ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/272498258

Qualité de l'eau de la Durance à St Chamas – Les apports en nutriments et en matières en suspension de la centrale hydro-électrique à l'étang de Berre

Article *in* La Houille Blanche · June 2014

DOI: 10.1051/lhb/2014030

CITATIONS
0

READS
238

5 authors, including:



Emma Gouze
Électricité de France (EDF)
16 PUBLICATIONS **145** CITATIONS

SEE PROFILE



Patrick Raimbault
Aix-Marseille Université
191 PUBLICATIONS **5,474** CITATIONS

SEE PROFILE



Pietro Bernardara
Électricité de France (EDF)
60 PUBLICATIONS **1,016** CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Berre Lagoon View project

PNEC - "Programme National d'Environnement Côtier" View project

All content following this page was uploaded by Emma Gouze on 02 March 2015.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

DOI 10.1051/lhb/2014030 La Houille Blanche, n° 3, 2014, p. 64-76

Qualité de l'eau de la Durance à St Chamas - Les apports en nutriments et en matières en suspension de la centrale hydro-électrique à l'étang de Berre

Emma GOUZE[1], Laurent MARTIN[1], Philippe GOSSE[1], Patrick RAIMBAULT[2], Pietro BERNARDARA[1]

[1.] *EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement, 6 quai Watier, BP49, 78401 Chatou, emma.gouze@edf.fr*
[2.] *Mediterranean Institute of Oceanography, Campus de Luminy, case 901, 13288 Marseille cedex 9*

RÉSUMÉ. – L'Etang de Berre est un écosystème eutrophe qui reçoit de l'eau douce et des nutriments par deux rivières et par la Durance via la centrale hydro-électrique de Saint Chamas (SC). En intégrant les variations horaires, les échantillons journaliers nous ont permis de calculer un bilan annuel représentatif des apports en nutriments : SC apporte 1085 tonnes de N total (93 % est équi-réparti entre les formes nitrates et azote organique dissous) et 30 tonnes de P total (80 % est sous forme particulaire) sur la période Octobre 2008 à Novembre 2009. La fréquence d'échantillonnage requise pour obtenir le flux annuel en N total avec une erreur de 25 % est mensuelle. Pour le flux annuel de P total, l'erreur minimale est obtenue à partir de l'échantillonnage le plus fréquent testé (i.e. hebdomadaire) mais varie entre -30 % et +60 %. Si on compile toutes les études, on observe que les apports en nutriments à la lagune ont diminué ces 2 dernières décennies. En 2006, SC représente 50 % et 14 % des apports allochtones en N total et P total respectivement. Les sources diffuses et atmosphériques et la labilité des fractions organique dissoute et particulaire restent à préciser.

Mots-clés : eutrophisation, nutriments, bilans annuels, calcul flux, Etang de Berre, Durance

Water quality of the Durance river at St Chamas - Hydro-electric power plant nutrients and suspended matter annual discharge into the Berre Lagoon

ABSTRACT. – The Berre lagoon is a eutrophic ecosystem that receives freshwater and nutrients from two rivers and from the Durance river via Saint Chamas hydro-electric power plant (SC). Integrating hourly variations, daily sampling enables to calculate a representative annual nutrients flux: SC brings 1085 tons of Total N (93% are equally NO3 and DON) and 30 tons of Total P (80% is particulate P) from October 2008 to November 2009. Then the data set was resampled by randomly extraction of weekly, biweekly and monthly data to calculate annual nutrients flux. The frequency of water quality surveys required to obtain a Total N annual flux with close to 25% precision is one per month. Maximum precision on Total P annual flux ranges between -30% and +60% from a weekly sampling. Global nutrients discharges are lower than those estimated 2 decades ago. In 2006, SC brought 50% and 14% of allochthonous annual discharge of Total N and Total P respectively. Atmospheric and non-point sources and bioavailability of dissolved and particulate organic matter need to be assessed.

Key-words: eutrophication, nutrients, annual budgets, fluxes, Berre Lagoon, Durance.

I. INTRODUCTION

L'Etang de Berre est une des plus grandes lagunes méditerranéennes. Elle reçoit de l'eau douce et des nutriments de tributaires naturels qui drainent des bassins versants fortement anthropisés. Depuis 1966, elle reçoit, en plus, l'eau douce et les nutriments d'un tributaire artificiel : la centrale hydro-électrique de Saint Chamas (SC) [Houille Blanche, 1963] devenue le principal tributaire de la lagune [Minas, 1973 ; Arfi, 1989 ; Gouze *et al.* 2008]. En conséquence, l'Etang de Berre est devenu une lagune particulièrement instable, présentant d'importantes variations de la salinité (2 à 30 psu) en fonction des besoins saisonniers en électricité [Minas, 1976a ; Kim, 1988 ; Arfi, 1989]. Les nutriments apportés à la fois par les rivières et la centrale hydro-électrique ont conduit à d'importants blooms phytoplanctoniques colorant les eaux, et à un développement massif de macroalgues. La stratification haline a favorisé les anoxies [Minas, 1976b ; Nérini *et al.* 2000], et a conduit à la disparition du benthos [Stora *et al.* 1983]. Des modifications sur les herbiers de *Zostera sp.* ont également été observées [Bernard *et al.* 2007].

Afin de mieux comprendre les processus biogéochimiques en jeu dans l'eutrophisation de l'Etang de Berre, la première étape est d'identifier, qualifier et quantifier les sources en nutriments. Gouze *et al.* (2008) ont ciblé leur étude sur les tributaires naturels : les apports en nutriments par les rivières ont été suivis à haute fréquence avec une stratégie particulièrement adaptée aux crues. En effet, ces événements brefs et violents de montées des eaux participent significativement au bilan annuel des apports dans le contexte du climat aride méditerranéen [Fiandino et Martin, 2004 ; Meybeck *et al.* 2003]. Le GIPREB (Groupement d'Intérêt Public pour la Réhabilitation de l'Etang de Berre) a aussi initié la liste

des sources directes en nutriments pour la lagune (stations d'épuration, industries, eaux de ruissellement, etc). Le principal tributaire de la lagune, c'est-à-dire la centrale hydro-électrique, a fait l'objet de plusieurs suivis (Réseau National des Bassins www.eaurmc.fr, [Minas, 1973 ; Arfi, 1989 ; Gosse *et al.* 2000 ; Gouze *et al.* 2008]). La grande hétérogénéité dans la stratégie d'échantillonnage (conditionnement des échantillons ; période de l'année et durée de l'expérimentation ; fréquence d'échantillonnage, etc) et les protocoles de mesures rendent la quantification des apports en azote et en phosphore discutables [Gouze *et al.* 2008].

