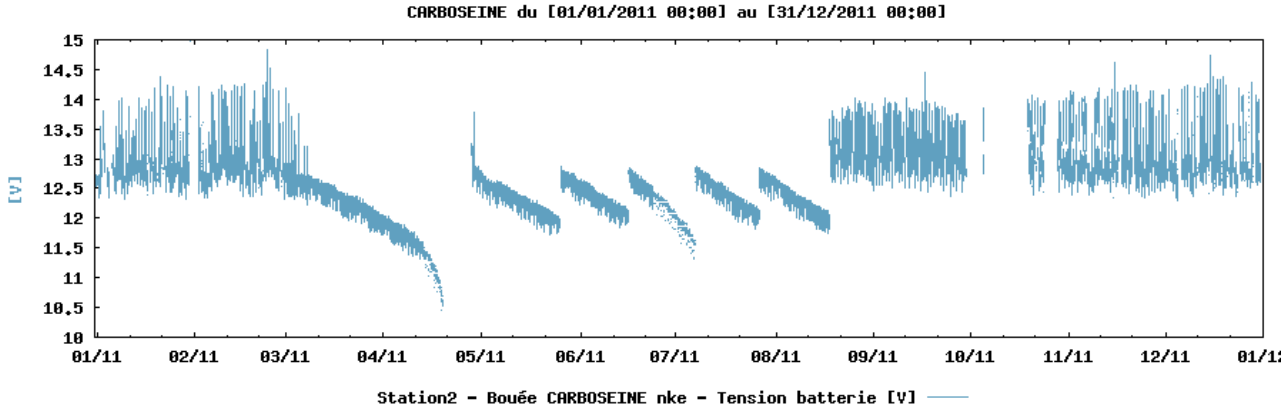


Figure 5: Tension de l'automate Abin pour l'année 2011. Les périodes sans données correspondent à des disfonctionnements

Logiquement les taux de couverture sur cette même période pour le pyranomètre Kipp and Zonen et la station météo Vaissala sont également de 80 % étant donné qu'une mise en défaut de l'automate Abin provoque l'arrêt des acquisitions de ces 2 capteurs.

Le taux de couverture relatif aux capteurs aquatiques Mp6 et FPII est quant à lui de 90% sur la période écoulée. Ce taux supérieur à celui de l'automate et des capteurs aériens est lié au fait que la sonde Mp6 est dotée d'une batterie interne propre ainsi que d'une mémoire spécifique. En fonctionnement normal l'automate configure la sonde Mp6 et l'interroge pour récupérer ses mesures cependant le capteur est également capable de fonctionner de manière autonome même en cas de défaut de l'automate. La sonde Mp6 contrôle les acquisitions de la sonde FPII lui prodiguant également son alimentation. Ceci explique leur taux de couverture similaire.

3.1 La sonde multiparamètres Mp6

La métrologie de la sonde multiparamètres Mp6 est réalisée à la fois par des mesures contradictoires *in situ* ainsi que par des analyses en laboratoire suite à prélèvements sur site. Le détail est donné ci-après pour chaque paramètre appréhendé. L'ensemble des mesures *in situ* contradictoires sont réalisées avec une sonde multi-paramètres (multi 350i, Set WTW) préalablement calibrée sur site à chaque intervention. Cette sonde permet de contrôler les valeurs de Température (°C), Conductance spécifique (conductivité exprimée à la température de référence de 25°C avec facteur de compensation non linéaire de 2,1%/°C, notée Cs25 en µS/cm), Oxygène dissous (% sat. & mg.L-1) et pH.

3.1.1 Oxygène dissous

Les enregistrements d'oxygène dissous réalisés en Seine par la sonde Mp6 sont confrontés aux mesures *in situ* de la sonde WTW ainsi qu'aux résultats d'analyses des concentrations en oxygène dissous obtenus par la méthode de Winkler (Winkler, 1888 ; Grasshof, 1983) suite à prélèvements synchrones sur site. Les corrélations obtenues sur l'ensemble des contrôles réalisés depuis le mouillage de la station sont présentés sur la Figure 6.

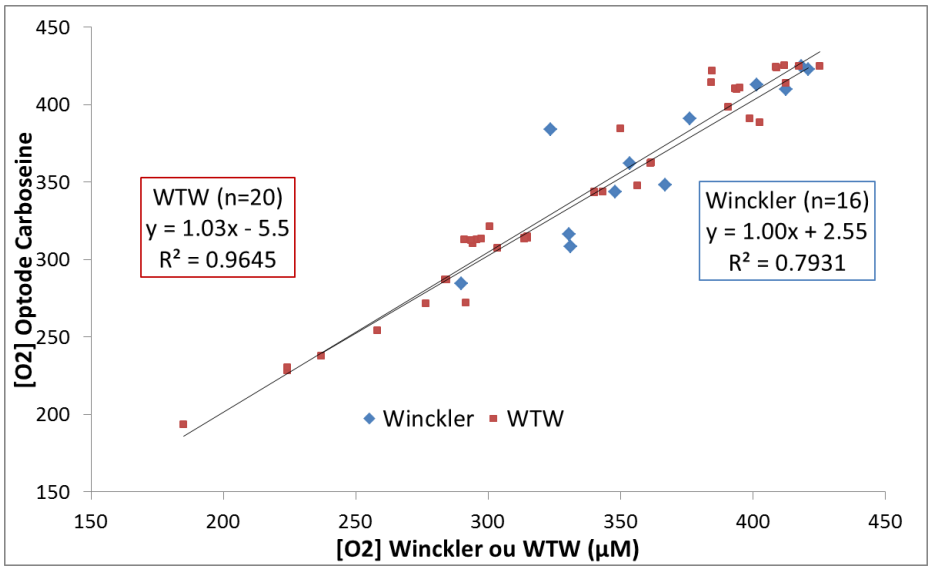


Figure 6: Corrélations des données de l'optode (Mp6 Carboseine) avec les résultats des mesures WTW et des dosages WInckler

Les régressions linéaires obtenues avec les résultats des 2 méthodes présentent des corrélations hautement significatives ainsi que des valeurs de pente proches de l'unité. Ces résultats permettent de valider la chronique d'enregistrement d'oxygène dissous en Seine depuis le mouillage de la station Carboseine. La sonde Mp6 dose l'oxygène par mesure optique (technologie optode) et non par mesure électrochimique (électrode de Clarck). L'optode peut ainsi fonctionner plusieurs semaines sans nettoyage tandis que l'encrassement de la membrane des électrodes de Clarck entraîne après quelques jours de déploiement une sous-estimation des concentrations en oxygène dissous.

3.1.2 pH

La métrologie du capteur pH intégré dans la sonde Mp6 est réalisée par comparaison aux mesures in situ synchrones de la sonde WTW mais également par des contrôles ex situ en solutions de référence pH (4, 7 et 9 ; Hanna Instrument Inc.). La valeur absolue de l'écart moyen observé entre les mesures *in situ* Carboseine et les mesures de référence est de 0.12 +/- 0.11 unité pH ; permettant ainsi de valider la chronique d'enregistrement de pH en Seine obtenue par la station Carboseine. Ainsi la valeur du pH en Seine mesurée par la sonde Mp6 est à considérer avec une incertitude maximum de +/- 0.1 unité pH. En revanche les variations relatives s'apprécient avec une précision de +/- 0.05 unité pH. Sur l'année 2011, le taux de couverture spécifique au capteur pH est de 55%. Ce taux de couverture inférieur à celui des autres capteurs de la sonde Mp6 s'explique par un dysfonctionnement électronique qui a conduit à invalider les données acquises entre le 26/05 et le 19/10/2011.

3.1.3 Conductivité

Les enregistrements de conductivité de la station Carboseine sont confrontés aux mesures de la sonde WTW Figure 7. La fiabilité des mesures Carboseine est également vérifiée par immersion du capteur de conductivité en solutions de référence 1413 µS/cm (Mettler Toledo, Gmbh), données non présentées…

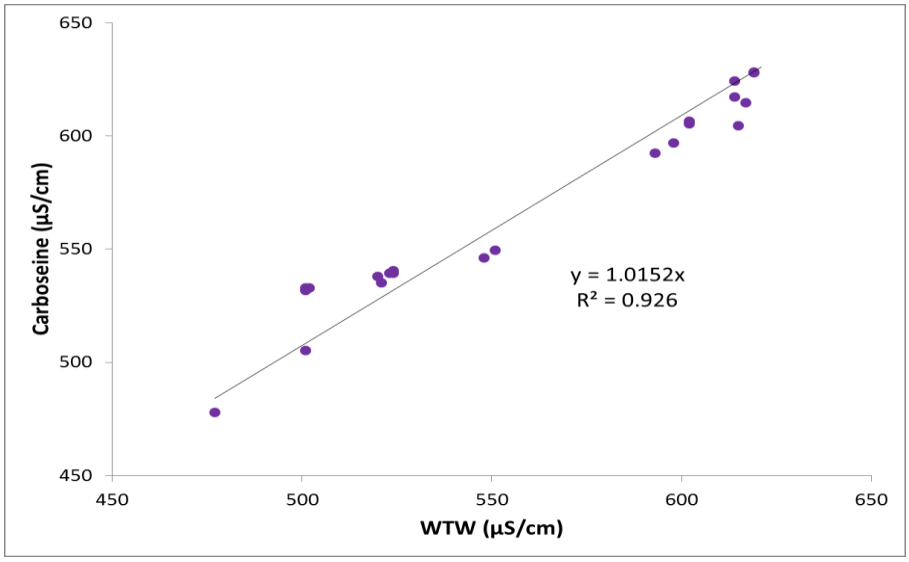


Figure 7: Corrélations des données de conductivité (Mp6 Carboseine) avec les résultats des mesures WTW

La corrélation obtenue est hautement significative et la pente de la régression obtenue est proche de l'unité. Ces résultats permettent de valider la chronique d'enregistrement de conductivité obtenue par la station Carboseine.

3.1.4 Turbidité

Les données de turbidité Carboseine ont été confrontées aux mesures *in situ* parallèles d'un capteur de turbidité Hach Lange (SIAAP). Le retour d'expérience associé à ces contrôles ne permet pas de valider les données acquises par le capteur de turbidité Seapoint intégré au sein de la sonde multiparamètres Mp6. Ce capteur a en effet montré une trop grande sensibilité à l'encrassement avec 2 types de réponses indésirables engendrées. D'une part, la forte turbidité observée dans le fleuve en période automne-hiver induit l'obstruction des optiques et une baisse artificielle des valeurs mesurées. D'autre part, nous avons observé durant la période printanière pendant l'efflorescence de Diatomée une surestimation des valeurs mesurées. Ces micro-algues se développent au sein d'une logette siliceuse, le frustule, dont les parois diffractent une partie du faisceau lumineux émis (880 nm) par le turbidimètre augmentant ainsi artefactuellement le résultat de la mesure (Figure 8). Ce constat est confirmé par une « Application note » de 2008 de Campbell Scientific. Inc. concernant l'influence de différents types de fouling sur la mesure optique de turbidité. Les valeurs fournies par l'instrument à ces périodes ne sont en l'état pas recevable ce qui a conduit à anticiper l'installation d'un système antifouling par balayage des optiques (Zebratech Inc.) sur les capteurs de turbidité des sondes MP6 des prochaines stations de Suresnes et Andrésy.

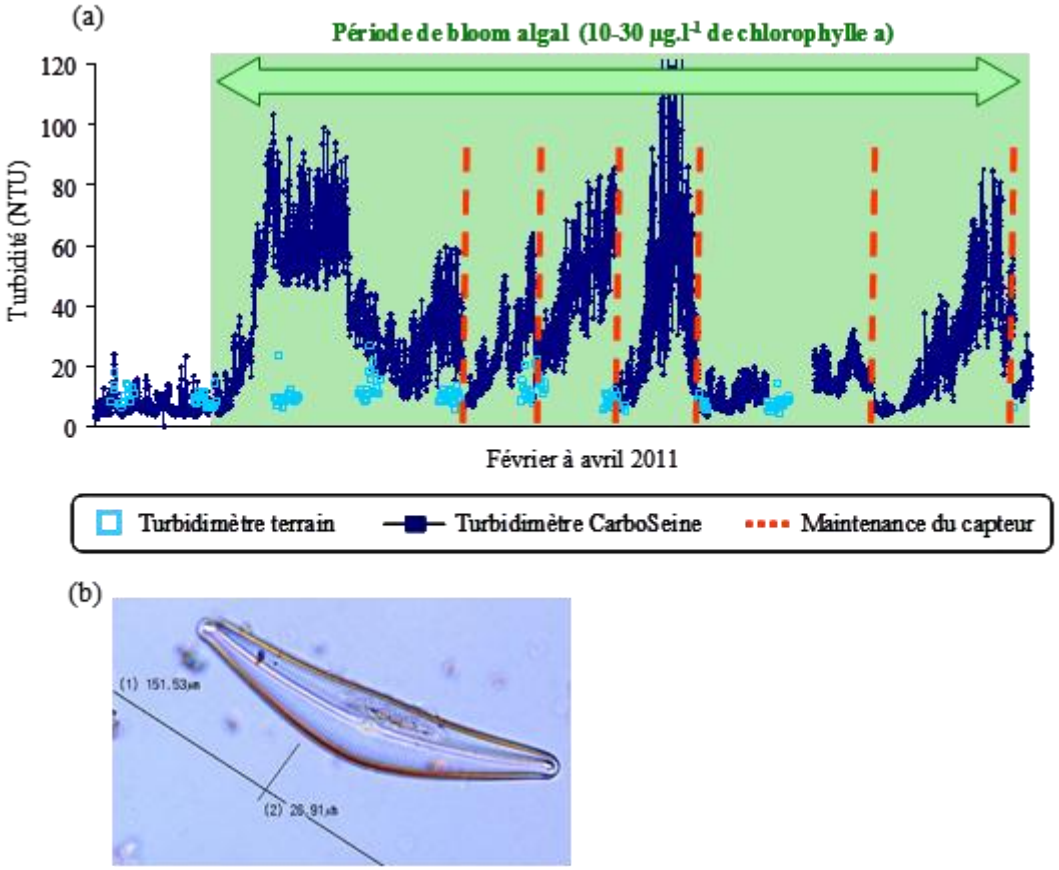


Figure 8: (a) chronique de mesure en continu de la turbidité sur le site de Bougival (février à avril 2011) et (b) photographie au microscope optique d'une Diatomée du genre Nitzschia sp. (S. Hamlaoui, Muséum National d'Histoire Naturelle, 2011)

3.2 La sonde Fluoroprobe II (BBE Moldaenke)

La métrologie de la sonde FPII est réalisée selon 2 types d'analyse en laboratoire suite à prélèvements synchrones *in situ*.

3.2.1 Chlorophylle a totale

Les concentrations en chlorophylle a totale mesurées par la sonde sont comparées aux concentrations déterminées par dosage spectrophotométrique réalisé après filtration d'échantillons d'eau brute. Les dosages de chlorophylle a sont réalisés selon un protocole légèrement modifié de la méthode normalisée (AFNOR, NF T 90-117, 1999) utilisant le méthanol 90% (v/v) comme solvant organique d'extraction au lieu de l'acétone 90% (v/v). Les rendements d'extraction de la chlorophylle atteints selon le protocole modifié, et donc les concentrations mesurées, sont supérieurs à ceux obtenus en appliquant la méthode normalisée. L'analyse de chlorophylle a sur les mêmes échantillons par ces deux méthodes a d'ailleurs confirmé que les concentrations obtenues en appliquant le protocole modifié était environ 30 % supérieures à celles obtenues en appliquant la méthode normalisée (Mailler, 2011). La Figure 9 ci-dessous présente la corrélation des concentrations en chlorophylle a mesurées in situ par la sonde FPII Carboseine ou déterminées par dosage selon le protocole AFNOR modifié. Les symboles bleus caractérisent les résultats obtenus au LGE tandis que les symboles rouges correspondent aux résultats d'analyse du SIAAP (Mailler, 2011).

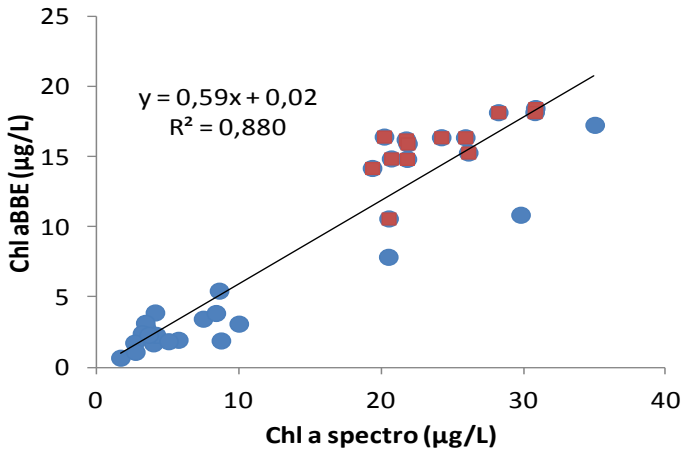


Figure 9: Corrélations des données de chlorophylle a totale (FPII Carboseine) avec les concentrations déterminées par dosage spectrophotométrique.

La corrélation obtenue entre les résultats des deux méthodes est hautement significative (R^2=0.88). Ce résultat permet de valider l'utilisation de la sonde FPII comme estimateur de biomasse phytoplanctonique totale et donc la chronique d'enregistrement in situ correspondante. D'après le graphique de la Figure 9, il est intéressant de noter que, dans la gamme de concentrations étudiée (5-20 µg.L-1), les valeurs données par la sonde FPII embarquée sur la station Carboseine sont systématiquement inférieures à celles obtenues en laboratoire. Ceci peut s'expliquer par le fait que la sonde FP II est calibrée, en usine, à partir de solutions standard de pigments purifiés en HPLC. Ces standards n'intègrent, de fait, pas les formes dérivés des pigments photosynthétiques (divinyl-chlorophylle par exemple etc…) présents au sein des communautés phytoplanctoniques naturelles et dont les maximums d'absorbance proches de ceux de la chlorophylle a impliquent une influence qui est prise en compte lors du dosage par spectrophotométrie (Gregor & Marsalek, 2004). Le coefficient directeur de la régression linéaire reliant les deux jeux de valeurs calculé à 0.6 et le coefficient de détermination supérieur à 0,85 montrent que cette sous-estimation est constante et de l'ordre de 40 %. Ainsi, l'affectation d'un simple facteur correctif permet d'obtenir une valeur proche de celle déterminée en laboratoire selon le protocole décris.

3.2.1 Décomposition par classes phytoplanctoniques

Afin d'éprouver la capacité de la sonde FPII à discriminer la contribution des 4 classes phytoplanctoniques mentionnées à la biomasse totale, des prélèvements complémentaires sont réalisés sur site à chaque intervention. Des échantillons d'eau brute sont prélevés puis fixés immédiatement (solution Lugol alcaline 1% et Formaldéhyde tamponné (2%f(v/v)) afin de réaliser des dénombrements cellulaires ainsi que des mesures de biovolumes. Les dénombrements sont réalisés en microscopie inversée suite à la sédimentation en chambres des échantillons selon la méthode d'Utermöhl (1958) (NF EN 15204_T90-379, 2006). Les mesures d'espèces sont réalisées en microscopie optique classique et les biovolumes déterminés selon les formules préconisées par Sun & Liu (2003). Le traitement des échantillons est actuellement en cours au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris.

3.3 La sonde Phosphate

3.3.1 Principe

L'analyseur *in situ* du phosphate dissous est commercialisé par WetLabs sous le nom de CycleP. Son principe de fonctionnement est identique à l'analyse du phosphore réactif soluble (assimilé au phosphate ou orthophosphate) par colorimétrie et spectrophotométrie classique. L'échantillon est préalablement filtré par une crépine de maille 10 µm protégée par un tamis en cuivre de maille 500 µm. La formation du bleu de phosphomolybdène (produit final) est basée sur la réaction entre le phosphate et un réactif molybdate en milieu acide (complexe phosphomolybdate), qui est réduit par l'acide ascorbique en bleu de phosphomolybdène. Une fois la réaction réalisée, la lecture de l'absorbance à 880 m est mesurée sur un trajet

optique de 5 cm.

L'intervalle de mesure minimal est de 30 minutes entre deux échantillons. Une re-calibration interne est effectuée par le cycleP en ajoutant pour certaines analyses une quantité connue et précise d'une solution standard de phosphate embarquée dans l'analyseur.

Les trois cartouches de réactifs embarquées dans l'analyseur permettent une autonomie d'acquisition de 1000 échantillons.

La gamme de mesure constructeur est comprise entre 50 nM et 10 µM, soit 0.0015 mgP/L à 0.31mgP/L, soit 0.0047 mgP-PO4/L à 0.95 mgP-PO4/L. La prévision est de 0.15 µM, soit 0.0046 mgP/L, soit 0.014 mgP-PO4/L.

3.3.1 Calibration en laboratoire

Avant déploiement un contrôle de la calibration usine est effectuée au laboratoire sur des étalons de phosphate. L'apport de cette étape était initialement de vérifier la dynamique de réponse du capteur au delà de la valeur maximale constructeur. Nos essais montrent que la linéarité de la réponse est satisfaisante jusqu'à deux fois la valeur maximale admise.

A chaque retour du capteur en laboratoire pour changement de cartouches de réactifs ou pour pannes (batterie, panne software ou hardware), un contrôle de calibration est systématiquement réalisé.