Les buts de cette étude sont donc : de mesurer avec des techniques adéquates, les concentrations en N et P de l'eau apportée par la centrale à la lagune ; d'établir un bilan représentatif des apports annuels en N et en P à la lagune et de proposer des intervalles de confiance aux bilans annuels en fonction de la fréquence d'échantillonnage. A plus large échelle, ces résultats sont nécessaires à une meilleure compréhension des processus biogéochimiques dans l'Etang de Berre.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

II.1. Zone d'étude

II.1.1. L'Etang de Berre

L'Etang de Berre est situé au Sud-Est de la France (43°30'N et 5°10'E) (figure 1). C'est une lagune semi-fermée

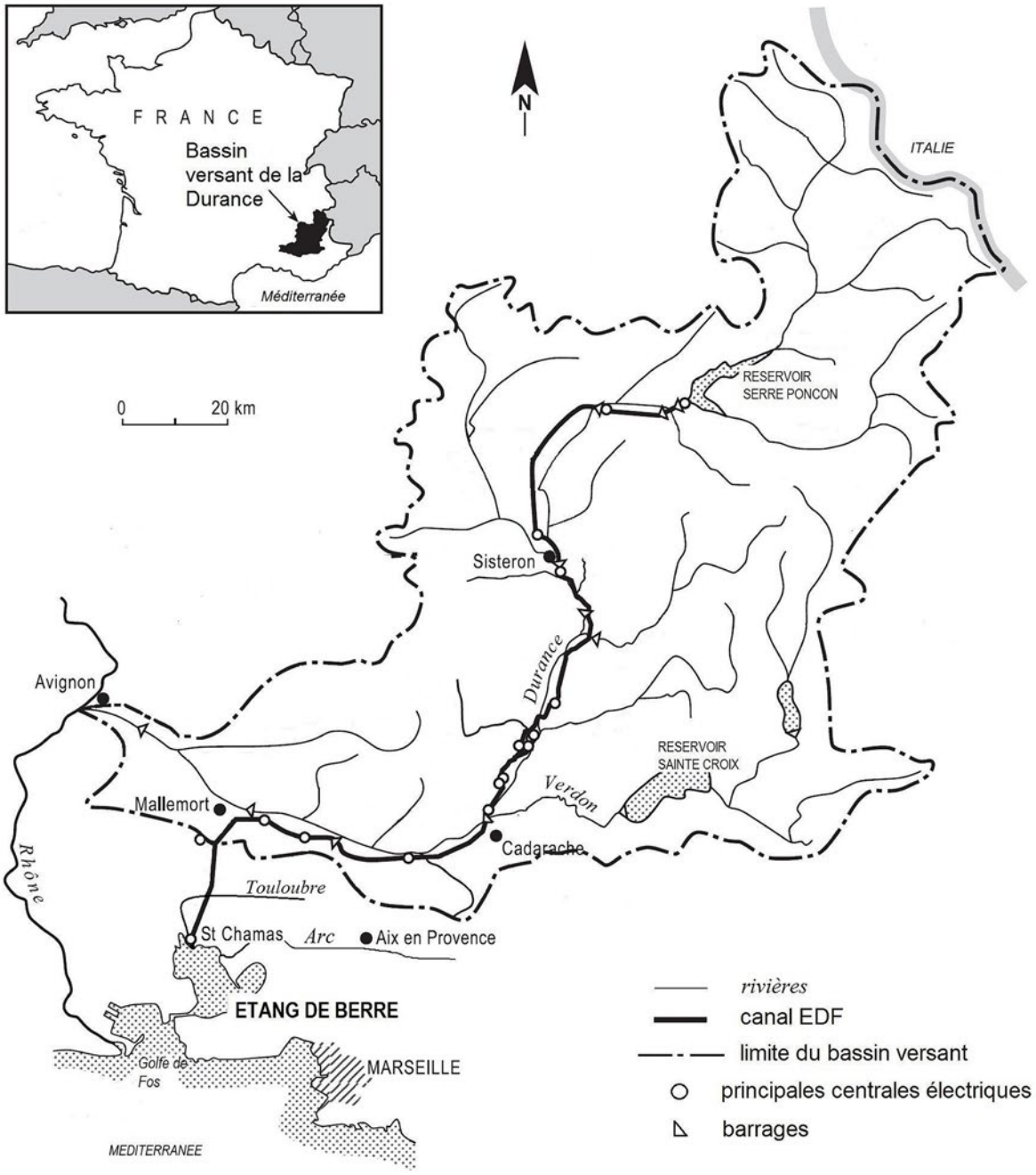

Figure 1 : ***L'Etang de Berre et le bassin versant de la Durance.*** *L'Etang de Berre reçoit de l'eau douce de 2 rivières (Arc et Touloubre), et de la centrale hydro-électrique de Saint Chamas qui termine la chaîne hydro-électrique Durance-Verdon [Houille Blanche 1963, modifié].*

(profondeur moyenne de 6.5 m). Sa surface est de 155 km². Son seul lien avec la mer Méditerranée avoisinante se fait au sud-ouest de la lagune, par le canal de Caronte. L'Etang de Berre reçoit l'eau douce de deux tributaires naturels au Nord : l'Arc et la Touloubre. Chaque rivière présente un débit moyen journalier proche de 3 m^3/s (www.hydro.eaufrance.fr). Le bassin versant naturel (environ 1500 km²) est occupé par 600000 habitants et par des zones urbaines, industrielles et commerciales (raffineries pétrolières, aéronautique) supportant les principales activités économiques de la région. De plus, l'Etang de Berre reçoit de l'eau douce de la centrale hydro-électrique de Saint Chamas (SC) au Nord, depuis 1966.