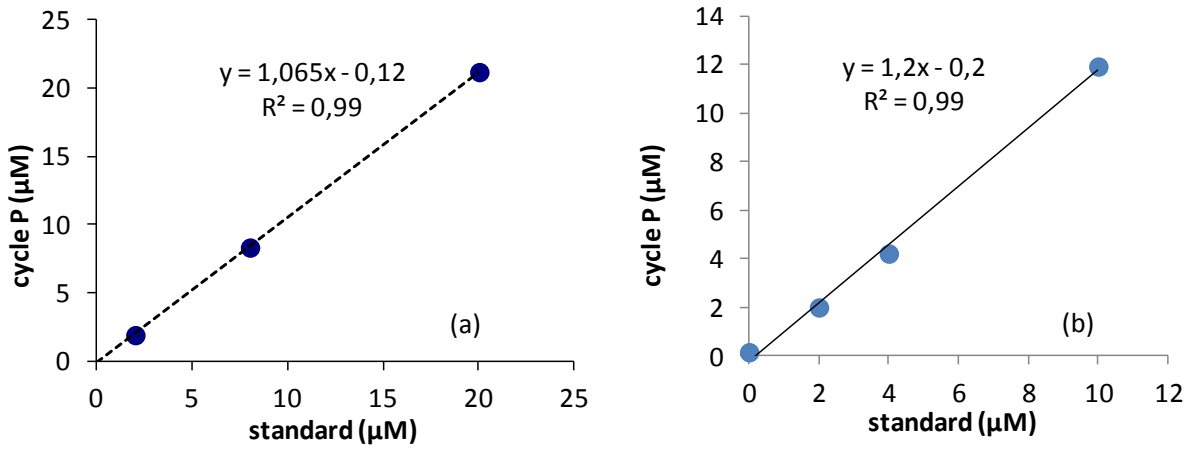


Figure 10: Contrôle de calibration au laboratoire. (a) vérification de la linéarité au delà de la valeur maximale (3/12/2010). (b) après un changement de cartouche réactif (16/05/2011)

3.3.1 Contrôle de calibration in situ

En 2011, un effort de contrôle de calibration in situ a été réalisé de mai à juillet par l'équipe ODES de la DDP du SIAAP. Un préleveur automatique a été utilisé pour acquérir des échantillons moyens par période de 2 à 4 heures. Les analyses ont été faites par le laboratoire du SIAAP selon la méthode normalisée (NF-EN ISO 10304-1).

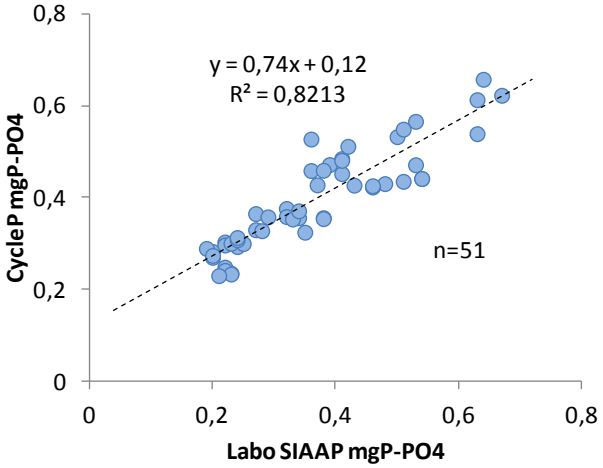


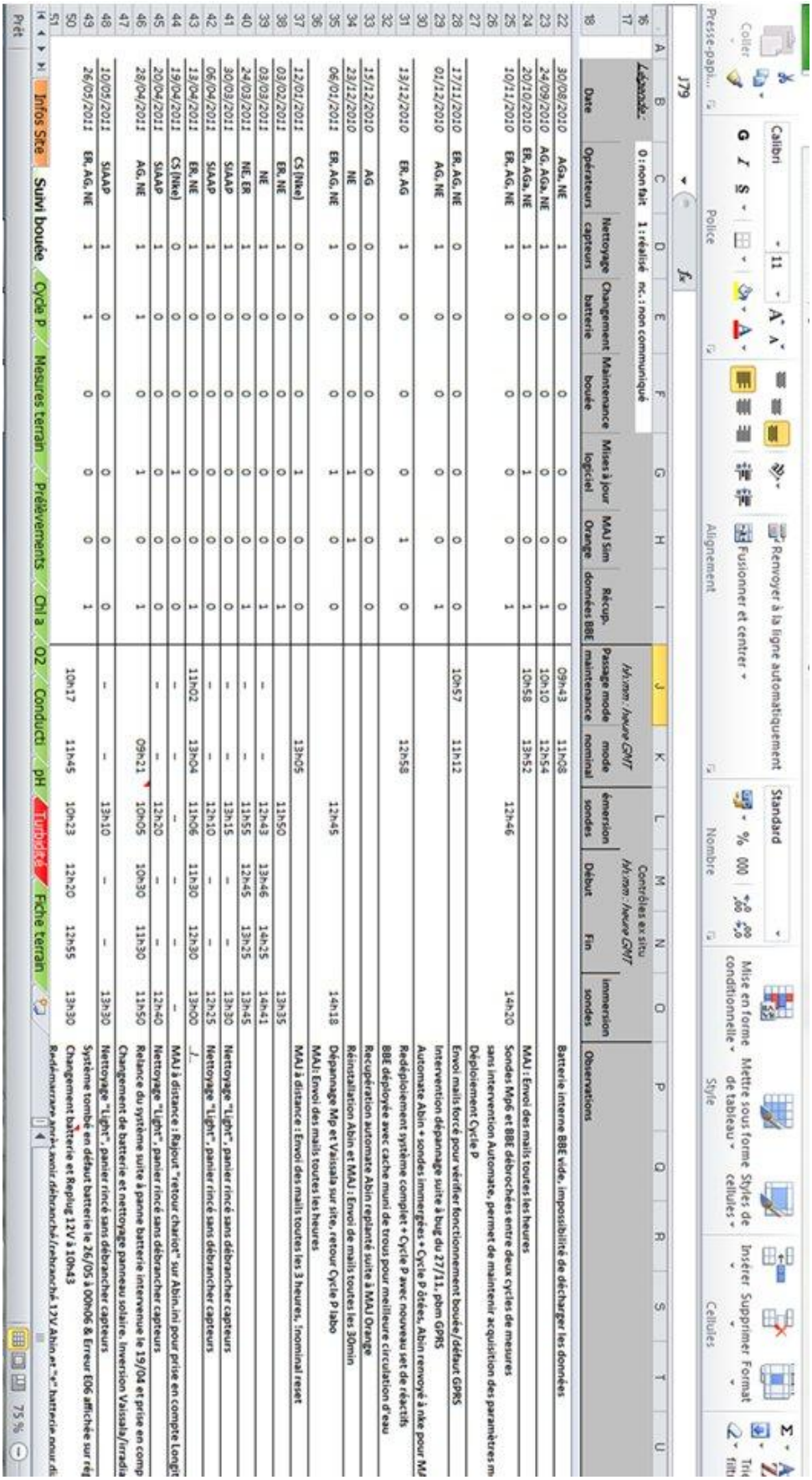
Figure 11: contrôle de calibration in situ du cycleP à bougival. Campagnes spécifiques SIAAP avec préleveur. 12 jours avec de 3 à 9 échantillons moyens entre le 27/05/11 et le 07/07/11

La corrélation linéaire est suffisamment bonne compte tenue des conditions du milieu Seine pour valider les mesures du capteur. La pente s'écarte significativement de la droite 1:1. Le forçage par zéro de la droite de corrélation entraine un abaissement significatif du coefficient de détermination (r^2=0.66). La qualification du jeu de donnée peut donc être établie pour cette gamme de valeur avec une incertitude que nous pourrons chiffrer plus rigoureusement en poursuivant les campagnes de validation en 2012.

3.4 Classeur de suivi

Les mesures et prélèvements décris ci-dessus sont tous réalisés de manière synchrone avec les heures de mesure de la station Carboseine et notés sur une feuille de terrain dédiée. L'ensemble de ces informations (résultats de calibration, heures et nature des contrôles *in situ*, *ex situ* et prélèvements) est par la suite consigné dans un classeur de suivi du projet. Dans l'immédiat, ce document est sous la forme d'un Tableur et il permet de synthétiser, les données décrites ci-dessus, mais également les pannes et interventions matériels de la station instrumentée Carboseine ainsi que les résultats des analyses réalisées en Laboratoire suite aux prélèvements sur le terrain (Figure 12). Ces résultats sont ainsi comparés avec les données des capteurs Carboseine in situ afin d'éprouver leur bon fonctionnement et d'établir un retour d'expérience le plus précis et rigoureux possible envers les développeurs et intégrateurs du système Carboseine.

En 2012, le classeur de suivi sera mis en ligne sur l'interface homme machine (IHM) nommée STARTmel. La mise en ligne du classeur, qui concernera bientôt 3 stations instrumentées, permettra aux différents opérateurs en charge de la maintenance du réseau Carboseine de remplir les résultats de contrôles et maintenance directement en ligne.



	Date	Opérateurs	Nettoyage capteurs	Changement batterie	Maintenance bouée	Mises à jour logiciel	MAJ Sim Orange	Récup. données BBE	Passage mode maintenance (hh:mm : heure GMT)	mode nominal	Contrôles ex situ immersion sondes (hh:mm : heure GMT) Début	Fin	Immersion sondes	Observations
22	30/08/2010	AGa, NE	1	0	0	0	0	0	09h43	11h08				Batterie interne BBE vide, impossibilité de décharger les données
23	24/09/2010	AG, AGa, NE	1	0	0	0	0	1	10h10	12h54				
24	20/10/2010	ER, AGa, NE	1	0	0	1	0	1	10h58	13h52				MAJ : Envoi des mails toutes les heures
25	10/11/2010	ER, AG, NE	1	0	0	0	0	1			12h46		14h20	Sondes Mpé et BBE débrochées entre deux cycles de mesures
26														sans intervention Automate, permet de maintenir acquisition des paramètres m
27														Déploiement Cycle P
28	17/11/2010	ER, AG, NE	0	0	0	0	0	0	10h57	11h12				Envoi mails forcé pour vérifier fonctionnement boucle/défaut GPRS
29	01/12/2010	AG, NE	1	0	0	0	0	1						Intervention dépannage suite à bug du 27/11, pbm GPRS
30														Automate Abin + sondes immergées + Cycle P ôtées, Abin renvoyé à nke pour MA
31	13/12/2010	ER, AG	1	0	0	0	1	0		12h58				Redéploiement système complet + Cycle P avec nouveau set de réactifs
32														BBE déployée avec cache muni de trous pour meilleure circulation d'eau
33	15/12/2010	AG	0	0	0	0	0	0						Recupération automate Abin replanté suite à MAJ Orange
34	23/12/2010	NE	0	0	0	1	1							Réinstallation Abin et MAJ : Envoi de mails toutes les 30min
35	06/01/2011	ER, AG, NE	1	0	0	1	0	0		12h45			14h18	Dépannage Mp et Vaissala sur site, retour Cycle P labo
36														MAJ: Envoi des mails toutes les heures
37	12/01/2011	CS (Nke)	0	0	0	1	0	0		13h05				MAJ à distance : Envoi des mails toutes les 3 heures, 1nominal reset
38	03/02/2011	ER, NE	1	0	0	0	0	1			11h50		13h35	
39	03/03/2011	NE	1	0	0	0	0	1	--	12h43	13h46	14h25	14h41	
40	24/03/2011	NE, ER	1	0	0	0	0	1	--	11h55	12h45	13h25	13h45	
41	30/03/2011	SUAAP	1	0	0	0	0	0	--	13h15	--	--	13h30	Nettoyage "Light", panier rincé sans débrancher capteurs
42	06/04/2011	SUAAP	1	0	0	0	0	0	--	12h10	--	--	12h25	Nettoyage "Light", panier rincé sans débrancher capteurs
43	13/04/2011	ER, NE	1	0	0	0	1	1	11h02	11h06	11h30	12h30	13h00	MAJ à distance : Rajout "retour chariot" sur Abin.ini pour prise en compte Longit
44	19/04/2011	CS (Nke)	0	0	0	1	0	0	--	--	--	--	--	Nettoyage "Light", panier rincé sans débrancher capteurs
45	20/04/2011	SUAAP	1	0	0	0	0	0	--	12h20	--	--	12h40	Relance du système suite à panne batterie intervenue le 19/04 et prise en comp
46	28/04/2011	AG, NE	1	1	0	0	0	1	09h21	10h05	10h30	11h30	11h50	Changement de batterie et nettoyage panneau solaire. Inversion Vaissala/Inradia
47														
48	10/05/2011	SUAAP	1	0	0	0	0	0	--	12h10	--	--	12h30	Nettoyage "Light", panier rincé sans débrancher capteurs
49	26/05/2011	ER, AG, NE	1	1	0	0	0	1	10h17	11h45	10h23	12h20	12h55	13h30	Système tombé en défaut batterie le 26/05 à 00h06 & Erreur E06 affichée sur ré
50														Changement batterie et Replug 12V à 10h43
51														Redémarrage après avoir débranché/rebranché 12V Abin et "e" batterie pour di