II.1.2. La centrale hydro-électrique de Saint Chamas

L'eau douce qui parvient à l'Etang de Berre par la centrale SC provient de la chaîne hydraulique « Durance-Verdon » qui fait près de 250 km de long (figure 1). Les rivières Durance et Verdon, drainent un bassin versant de 13000 km². Elles ont été fortement aménagées depuis le milieu du XXème siècle [Houille Blanche, 1963]. La construction de barrages en amont a généré deux réservoirs de tête : le lac de Serre-Ponçon sur la Durance et le lac de Sainte Croix sur le Verdon, dont la capacité utile est de 1000 et 300 millions de m^3 respectivement. L'eau est utilisée pour produire de l'électricité (énergie hydraulique) mais sert également à l'agriculture, à la consommation d'eau potable et permet aux activités touristiques de se développer notamment autour des grandes retenues. A partir des barrages, les eaux sont transportées via un canal sur lequel se succèdent une vingtaine d'usines hydrauliques. L'énergie potentielle de l'eau est utilisée tout le long de la chaîne, pour produire 7 milliards de kWh/an en moyenne, soit 10 % de l'énergie hydraulique française. Au niveau de Mallemort, le canal est détourné vers le Sud et l'Etang de Berre, où l'eau traverse encore 3 usines. La dernière usine de la chaîne est l'usine de St Chamas (SC). L'eau douce parvient à l'Etang de Berre lorsque la chaîne de production est en route (débit maximal : 250 m^3/s). Dans le cas où la chaîne de production est arrêtée, l'eau ne parvient pas à la lagune : le canal reste en eau, mais l'eau suit son lit naturel à partir de Mallemort et rejoint le Rhône. L'aménagement hydro-électrique modifie l'hydrodynamisme et la dynamique sédimentaire de la rivière [e.g. Lefort et Chapuis, 2012], mais ne produit pas de substances polluantes.

Afin de limiter les impacts des apports de la centrale hydro-électrique de Saint Chamas sur l'Etang de Berre, des quotas de rejets ont été imposés à Electricité de France. En 1993, les apports annuels autorisés sont fixés à $2,7 .10^9$ m^3 d'eau douce et à 200 000 tonnes de MES par le Plan Barnier. Ces quotas sont revus à la baisse en 1995 (eau douce limitée à $2,1 .10^9$ m^3 par an), puis en 1999 (MES limitées à 100 000 tonnes par an). En 2005, suite à un contentieux européen, l'apport maximal en eau douce autorisé est réduit à $1,2 .10^9$ m^3 par an et à 60 000 tonnes de MES par an. La période de comptabilisation des apports règlementaires se fait du 1er novembre de l'année n au 31 octobre de l'année n+1.

II.2. Stratégie d'échantillonnage

Une première expérimentation a été menée pendant une journée au cours de l'été (25 Août 2008), lorsque la centrale était en fonctionnement. Afin d'évaluer les variations horaires des concentrations en nutriments dans l'eau turbinée, nous avons échantillonné environ toutes les heures avec un seau, en aval des turbines. L'eau est collectée dans des flacons en polycarbonate (Nalgene 500 ml) et stockée dans des glacières, en attendant d'être traitée au laboratoire.

La deuxième expérimentation a duré un an, de Novembre 2008 à Octobre 2009. Un préleveur automatique (modèle ISCO) est installé dans la centrale. Il contient 4 bidons en polycarbonate (de 10 litres chacun) dans une enceinte réfrigérée (4°C). L'eau est échantillonnée en aval des turbines. Un prélèvement de 250 ml est réalisé au bout d'une heure de turbinage. L'échantillonneur est programmé pour conduire l'eau vers un nouveau bidon, chaque jour, à minuit. Ainsi, chaque bidon contient un échantillon moyen journalier. Le volume maximum qu'il peut contenir est donc 24 heures x 250 ml/heure = 6 litres dans le cas d'un fonctionnement ininterrompu de la centrale. Après agitation, l'eau est collectée dans un flacon en polycarbonate (Nalgene 500 ml). Les échantillons sont stockés à l'obscurité, à 4°C, et ramenés au laboratoire pour analyse une fois par semaine. Tout le flaconnage utilisé dans l'expérimentation est rincé à l'eau déionisée et séché, afin d'éviter toute pollution.

II.3. Analyses

Pour la fraction particulaire, 100 ml d'eau sont filtrés sur membrane Whatman ® GF/C préalablement calcinée (12h à 450°C) et prépesée. Ces filtres sont séchés (24h à 60°C). La concentration en matière en suspension (MES) est calculée après pesée sur balance METTLER AE240 (précision 0,010 mg). L'azote particulaire (PN) et le phosphore particulaire (PP) sont déterminés à partir de ce même filtre par oxydation humide au persulfate [Raimbault *et al.* 1999a]. Les filtrats sont récupérés dans des flacons polycarbonate (40 ml) pour le dosage des sels nutritifs et dans des flacons en verre (Schott 40 ml) pour le dosage de l'azote total dissous (TDN) et du phosphore total dissous (TDP). Les sels nutritifs dosés sont les nitrates NO_3^-, les nitrites NO_2^-, l'ammonium NH_4^+ et les phosphates PO_4^{3-}. Les concentrations de chacun de ces nutriments seront notées NO3, NO2, NH4 et PO4 respectivement dans ce document.

Les dosages de NO3, NO2, PO4 sont effectués sur Technicon Autoanalyser ® II et III [Tréguer et Lecorre, 1975] selon les méthodes colorimétriques de [Wood *et al.* 1967] (pour NO3 et NO2) et [Murphy et Riley, 1962] (pour PO4). Les limites de détection sont de 0.140 µgN/l pour NO2, 0.310 µgP/l pour PO4, et 0.700 µgN/l pour NO3. Les concentrations en TDN et en TDP sont déterminées au moyen de l'oxydation humide au persulfate [Raimbault *et al.* 1999b].