Figure 12: Copie d'écran d'une feuille du classeur de suivi métrologique

4 Intégration en base de données et interface de visualisation

La station Carboseine de Bougival émet actuellement ses mails de données toutes les 2 heures. Ces mails, transmis par l'intermédiaire du réseau GPRS 2G d'Orange, sont traités par un serveur informatique de l'IPGP afin que les données contenues soient intégrées dans l'Interface Homme Machine (IHM ci-après) du projet Carboseine, STARTmel » (http://carboseine.ipgp.fr/). Les données sont, dans un second temps, également bancarisées sur un serveur de l'hébergeur OVH pour sauvegarde en cas de panne informatique. Concrètement, au niveau du serveur IPGP, les données contenues dans les mails sont extraites par l'intermédiaire d'un script PHP et stockées au sein d'une Base au format MySQL.

4.1 Interface graphique

L'IHM STARTtmel (Systèmes Temps réel d'Archivage, de Représentation et de Traitement de données reçues par messagerie electronique) n'est, comme son nom l'indique, pas qu'une simple Base de Données de stockage mais un outil interactif à destination des partenaires du projet Carboseine. Cet outil permet de visualiser graphiquement les données acquises ainsi que de les exporter afin de travailler localement sur des fichiers au format ASCII. Le logiciel utilisé pour l'interface graphique est GNUPLOT et les procédures d'export/extraction répondent à des scripts PHP.

L'originalité de l'IHM STARTmel est qu'il s'agit d'un outil exploratoire pour le diagnostic et l'interprétation de séries temporelles multiparamètres via leur analyse graphique. Actuellement, cette console de visualisation permet de paramétrer l'affichage de 1 à n variables (42 paramètres sur l'ensemble des capteurs de la station) sur des intervalles de temps définis. Les plages de données ainsi visualisées peuvent par la suite être exportées afin de les étudier via différents logiciels de traitement de données.

L'outil STARTmel est encore en cours de développement sous l'égide de développeurs WEB (Jean Christophe Hautbois et Antoine Rabreau) et avec le concours des partenaires du projet Carboseine (Laboratoire de Géochimie des Eaux, Société IPSO-FACTO). Les développements futurs permettront ainsi d'inclure de nouvelles fonctionnalités telles que la définition de canevas pour la représentation de mesures par groupes thématiques. On distinguera des canevas généralistes codés en dur au niveau de l'interface ainsi que des canevas personnalisés permettant de répondre aux préoccupations des différentes équipes de recherche du projet et des opérateurs. Ces canevas pourront être enregistrés sur les comptes personnels des différents utilisateurs. Ils consisteront en l'empilement de cartouches graphiques, qui selon un axe temporel, confronteront différentes combinaisons de variables 2 à 2. A ce stade de développement, les canevas généralistes retenus concernent :

- Le fonctionnement des sondes (affichage tensions de batteries et profondeur de mesures des capteurs)
- Les paramètres (variables) physico-chimiques (O2 dissous, Conductivité, Température(s), pH)
- Les variables relatives à l'abondance et diversité de la communauté phytoplanctonique (chlorophylle a (Chl a) totale et Chl a relative aux différentes classes phytoplanctoniques discriminées)
- Les variables bio-écologiques (Chl a, Irradiance, O2, pH, pluie, conductivité, températures air et eau…)

A terme, ces canevas permettront également d'inclure des variables élaborées à partir des variables brutes incrémentées dans la base. La liste exhaustive de ces variables élaborées n'est pas encore arrêtée mais l'on peut d'ores et déjà en citer quelques-unes à titre d'exemple (calcul de Cs25, calculs de cumul de pluie et d'irradiance globale sur des plages de 24h etc…).

Le calcul de ces variables élaborées est toutefois tributaire de la qualification des données brutes en amont.

4.1 Qualification des données

Cette partie vise à présenter les développements en cours actuellement quant à la qualification des données brutes incrémentées au sein de la Base de données. Ces développements impliquent le LGE et IPSO-FACTO.

L'alimentation de la base de données STARTmel en temps réel permet un contrôle a posteriori du fonctionnement/dysfonctionnement de la station sur la période écoulée (jour, semaine, mois, …) par des procédures automatiques. Celles-ci sont basées sur une analyse critique des données bancarisées. Cette analyse multicritères comprend l'évaluation du nombre de données reçues, de leur format et la confrontation des valeurs avec une table des spécifications (configuration station, sondes et capteurs).

Le premier niveau de qualification des données considère également le critère profondeur et les seuils technologiques des différents capteurs.

Les développements en cours visent à proposer des spécifications ainsi qu'un modèle scénarisé pour l'interface d'affichage gestionnaire dédié à la surveillance du fonctionnement des stations. L'objectif étant de faire remonter une information claire ainsi que les éléments nécessaires et suffisants pour permettre de poser un premier diagnostic sur la nature du dysfonctionnement de façon à entreprendre les mesures correctives adéquates dans les plus brefs délais.

Les tests sont réalisés sur la base de données STARTmel qui procède d'un empilement des mails émis par la station, avec remise en ordre chronologique des données, recalage des données des différentes sondes sur une même ligne (en cours) et contrôle de format. Les tests font appel à une table de configuration et permettent également d'amorcer la qualification des données (Quality Flags (QF) indiqués). La Figure 8 représente schématiquement la hiérarchie des différents tests mis en œuvre pour la qualification des données, les paramètres testés ainsi que les QF correspondants.

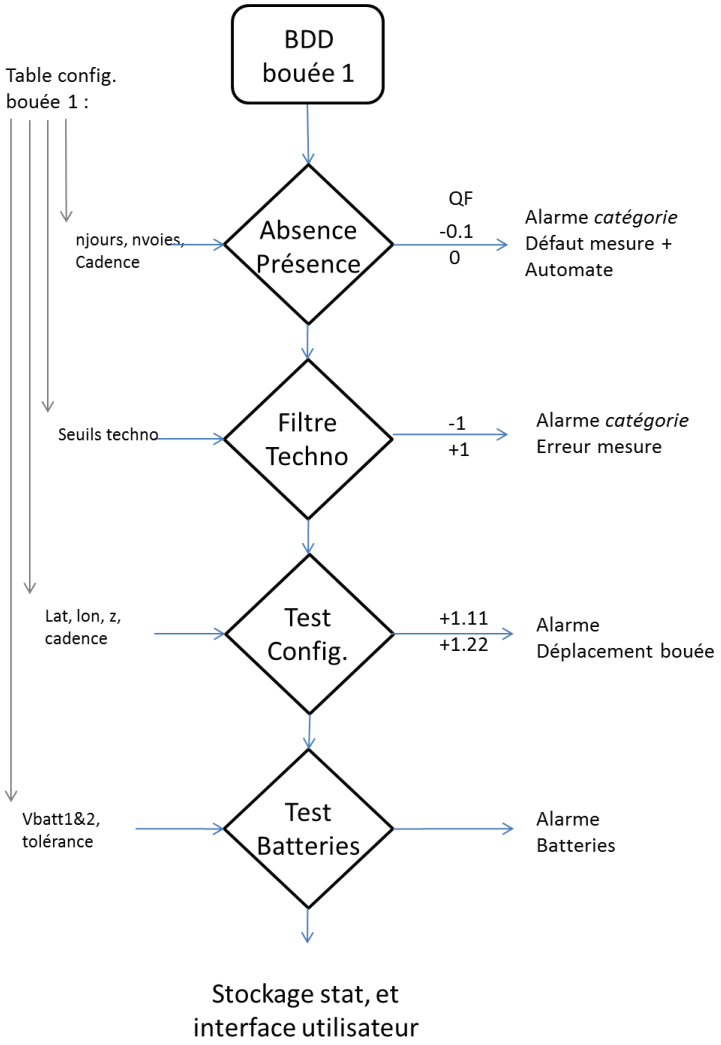


Figure 13: Représentation schématique des tests mis en œuvre pour la qualification du fonctionnement des stations

L'ensemble des 42 variables (+ 43e date/heure) mesurées sont répartis en 6 groupes fonctionnels (7 à l'avenir avec l'interfaçage du Cycle P) auxquels on attribue un code unique. Ces 6 groupes étant eux-mêmes inclus au sein de 5 catégories d'alarme.
Les tests font appel à une table de configuration (ou configurateur) distincte pour chaque station permettant de prendre en compte des configurations différentes et d'éventuelles modifications matérielles ou de paramétrage (ajout suppression de voies, modification de la cadence de mesure…).
On définira donc une table comportant les informations sur la configuration de la station (cadence de mesure, nombre de jours à considérer) et l'implantation locale (position, profondeur) ainsi que les spécifications techniques des capteurs (seuils technologiques minima et maxima).

Le code qualité employé pour la codification des données, suite aux différents tests mentionnés, se présente comme suit : ± A.xy

Les combinaisons possibles et signification sont reportées dans le Tableau 1.

Tableau 1: Code employé pour la qualification des données et signification

-0.1	**Donnée absente**
0	**Donnée présente**
-1	**Erreur mesure**
1	**Mesure bonne Techno**
1.1	**Mesure bonne Techno & trou cadence**
1.2	**Mesure bonne Techno & cadence**
1.X1	**Mesure bonne Techno & mauvaise profondeur**
1.X2	**Mesure bonne Techno & bonne profondeur**
1.X9	**Mesure panier surface**
-9	**Mesure dans l'air**

Les codes qualités correspondant constituent ainsi un premier niveau d'indicateurs opérationnels pour le fonctionnement des stations. Le module d'alarme station envisagé repose sur le principe d'une communication de l'information par double affichage, visuel et textuel.
La Figure 14 représente la charte graphique envisagée illustrée sous l'angle d'un dysfonctionnement.

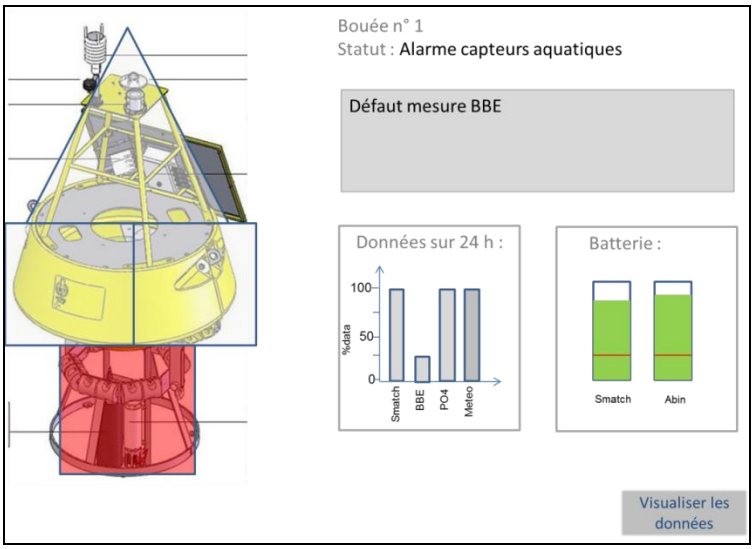


Figure 14: Charte graphique envisagée pour le contrôle de fonctionnement des stations

4.2 Edition graphique des données

Actuellement, l'IHM STARTmel permet d'éditer les données en ligne. Il est ainsi possible d'invalider graphiquement les données aberrantes enregistrées par les sondes ainsi que celles correspondant aux épisodes de maintenance en leur attribuant un code spécifique (code 8.00 aberrant, code 9.00 maintenance). Ce travail d'édition est réalisé à partir des informations notées sur le terrain et reportées au niveau du classeur de suivi. De plus, l'onglet dédié au sein de STARTmel inclus une fenêtre graphique pour simuler le résultat de l'édition. Il est à noter que suite à l'invalidation graphique, il reste possible d'exporter la série temporelle correspondante en y incluant (ou pas) les données de maintenance de manière à ne pas fausser les statistiques d'acquisition de la station (calcul des taux de couverture).
A terme, la mise en ligne du classeur de suivi permettra l'automatisation de la procédure de par son simple remplissage. Un travail d'homogénéisation des codes de qualification sera initié entre la nomenclature pour l'instant retenue au sein du module d'édition et celle, en cours de développement, relative à la qualification automatisée des données évoquée ci-dessus.

5 Observations 2011 à différentes échelles de temps

5.1 Panorama annuel

L'échelle de temps la plus classiquement observée jusqu'à présent dans la Seine pour les paramètres de qualité d'eau, en dehors de l'oxygène dissous (réseau ODES, SIAAP), est l'année.

Le premier apport de la station carboseine est d'y ajouter la chorophylle-a ainsi que le pH, deux paramètres essentiels pour étudier la réaction bilan photosynthèse-respiration dans le fleuve. Pour l'année 2011, deux périodes d'efflorescences algales majeures ont pu être observées, ce qui n'avait pas été le cas depuis plusieurs années. Une troisième efflorescence d'intensité moindre a également été enregistrée.

La définition d'un seuil de concentration enregistré par la sonde BBE pour lequel un dépassement indique une efflorescence n'est pas réalisable sur une seule année d'enregistrement. Pour l'année 2011, nous retiendrons deux conditions pour considérer qu'une efflorescence est enregistrée: (1) que la valeur de chlorophylle mesurée dépasse l'intervalle [3-5] µg/L, et (2) que des valeurs inférieures à 1 µg/L ne soient pas mesurées plus de 8 fois par jours (afin d'éviter les artefacts inhérents à toute sonde haute fréquence)

Ainsi, le passage du premier bloom printanier à Bougival démarre le 26/02/2011 et se termine le 5/04/2011. Sur cette période de 38 jours, le débit moyen journalier (QJM) de la Seine à Austerlitz diminue de 282 à 223 $m^3 s^{-1}$.

La seconde efflorescence en terme d'intensité est observée à Bougival entre le 28/06/2011 et le 10/07/2011. Sur une durée beaucoup plus courte de 12 jours le débit de la seine est proche de l'étiage et diminue de 92 à 71 $m^3 s^{-1}$. Les QJM minimum pour 2011 ont été enregistrés à Austerlitz le 28/05 (66 $m^3 s^{-1}$) et le 7/07 (69 $m^3 s^{-1}$).

Une troisième efflorescence beaucoup moins importante en terme d'intensité, mais répondant aux critères prédéfinie précédemment est enregistrée entre le 7 mai et le 04/06.

Chacune de ces efflorescences s'accompagne d'une augmentation très significative et synchrone de l'oxygène dissous avec dépassement de la concentration à saturation ($[O_2]$>100%). Il en va de même pour le pH, qui augmente en période de bloom. Les valeurs maximales annuelles mesurées sont de pH= 8.4, entre le 10 et le 16/03. Pour le pH les minimas ont été enregistrés entre le 5/11 et le 7/11 à pH=7.6. L'écart de pH sur cette série de donnée incomplète pour 2011 est donc de 0.8 unité pH.

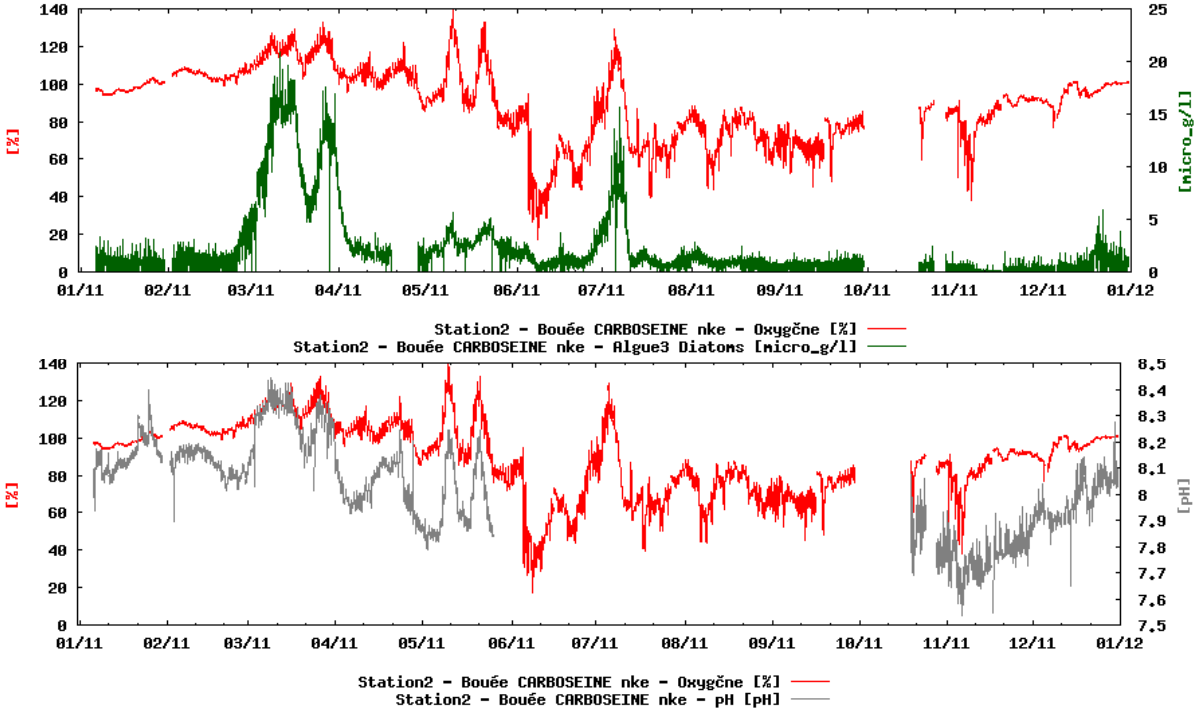


Figure 15: Mesures haute fréquence de la chlorophylle (Diatoms) et de l'oxygène dissous (en haut), du pH et de l'oxygène dissous (en bas) pour l'année 2011 à Bougival.

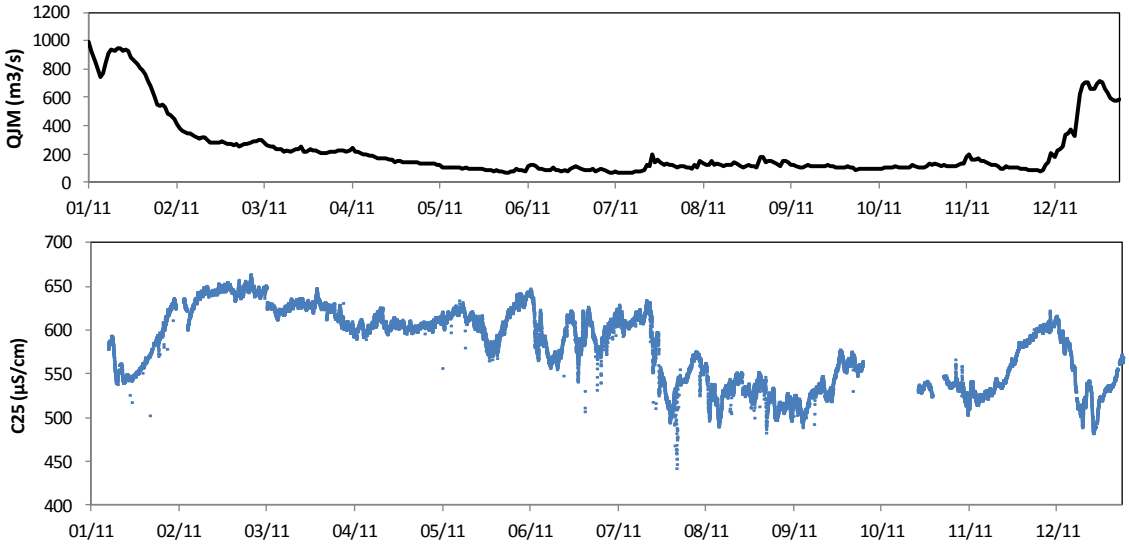


Figure 16 : Débits journaliers moyen à Austerlitz (en haut) et mesures haute fréquence de la conductivité spécifique à 25°C (en bas) pour l'année 2011 à Bougival