Les échantillons destinés au dosage de l'ammonium (NH4) sont collectés dans des flacons en verre (SCHOTT 20 ml) et empoisonnés avec du chlorure mercurique $HgCl_2$. Les concentrations en NH4 sont mesurées, après filtration, par fluorimétrie [Holmes *et al.* 1999].

L'azote organique dissous (DON) et le phosphore organique dissous (DOP) sont obtenus en retranchant les formes minérales dissoutes (NO3, NO2, NH4 pour l'azote, et PO4 pour le phosphore), des formes totales dissoutes mesurées (TDN et TDP) [Raimbault *et al.* 1999a].

DON = TDN – DIN

DIN étant l'azote inorganique dissous, tel que DIN = NO3 + NO2 + NH4

DOP = TDP – PO4

L'azote total (TN) et le phosphore total (TP) sont la somme de toutes les formes : organiques, minérales, dissoutes et particulaires :

TN = TDN + PN = NO3 + NO2 + NH4 + DON + PN

TP = TDP + PP = PO4 + DOP + PP

III. RÉSULTATS

III.1. Suivi haute fréquence

Le 25 août 2008, la centrale a fonctionné de 8h à 16h. Le débit en eau douce augmente progressivement, atteint un débit maximal compris entre 120 et 140 m^3/s de 9h à 14h (figure 2a), puis diminue progressivement pour s'annuler un peu avant 16h. Les concentrations en MES augmentent de 29 à 229 mg/l, cinq heures après la stabilisation du débit maximal (figure 2a). PN augmente de 0,09 à 0,32 mgN/l et PP augmente de 0,03 à 0,12 mgP/l (figure 2b). Il existe une relation linéaire entre les MES et les formes particulaires d'azote et de phosphore, telles que : PN = 1.1 MES + 60 (n=8, r^2=0.99) et PP = 0.4 MES + 14.9 (n=8, r^2=0.94). En revanche, il n'existe pas de relation entre les concentrations en MES et le débit en eau. L'augmentation progressive des concentrations en particules peut s'expliquer par la reprise du turbinage : le débit qui augmente et la remise en circulation de l'eau du canal permet l'évacuation d'un stock de matière particulaire qui s'était préalablement accumulé au fond du canal.

La fraction dissoute minérale est moins impactée par la remise en suspension de cette matière : NO3 et NO2 montrent de faibles variations pendant toute la durée de l'expérimentation : de 0,36 à 0,41 mgN-NO3/l (figure 2c) et de 5 à 6 µgN-NO2/l) (données non présentées). PO4 est plus variable (figure 2c) (entre 4 et 9,5 µgP/l).

L'azote total et le phosphore total tendent tout deux à augmenter progressivement (figure 2d), de valeurs minimales de 0,72 mgN/l et 54 µgP/l à des valeurs maximales de 1,03 mgN/l et 145 µgP/l. Ces augmentations sont essentiellement liées à l'augmentation des concentrations des formes particulaires.

A l'exception de NO2 et NO3, on peut considérer qu'un échantillon ponctuel n'est pas représentatif des caractéristiques hydrologiques de l'eau apportée à la lagune ce jour-là. Ceci est essentiellement lié à la remise en suspension de la matière précédemment accumulée dans le canal. Dans l'objectif d'établir un bilan annuel des apports de la centrale à la lagune, un prélèvement journalier intégrant les prélèvements horaires a été réalisé afin de s'affranchir de cette potentielle variabilité horaire.

III.2. Suivi continu annuel

III.2.1. Débit en eau douce

Sur la période Novembre 2008- Octobre 2009, le débit moyen journalier de la centrale varie entre 0 m^3/s et 193 m^3/s (figure 3a). Le débit est maximal en Janvier où il atteint 120 m^3/s tout le mois. Cette importante activité est en partie liée à des travaux sur la Durance (travaux localisés en aval de Mallemort sur une digue endommagée). Afin de réaliser les travaux dans des conditions de faibles débits, il a été exceptionnellement demandé à EDF de détourner un maximum d'eau vers l'Etang de Berre. Après cet épisode de fort turbinage, les débits en eau ont été fortement réduits de Février à Avril afin de respecter les quotas imposés. La centrale s'est arrêtée totalement pendant 11 jours consécutifs (du 7 au 17 mars). Puis elle a repris son activité initiale sans montrer d'évolution saisonnière particulière.

III.2.2. Fraction particulaire

La valeur moyenne journalière de MES est de 32 mg/l et est comprise entre 0,2 et 250 mg/l indépendamment du débit. Au début de l'étude, MES varie entre 15 et 155 mg/l, puis les valeurs diminuent autour de 10 mg/l pendant le débit maximal de Janvier (figure 3a). On observe le passage d'une bouffée de matière du 22 janvier au 1er février. La valeur maximale atteint 52 mg/l le 25 janvier puis diminue à une valeur constante minimale proche de 10 mg/l qui se