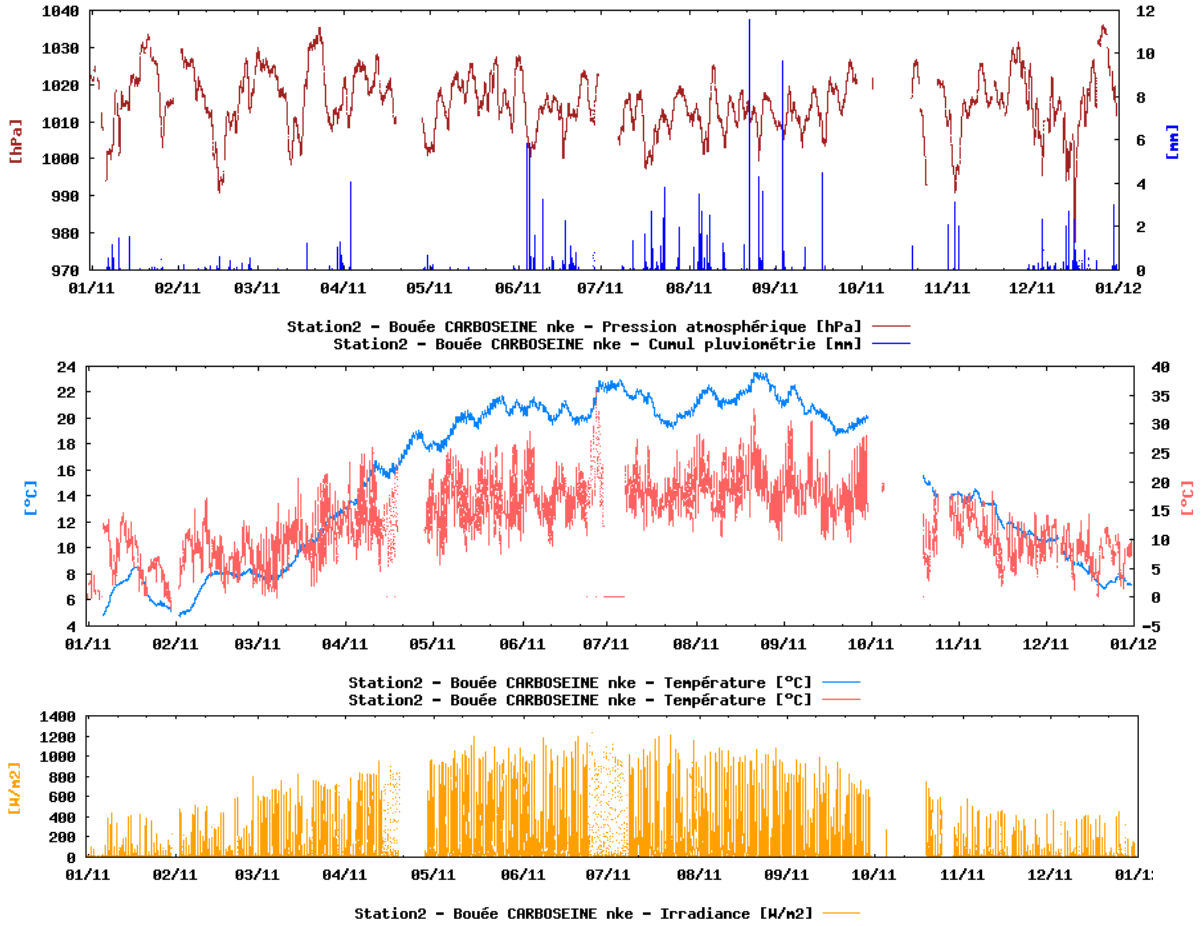


Figure 17 : Mesures haute fréquence de la pression atmosphérique et du cumul de précipitation par période 15 min. (en haut) ; température de l'eau et de l'air (au milieu) ; irradiance (en bas) pour l'année 2011 à Bougival.

5.2 Echelle saisonnière

La Figure 18 présente les chroniques de Chl a et d'oxygène dissous enregistrées par la station Carboseine durant l'épisode de bloom printanier 2011.

Cet épisode est caractérisé par des concentrations maximales en chlorophylle a de 20 µg L^{-1} et par des fortes valeurs de sursaturations en O_2 dissous dont les maxima atteignent 135%. La prolifération s'est stabilisée pendant une vingtaine de jours (du 09 au 31/03/11) avec toutefois une période de décroissance observée entre le 17/03 et le 25/03/11. Cette décroissance est liée à de la dilution par temps de pluie et par les rejets en Seine des déversoirs d'orage (SIAAP) en amont de la station (données non présentées). A l'échelle journalière, on distingue nettement d'importants cycles jour/nuit de variation d'oxygène dissous induits par l'alternance des processus de photosynthèse/respiration de la communauté phytoplanctonique.

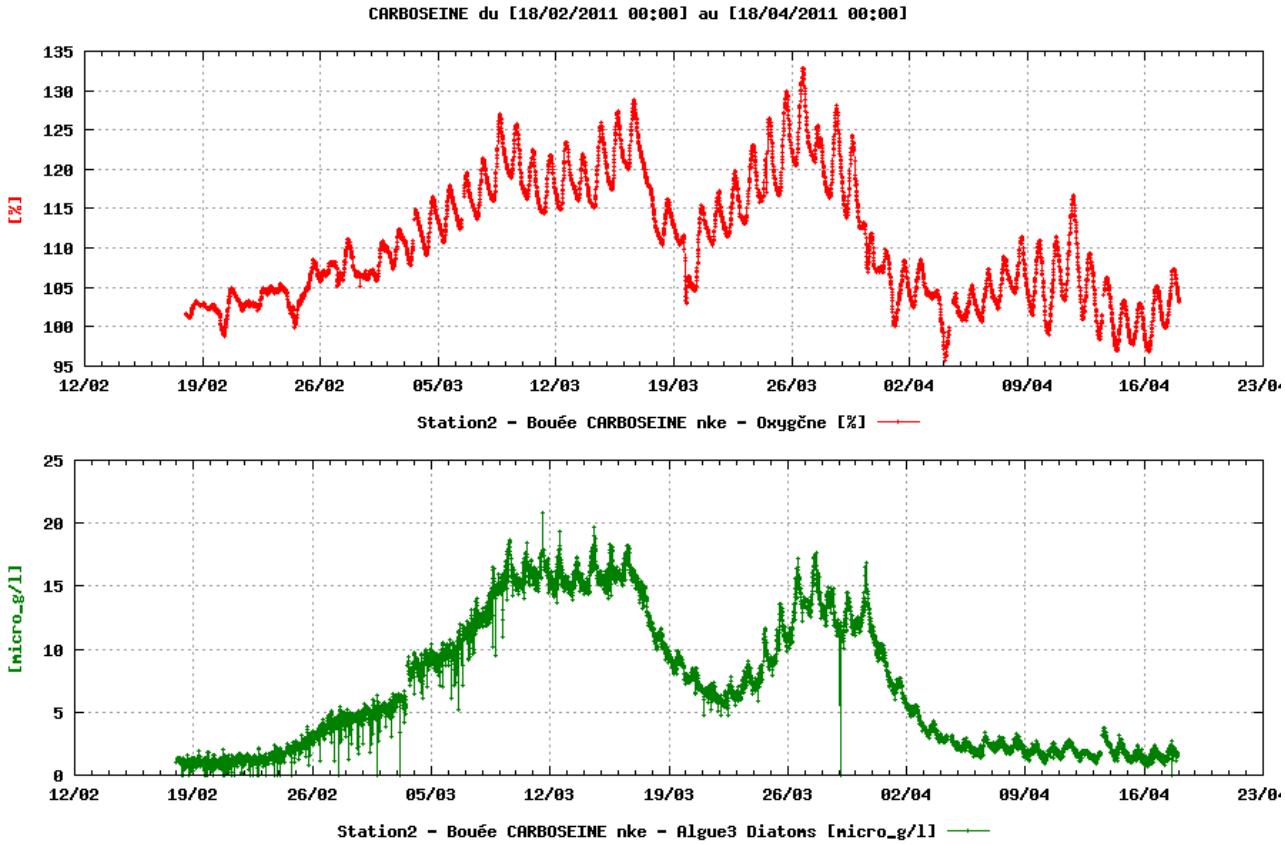


Figure 18: Chroniques de chlorophylle a et d'O2 dissous enregistrées par le système Carboseine pendant l'efflorescence printanière

La Figure 19 donne le détail de la répartition de la biomasse totale enregistrée entre les différentes classes phytoplanctoniques discriminées par la sonde. L'efflorescence printanière considérée correspond ainsi au développement massif de micro-algues de la classe des Diatomées qui rendent compte de la quasi-totalité de la biomasse totale durant cette période. Cette occurrence n'est pas surprenante dans la mesure où il est communément admis que, dans les zones tempérées, les conditions propices aux blooms de Diatomées (températures de l'eau relativement froides, sels nutritifs, particulièrement silice pour la biosynthèse du frustule, en concentrations non limitantes et allongement de la photopériode) sont réunies au début du printemps, et parfois à la fin de l'automne (Leitao & Couté, 2005 ; Garnier et al, 1995).

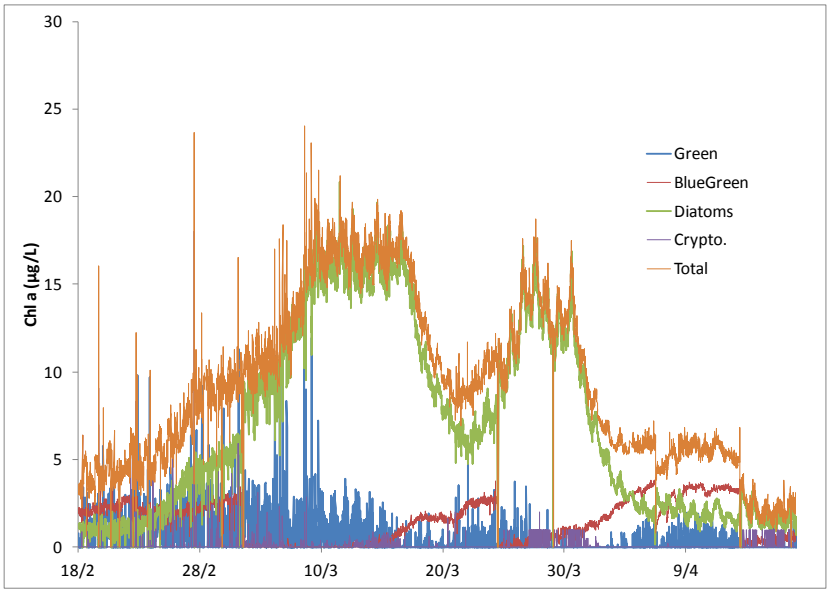


Figure 19: Répartition de la biomasse totale entre les différentes classes phytoplanctoniques discriminées par la sonde FPII

On observe également sur la Figure 19, que les concentrations en chlorophylle a relatives aux classes des Chlorophycées et Cryptophycées restent anecdotiques et très bruitées pendant cet épisode. Le signal relatif aux Cyanobactéries, en revanche, démontre plusieurs augmentations ponctuelles de biomasse. Ces augmentations doivent être considérées comme artefactuelles et sont liées au positionnement vertical de la sonde FPII au sein de la colonne d'eau. L'encrassement de la sonde entraîne une surestimation des concentrations en cyanobactéries, occasionnée par le dépôt d'espèces épiphytiques sur les optiques de mesure du capteur. En effet, les épisodes de maintenance ont systématiquement et immédiatement entraîné une chute des concentrations en cyanobactéries qui, si ce n'est par fouling, sont présentes en concentrations relativement faibles dans la colonne d'eau.