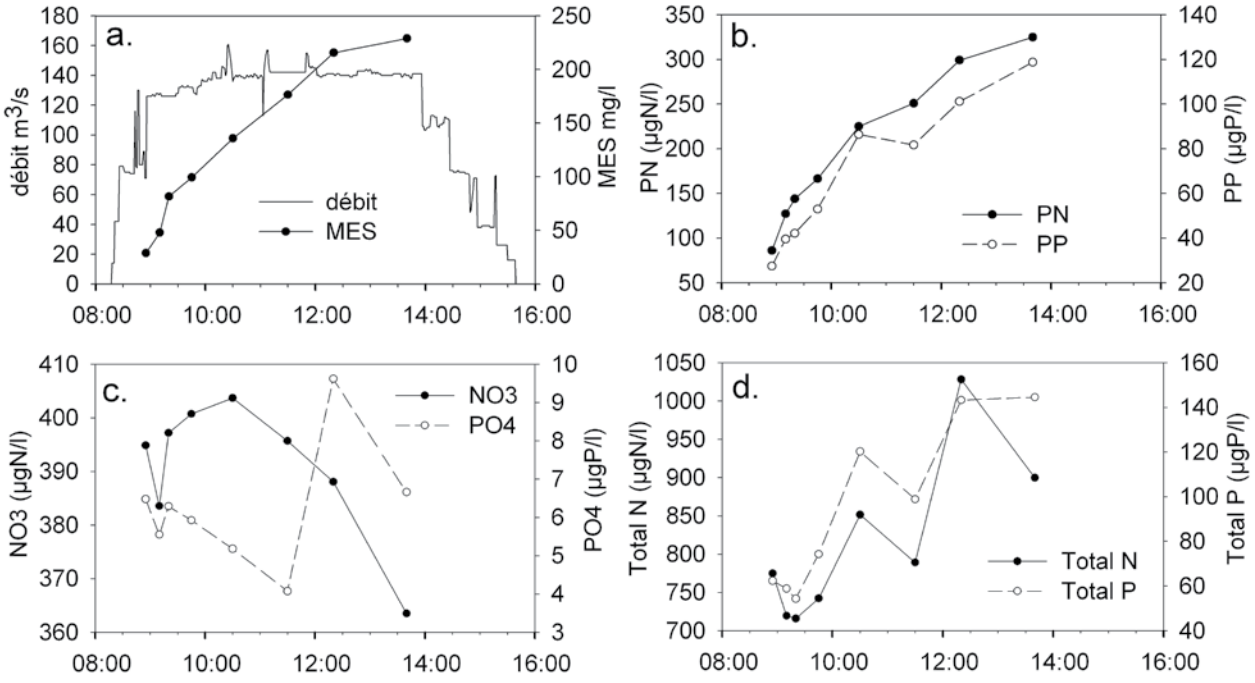

Figure 2 : ***Caractéristiques de l'eau turbinée à la centrale hydro-électrique de SC le 25/08/2008.*** *a/ Débit (en m^3/s) et concentrations en MES (en mg/l) ; b/ concentrations en azote particulaire (PN en µgN/l) et en phosphore particulaire (PP en µgP/l) ; c/ concentrations en nitrates (NO3 en µgN/l) et en phosphates (PO4 en µgP/l) ; d/ concentrations en N total (en µgN/l) et en P total (en µgP/l).*

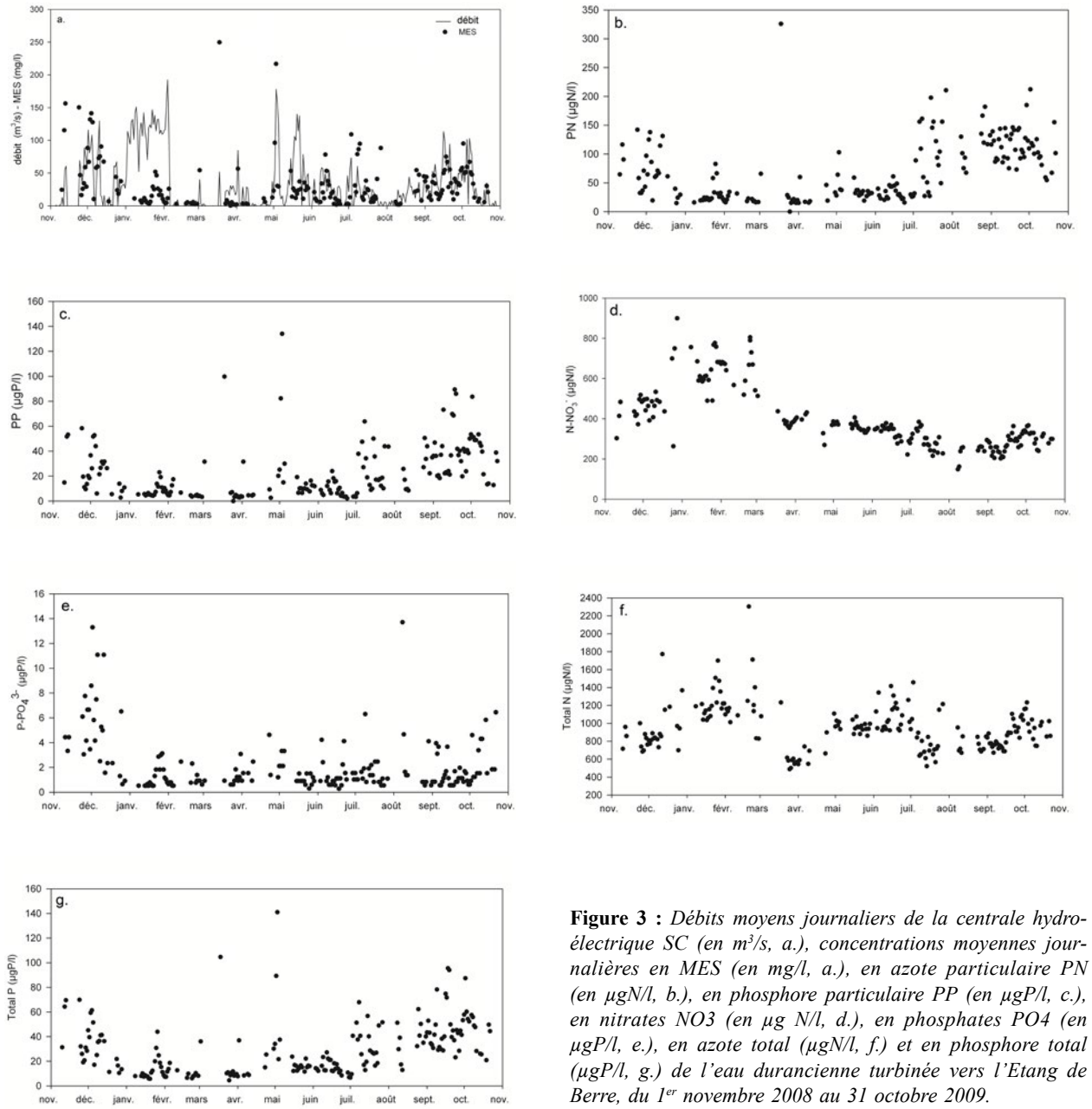

Figure 3 : *Débits moyens journaliers de la centrale hydro-électrique SC (en m³/s, a.), concentrations moyennes journalières en MES (en mg/l, a.), en azote particulaire PN (en µgN/l, b.), en phosphore particulaire PP (en µgP/l, c.), en nitrates NO3 (en µg N/l, d.), en phosphates PO4 (en µgP/l, e.), en azote total (µgN/l, f.) et en phosphore total (µgP/l, g.) de l'eau durancienne turbinée vers l'Etang de Berre, du 1er novembre 2008 au 31 octobre 2009.*

maintient jusqu'à fin avril. Il est toutefois important de noter que le maximum annuel est observé le jour de reprise de turbinage après les 11 jours d'arrêt de la centrale. Ceci pourrait s'expliquer par la remise en suspension des limons qui se sont déposés au fond du canal pendant la période d'arrêt des débits.