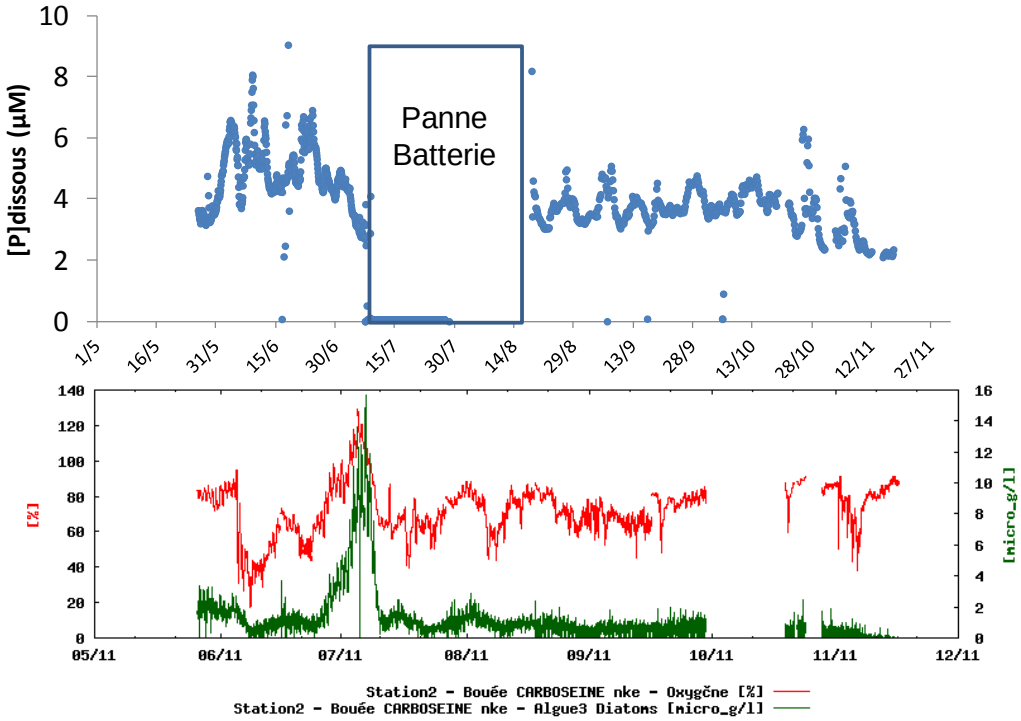


Figure 20: Chroniques de chlorophylle a, d'O2 dissous et de phosphate dissous enregistrées par le système Carboseine pendant l'efflorescence estivale

La Figure 20 illustre les chroniques conjointes de Chl a,oxygène dissous et phosphate dissous enregistrées pendant l'efflorescence phytoplanctonique estivale. Celle-ci correspond également au développement massif de micro-algues de la classe des Diatomées avec une concentration maximale enregistrée de 15 µg L^{-1}. La forte activité photosynthétique durant cette période est également corroborée à de fortes valeurs de sursaturations en oxygène dissous avec des valeurs maximales de 130%. Cet épisode de prolifération est beaucoup plus ponctuel que le premier et peut être mis en relation avec la chronique de phosphate dissous obtenue en Seine par la sonde Cycle P. Bien qu'incomplète en raison d'une panne matérielle, cette chronique illustre toutefois la diminution des concentrations en phosphate dissous concomitante au développement des diatomées et à l'augmentation des concentrations en chlorophylle a correspondantes.

Ces deux épisodes principaux de proliférations confirment l'aspect extrêmement dynamique des efflorescences phytoplanctoniques au sein de l'écosystème et tout l'intérêt des mesures haute résolution du dispositif Carboseine pour documenter ces phénomènes. Une fois toutes les analyses réalisées, il conviendra de préciser la typologie des facteurs de contrôle associés à ces blooms.

5.3 Echelle hebdomadaire à journalière

L'intérêt principal de la mesure haute fréquence dans un écosystème comme la Seine réside dans la possibilité d'investiguer des périodes courtes avec une très bonne définition de la variation des paramètres d'intérêts.

A titre d'exemple, la Figure 21 présente l'épisode de décroissance de la biomasse algale entre le 16 et le 20 mars, qui survient au cours de l'efflorescence dont la durée de passage est de 38 jours. Le 17 mars, la biomasse et la concentration en oxygène dissous décroissent. Le 18 mars la biomasse continue de décroitre mais l'oxygène dissous montre un cycle nychtéméral visible. Le 19 mars, la biomasse poursuit sa décroissance, et la concentration en oxygène dissous ne présente plus une forme de cycle nychtémeral, mais plutôt une diminution rapide de faible intensité.

L'interprétation de ce type d'épisode à courte échelle de temps est possible en première approche par une simple correspondance temporelle avec des paramètres connus pour influencer la croissance algale comme la lumière. Ainsi le 17 mars, la journée est marquée par une courbe d'irradiance extrêmement faible en intensité, qui limite fortement voir stoppe la croissance algale. Le bilan photosynthèse respiration dans l'écosystème est déplacé du côté de la respiration, ce qui fait décroitre l'oxygène. Le 18 mars, l'irradiance solaire est faible, mais deux fois plus importante que la veille. Ce qui suffit à favoriser la photosynthèse par rapport à la respiration. En fin de journée, un événement pluvieux relativement faible survient (3mm cumulés en 4h). Cet événement est surement relié à la très légère mais rapide baisse de l'oxygène observée.

A partir du 20 mars, dès que le flux d"irradiance solaire journaliers remontent, les cycles nycthéméraux d'oxygène dissous redeviennent visibles, tandis que la décroissance de la biomasse se poursuit jusqu'au 22 mars. La croissance de la biomasse ne s'observe qu'à partir du 23 mars. Il existe donc un décalage de 3 jours entre les deux processus.

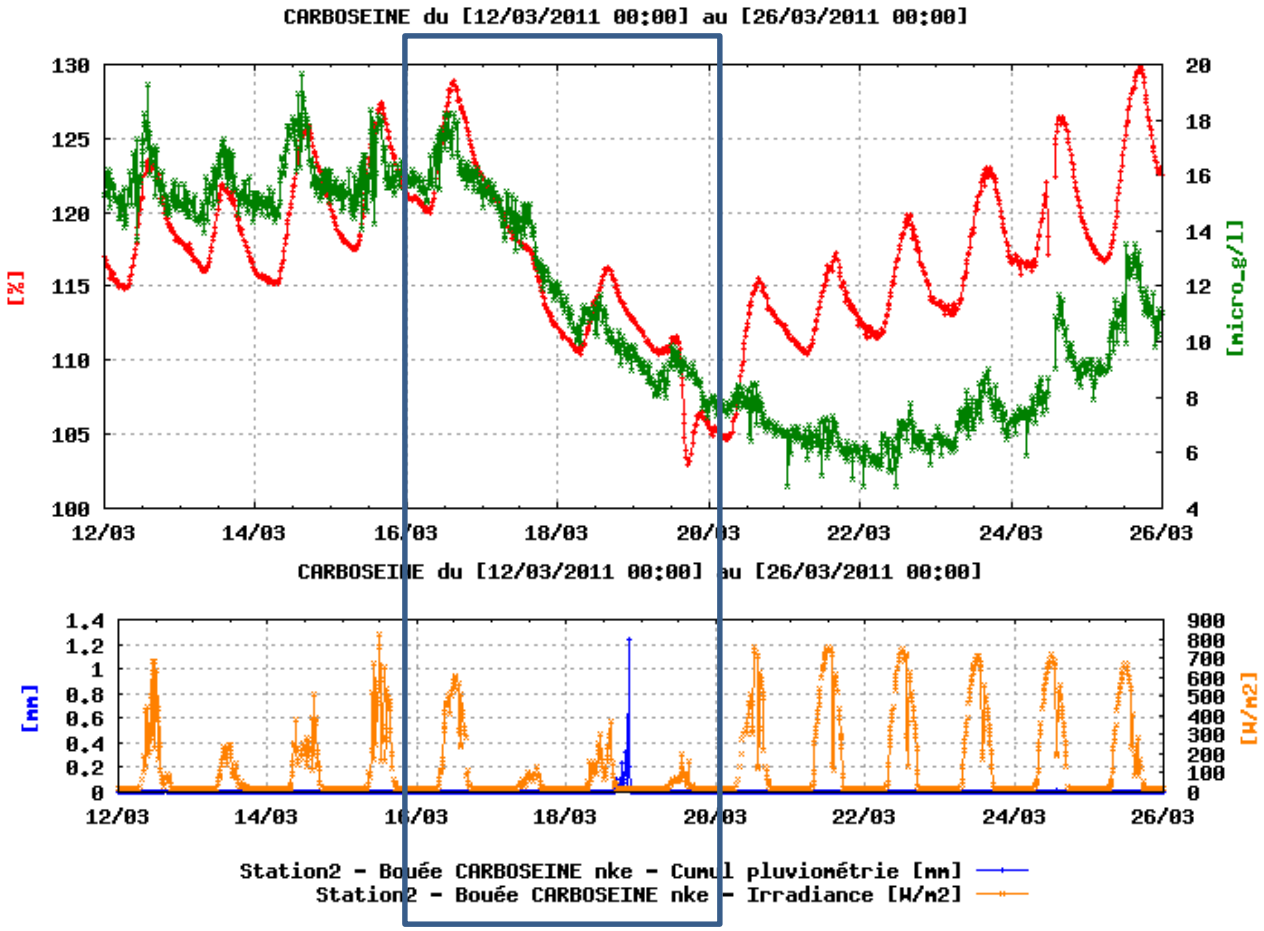


Figure 21: zoom temporel sur une partie du passage de l'efflorescence de diatomées à Bougival. Chlorophylle-a et oxygène dissous (en haut), irradiance et pluviométrie (en bas). L'encadré correspond à l'épisode discuté.