Les concentrations moyennes journalières en azote particulaire (PN) et phosphore particulaire (PP) sont de 68 µgN/l et 23 µgP/l respectivement (figures 3b et 3c), mais sont fortement variables (coefficient de variation de 76 % et 91 % respectivement). Les valeurs les plus faibles sont observées de mi Décembre 2008 à fin Juin 2009 : PN et PP sont relativement constantes et inférieures à 50 µgN/l et à 20 µgP/l. De Novembre à mi-Décembre 2008 puis de Juillet à Octobre 2009, PN et PP atteignent des valeurs plus élevées et plus variables (jusqu'à 210 µgN/l et 90 µgP/l). Il n'y a pas de relation avec le débit. Mais il existe une relation entre les concentrations en N et P particulaire et les teneurs en MES (figure 4). Cette relation montre une saisonnalité. On distingue 2 périodes séparées par une phase de transition de 15 jours :

— de Novembre 2008 à Juin 2009 : PN = 0.8 MES + 16.7 (r^2 = 0.78 ; n = 121)

PP = 0.4 MES +2.0 (r^2 = 0.88 ; n = 121)

— de mi-Juillet 2009 à Octobre 2009 : PN = 1.0 MES + 83.4 (r^2 = 0.34 ; n = 68)

PP = 0.8 MES + 11.4 (r^2 = 0.75 ; n = 68)

III.2.3. Fraction dissoute (organique et minérale)

La concentration moyenne en nitrate (NO3) est 394 µgN/l (figure 3d). On distingue deux périodes : de Novembre 2008 à Février 2009, les concentrations sont relativement variables et atteignent les plus fortes valeurs (entre 200 et 900 µgN-NO3/l). Puis, de Mars 2009 jusqu'à la fin de l'étude, les concentrations diminuent progressivement et sont plus stables entre 150 et 400 µgN/l. 97 % de l'azote inorganique

Tableau 1 : Bilans annuels des apports en eau, en MES et en nutriments de la centrale hydro-électrique de Saint Chamas à l'Etang de Berre pour la période Novembre 2008-Octobre 2009.

		F_{REF}
Eau douce	x 10^6 m^3	1 058
MES	tonnes	38 447
N-NH4	tonnes	4
N-NO2	tonnes	5
N-NO3	tonnes	510
P-PO4	tonnes	2
PP	tonnes	24
PN	tonnes	63
DOP	tonnes	4
DON	tonnes	504
N Total	tonnes	1 085
P Total	tonnes	30

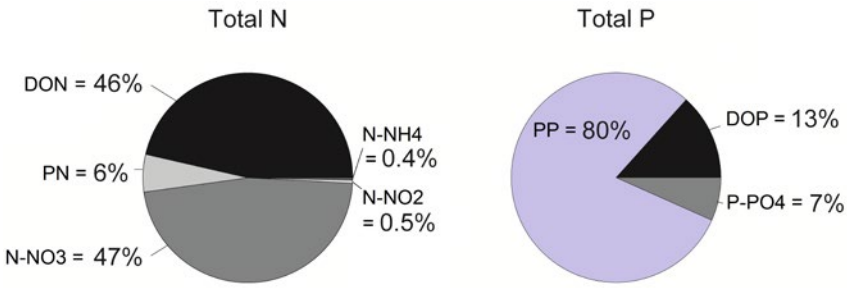

Figure 4 : ***Composition de l'azote total et du phosphore total apporté à l'Etang de Berre par la Durance via la centrale hydro-électrique de Saint Chamas*** *de Novembre 2008 à Octobre 2009. Parts relatives des formes organiques dissoutes (N-DON et P-DOP), des formes particulaires (PN et PP), et des formes minérales dissoutes (N-NO3, N-NO2, N-NH4 pour l'azote et P-PO4 pour le phosphore), en %.*

dissous est sous forme NO3. En effet, les concentrations en nitrite (NO2) et ammonium (NH4) sont très faibles : la valeur moyenne journalière de NO2 est de 5 µg N-NO2/l et les concentrations de NH4 sont globalement toutes inférieures à 0,7 µgN-NH4/l. Toutefois, on observe le passage d'une pollution au cours de ce suivi : à la fin Juin 2009, les concentrations sont comprises entre 100 et 200 µgN-NH4 pendant une semaine.

La concentration moyenne journalière en phosphate (PO4) est de 2 µgP-PO4/l (figure 3e). De Novembre à mi-Décembre, les valeurs sont très instables et dépassent souvent les 2 µgP-PO4/l. Puis, de Janvier à Juin, les concentrations se stabilisent autour de valeurs plus faibles (inférieures à 3 µgP-PO4/l). A partir du début de l'été, les plus fortes valeurs (jusqu'à 14 µgP-PO4/l) sont plus souvent observées. On peut noter l'augmentation des teneurs en PO4 pendant le passage de la bouffée de matière à la fin du mois de Janvier. Mais, sur l'ensemble de l'étude, il n'est pas possible de déterminer une relation entre les teneurs en matière en suspension et les concentrations en PO4.

Le ratio N:P des formes chimiques directement assimilables par les autotrophes, est défini comme le ratio DIN : PO4. Ce rapport est très variable et atteint de fortes valeurs : en moyenne 380 ± 320. Le ratio massique nécessaire au développement phytoplanctonique s'approche théoriquement de 7,2. Les eaux de la Durance sont donc caractérisées par une limitation de la production primaire par le phosphore.

L'évolution de la fraction organique dissoute est globalement équivalente à la fraction minérale dissoute: on mesure en moyenne 470 µgN/l et 5 µgP/l, pour DON et DOP respectivement. Il n'y a pas d'évolution saisonnière. On peut aussi noter l'augmentation des concentrations pendant le passage de la bouffée de matière à la fin du mois de Janvier 2009. A la différence des formes minérales dissoutes qui peuvent être directement assimilées par les producteurs primaires, le degré de labilité des formes organiques dissoutes est peu connu.

III.2.4. Azote total et Phosphore total

Les concentrations en TN sont comprises entre 500 et 1500 µgN/l (figure 3f) et sont principalement soutenues par les teneurs en NO3 et DON. Il n'y a pas d'évolution saisonnière. Les valeurs les plus faibles sont observées à la fin du mois de Mars, alors que les plus fortes valeurs sont observées au cours de l'hiver. Les parts relatives de NO3 et de DON s'inversent au cours de l'année : de Novembre à Avril, le NO3 prédomine (56 % de TN) sur le DON (39 % de TN) ; et de Mai à Octobre, DON prédomine (55 % de TN) sur le NO3 (34 % de TN).

Les concentrations en TP sont généralement comprises entre 5 et 90 µgP/l (figure 3g). Tout au long de l'année, la phase particulaire est dominante, représentant 68 % de TP en moyenne. On peut ainsi déterminer les relations entre les concentrations en TP et MES, telles que :

— de Novembre 2008 à Juin 2009: TP = 0.4 MES + 7.7 (r^2 = 0.87 ; n = 121)

— de mi-Juillet 2009 à Octobre 2009 : TP = 0.7 MES + 22.9 (r^2 = 0.66 ; n = 68)

— pour la période totale de l'étude : TP = 0.5 MES + 14.8 (r^2 = 0.60 ; n = 189)

III.3. Estimation des bilans annuels

Afin d'estimer le bilan annuel des apports, on utilise la totalité du jeu de données (débit en eau et concentrations en nutriments) pour déterminer F_{REF}, le flux annuel en nutriments dit de « référence ». D'après [Meybeck *et al.* 1993 ; Walling et Webb 1985 ; Coynel *et al.* 2004] :

$$F_{REF} = \sum_{i=1}^{n} F_i \text{ avec } F_i = C_i Q_i$$

Avec F_{REF} le flux annuel de « référence » ; F_i est le flux journalier en nutriment ; et C_i et Q_i sont les concentrations moyennes journalières et le débit moyen journalier respectivement. n = 217 jours de fonctionnement de la centrale.

De Novembre 2008 à Octobre 2009, la centrale a déversé 1 058 x10^6 m^3 d'eau douce dans l'Etang de Berre (tableau 1). Les apports en MES sont de 38450 tonnes. Le flux annuel total en azote est de 1085 tonnes (tableau 1 et figure 4), dont 48 % est sous forme inorganique dissoute (DIN) c'est-à-dire sous forme directement assimilable par les autotrophes. NO3 est la principale forme de DIN (510 tonnes de N, soit 98 % du DIN). Les apports en NH4 et NO2 sont similaires et très faibles : 4 et 5 tonnes de N respectivement. La deuxième source de N est l'azote organique dissous (504 tonnes de N) : elle est équivalente à l'apport

en NO3. Une autre forme d'azote injectée dans la lagune est le N particulaire (63 tonnes de N). L'apport relativement faible de PN est du à la nature minérale des MES charriées par la Durance. L'apport annuel en P total est de 30 tonnes (tableau 1, figure 4). La principale forme de P apportée à la lagune est du P particulaire : 24 tonnes de PP, soit 80 % du P total. L'apport de la forme minérale dissoute représentée par PO4 et directement disponible pour les autotrophes est faible : 2 tonnes de P-PO4 soit 7 % du P total.

III.4. Simulation des bilans annuels à partir d'un échantillonnage dégradé

Les flux annuels estimés à partir de la totalité de la base de données, i.e. représentant l'estimation la plus précise à partir de nos données, sont considérées comme les flux annuels les plus représentatifs (flux de référence F_{REF}). Afin de tester l'influence de la fréquence d'échantillonnage sur le calcul d'un bilan annuel, la base de données à été dégradée. Les flux annuels ont été recalculés à partir d'un échantillonnage hebdomadaire (W), bimensuel (2/M) et mensuel (M). Les flux annuels ont été recalculées à partir de ces bases de données dégradées avec la méthode recommandée dans le cas où les concentrations en éléments ne sont pas liés au débit, et qui utilise la moyenne pondérée des concentrations ci-dessous (Meybeck *et al.* 1993 ; Moatar et Meybeck 2005) :

$$F = \overline{Q} \times (\sum_{i=1}^{n} Q_i C_i \,/\, \sum_{i=1}^{n} Q_i)$$

Avec F le flux annuel en nutriment, $\overline{Q}$ est le débit annuel en eau, C_i et Q_i sont les concentrations journalières et le débit journalier respectivement. n=12, 24 ou 52 selon si le calcul est réalisé à partir d'un échantillonnage mensuel, bimensuel ou hebdomadaire respectivement. Les bilans annuels obtenus des différentes simulations sont comparés avec les flux annuels de référence dans le but d'estimer l'erreur. On calcule les erreurs relatives (E_R en %) comme il suit :

$$E_R = (F_{SIM} - F_{REF}) / F_{REF} \times 100$$

Avec F_{SIM} le flux annuel en nutriment simulé et F_{REF} le flux annuel de référence. Chaque simulation a été répétée 1000000 de fois afin d'obtenir une information statistiquement représentative (pour chaque nutriment, pour chaque type d'échantillonnage). Des boites à moustaches ont été utilisées afin de montrer la gamme d'erreurs dans l'estimation (figure 5). L'erreur est nulle quand l'estimation de l'apport annuel à partir de l'échantillonnage dégradé est égale au flux de référence.

Pour tous les nutriments considérés, les erreurs relatives sur le calcul des bilans annuels augmentent au fur et à mesure que la fréquence d'échantillonnage est dégradée.

L'azote total tend à être sous-estimé avec la dégradation de la fréquence d'échantillonnage (figure 5a). Mais E_R est relativement faible : elle est inférieure à 5 % à partir d'un échantillonnage hebdomadaire, et est inférieure à 15 % à partir d'un échantillonnage mensuel.