6 La mesure haute fréquence et la construction d'indicateurs

Le fonctionnement trophique de l'écosystème Seine, que l'on dénommera également métabolisme communautaire, sera entre autre appréhendé à partir des courbes de variations journalières d'oxygène dissous enregistrées par la station Carboseine (Figure 22). Cette variable globale est en effet liée à différents processus biologiques et physiques qui incluent la production primaire autotrophe, la respiration communautaire ainsi que les phénomènes d'aération/réaération et d'advection (Odum, 1956). En première approche, nous utiliserons la méthode « single station open channel » (Odum, 1956 ; Izagirre & al., 2008), à partir des enregistrements de la station de Bougival. Cette approche sera appliquée dans un premier temps sur la période d'efflorescence printanière de 2011 caractérisée par des temps secs. Les variations journalières d'oxygène, corrigées des échanges diffusifs avec l'atmosphère, permettront d'appréhender la production primaire brute et la respiration communautaire. Différentes méthodes de calcul des phénomènes de réaération seront comparées, notamment quant à leurs effets sur l'estimation du métabolisme communautaire (Aristegi & al, 2009). Les résultats de cette méthode seront confrontés aux données acquises par la méthode des chambres d'incubation in situ. Bien que controversée par certains auteurs (Odum 1956, Aristegi &al, 2010), cette dernière approche permettra de comparer les ordres de grandeur des processus considérés obtenus selon les deux méthodes.

Un autre aspect de ce travail consistera à évaluer la possibilité d'utiliser la mesure de chlorophylle a par fluorescence comme estimateur de biomasse phytoplanctonique afin de quantifier cette contribution au bilan carbone de l'écosystème Seine. Ceci constituerait de fait une alternative à l'application, aux variations d'oxygène, d'une stœchiométrie simple telle qu'énoncée dans les équations de Redfield (1963).

L'installation des 2 prochaines stations permettra une approche en 2 points amont-aval (upstream-

downstream) afin de caractériser la variabilité spatiale et temporelle des biefs de rivière considérés et d'évaluer la pertinence de l'hypothèse d'homogénéité faite quant à la méthode « single station open channel ». Les différentes échelles de temps (de la journée à l'année) associées à la variabilité du métabolisme communautaire seront explorées à partir des mesures haute résolution. Des indicateurs seront développés pour évaluer le fonctionnement trophique de l'écosystème en tenant compte des perturbations anthropiques.

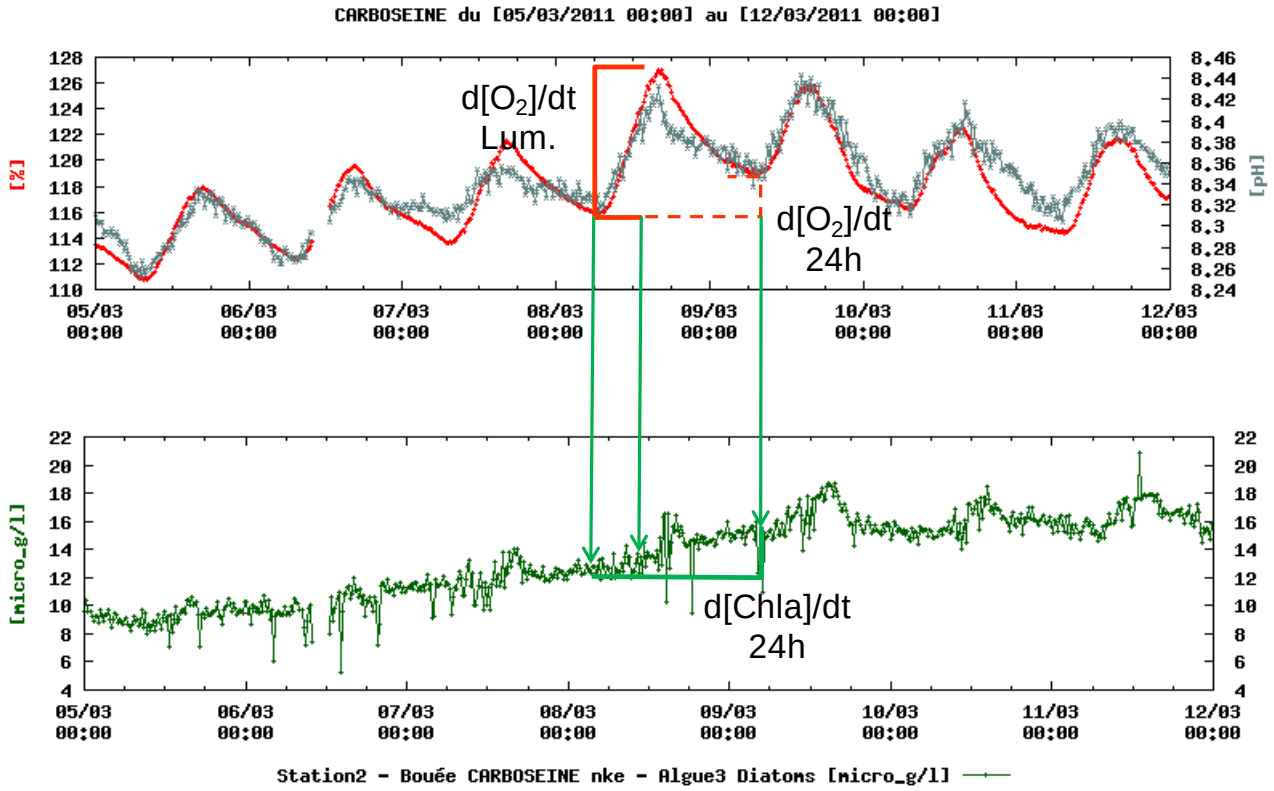


Figure 22: Construction d'indicateurs trophiques

7 Conclusions et perspectives

La première année d'acquisition en continu sur Bougival avec la station Carboseine a permis de renseigner trois parties essentielles de l'approche haute fréquence: (1) les conditions de maintenance et de métrologie des capteurs, (2) la construction de la version 1.0 du système de réception des données, de mise en base, de qualification et d'affichage graphique, (3) l'apport des observations haute fréquences à différentes échelles de temps.

Ainsi la fréquence optimale d'intervention pour les opérations de métrologie et de nettoyage des différents capteurs est estimée à 3 semaines, en dehors de disfonctionnements. L'architecture mécanique et électronique de cette première station de mesure a conduit à obtenir un taux de couverture d'acquisition des données de 80%, à l'exception du pH (55 % lié à une panne électronique), et de la turbidité (valeurs non utilisables sans ajout d'un essuie glace). La qualité des mesures est excellente pour presque tous les paramètres, c.a.d que les contrôles externes sont corrélés aux enregistrements avec une pente 1. Pour la chlorophylle, une sous estimation de la sonde rend nécessaire une correction de l'ordre de 40%, qui sera définie précisément en 2012. De même, pour le phosphate, la correction à appliquer est de l'ordre de 25%. Dans les deux cas, les corrélations sont satisfaisantes, et valident la bonne adéquation de ces capteurs avec le milieu Seine.

La version beta 1.0 de l'interface homme machine (IHM) nommée STARTmel a pu être développée, et toutes les fonctionnalités de première ordre sont opérationnelles: réception et mise en base des mails de données, affichage graphique multi paramètres, extraction des séries de données au format texte. Cette version est

considérée comme stable.

Le temps de travail sur ce bloc en 2011 a principalement été consacré aux deux premiers points cités ci dessus. L'analyse fine des données n'a donc pas pu être réalisée. En revanche, l'exploitation rapide de ces premières observations démontrent le potentiel scientifique et opérationnel de ce type de mesures. L'échelle temporelle des processus élémentaires dans l'écosystème est documentée de manière robuste. Les efflorescences algales, et leur couplage avec les cycles de l'oxygène, du pH, de la lumière et des nutriments ont pu être appréciés de l'échelle saisonnière à l'échelle horaire.

Pour l'année 2012, les actions du bloc BHR peuvent être différenciées de la manière suivante: (a) déploiement des deux stations de mesures sur Andrésy et Suresnes avec transfert de compétence à la maintenance et à la métrologie vers l'équipe ODES du SIAAP ; (b) tests de deux nouveaux capteurs pour la mesure de la quantité et de la qualité de la matière organique dissoute d'une part, et de la granulométrie des M.E.S d'autre part ; (c) définition des indicateurs du fonctionnement trophique à partir des mesures hautes fréquence par paire de station et identification des facteurs de contrôle à courte échelle de temps, (d) début du couplage entre mesure haute fréquence et modélisation ProSe.

8 Bibliographie

AFNOR. 1999. Water Quality - Determination of Chlorophyll a and Pheopigments index. Molecular Absorption Spectrometric method. NF T90-117, 12pp.

AFNOR. 2006. Water Quality – Guidance standard on the enumeration of phytoplankton using inverted micrsocopy (Utermöhl technique). NF EN 15204_T90-379, 42pp.

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

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

NF-EN ISO 10304-1. qualité de l'eau Dosage des ions fluorure, chlorure, nitrite, othophosphate, bromure, nitrate & sulfate dissous. 06-95.

Beutler M., Wiltshire K.H., Meyer B., Moldaenke C., Lüring C., Meyerhöfer M., Hansen U.-P., Dau H., 2002. A fluorometric method for the differentiation of algal populations in vivo and in situ. Photosynthesis Research, 72 : 39-53.

Downing J. 2008. Effects of fouling on the Lens of OBS Sensors. Application Note, Campbell Scientific, Inc. 4pp.

Garnier J., Billen G., Coste M. (1995). Seasonal sucession of diatoms and Chlorophycae in the drainage network of the Seine River: oObservations and modelling. Limnol. Oceanogr. 40(4):750-765.

Gélabert A., Groleau A., Ihaddadene R., Jouvin D., Pepe M., Gaillard A., Cordier L.,Benedetti M.F. (2009) Spéciation des métaux lourds en Seine. Rapport Piren Seine

Grasshoff K. 1983. Determination of oxygen. In ; Methods of seawater Analysis. 61-72 (Eds) Grasshoff K., Ehrhardt M., Kremling K. Verlag Chemie, Weinheim, Germany, 600pp 75-89.

Gregor J., Maršalek B., 2004. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. Water Research, 38: 517-522.

Groleau A., Harrault L., Viollier E., Gaillard A., Pepe M., et Benedetti M.F. (2008) Variabilité temporelle du pH et du système CO2 carbonate dans la Seine à Paris. Rapport Piren Seine.

Izagirre O., Agirre U., Bermejo M., Pozo J., Elosegi A., 2008. Environmental controls of whole-stream metabolism identified from continuous monitoring of Basque streams. J. N. Am. Benthol. Soc, 27(2) : 252-268.

Leitao M., Couté A., 2005. Guide pratique des Cyanobactéries planctoniques du Grand Ouest de la france. Ed. Agence Eau Seine-Normandie, 63pp.

Mailler, R. 2011. Déploiement et validation de stations de mesure de la qualité de la Seine. Rapport de stage. Direction du Développement et de la Prospective U.R. 3, Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne. 80pp.

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

Redfield A., Ketchum B. and Richards F. 1963. The Seas. Ideas and Observations on the progress in the study of seas. The composition of the sea water comparative and descriptive oceanography, Chapter The influence of organisms on the composition of sea-water. 26-77, Interscience Publishers.

Sun J. & Liu D. 2003. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. Journal of Plankton Research, 25: 1331-1346.

Winkler L.W. (1888) Die besistimmung des in wasser gelosten sanerstoffen. Berichte der deutsche chemischen geschlschaft, 21: 2542-2855.