Au contraire, le flux annuel en P total calculé avec un échantillonnage dégradé tend à être surestimé (figure 5b). De plus, l'erreur sur le calcul du bilan annuel en P total est supérieure à l'erreur sur le calcul en N : 90 % des simulations montrent que l'erreur est comprise entre -10 % et +40 % avec un échantillonnage hebdomadaire ; et atteint -35 % à +75 % avec un échantillonnage mensuel.

Pour NO3 (figure 5c), NO2 et DON, E_R sont relativement faibles de part la grande stabilité des concentrations et leur évolution non bruitée au cours des saisons. Le flux annuel en NO3 tend à être surestimé avec un échantillonnage hebdomadaire (erreur comprise 9 fois sur 10 entre -2 et +6 %) ;

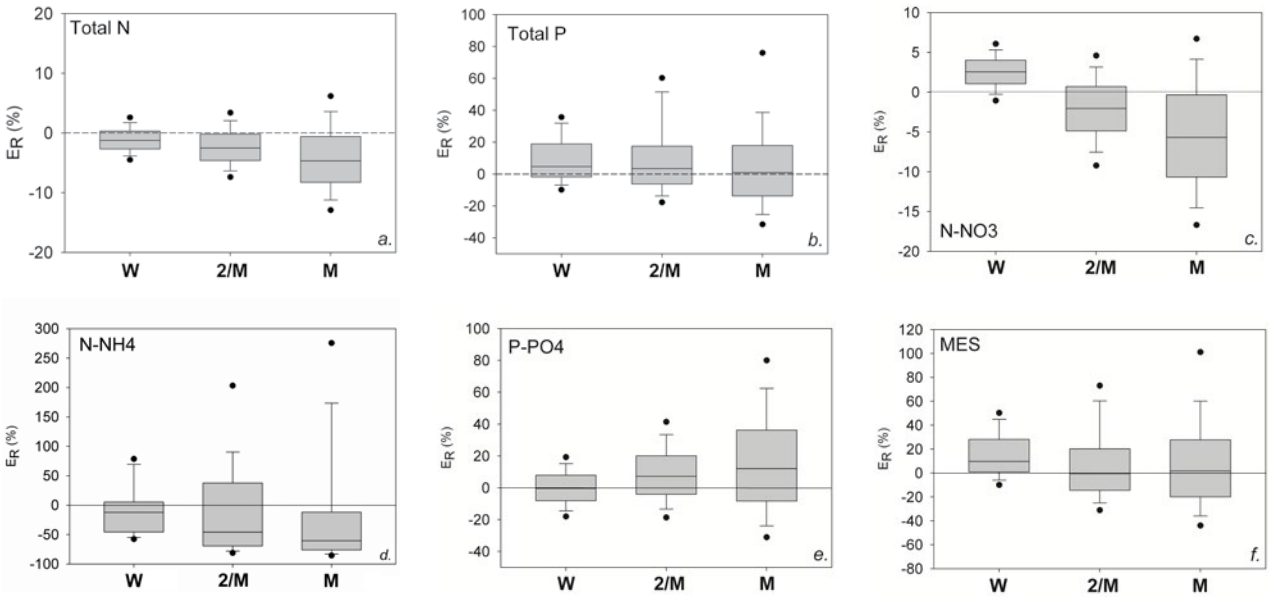

Figure 5 : ***Erreurs relatives (E_R en %) sur les bilans annuels simulés à partir d'un échantillonnage dégradé*** *(W : une mesure par mois, 2/M : deux par mois, M : une par mois). N total (a.), P total (b.), N-NO3 (c.), N-NH4 (d.), P-PO4 (e.) et MES (f.). Le niveau 0% représente le bilan annuel de référence. La ligne horizontale représente la valeur médiane des 1000000 E_R simulées pour chaque test ; la boîte grise représente les 25ème et 75ème centiles ; les barres verticales représentent les 10ème et 90ème centiles ; et les ronds noirs représentent les 5ème et 95ème centiles.*

mais il tend à être sous-estimé avec un échantillonnage plus lâche (90 % des simulations présentent une erreur comprise entre -17 % et +7 % avec un échantillonnage mensuel).

Les flux de NH4 tendent à être sous-estimés, et l'erreur varie entre -60 % et +75 % à partir d'un échantillonnage hebdomadaire, mais il peut atteindre +200 % à partir d'un échantillonnage mensuel (figure 5d). Ceci est du à l'évolution des concentrations en NH4, avec de très fortes valeurs observées pendant des événements brefs. Pour ce nutriment, un échantillonnage haute fréquence est nécessaire afin de bien cibler les événements extrêmes et faire un calcul correct de bilan annuel.

L'erreur sur le calcul de flux annuel en PO4 varie entre + ou – 20 % avec un échantillonnage hebdomadaire (figure 5e). Le flux annuel tend à être surestimé avec un échantillonnage dégradé : E_R varie entre -30 % et +80 % pour 90 % des simulations avec un échantillonnage mensuel. Les résultats sont similaires pour le DOP : 90 % des E_R varient entre -15 % à +30 % avec un échantillonnage hebdomadaire et entre -30 à +75 % avec un échantillonnage mensuel.

Si on considère les formes particulaires, l'erreur sur le calcul du flux annuel du PN est la plus faible. Elle varie (9 fois sur 10) entre -5 % à +20 % ; alors qu'elle atteint -15 % à +50 % pour le PP et les MES avec un échantillonnage hebdomadaire. L'erreur augmente lorsque la fréquence d'échantillonnage diminue : elle est comprise (9 fois sur 10) entre -30 % et +45 % pour PN et elle atteint -40 % à +90 % pour PP et -45 % à +100 % pour les MES avec un échantillonnage mensuel (figure 5f).

IV. DISCUSSION

IV.1. Caractéristiques de l'eau

Dans l'eau de la centrale, nous pouvons en première approche déterminer 2 périodes dans l'année : une période « minérale » suivie d'une période « organique ». De novembre à mai-juin, N est principalement sous forme inorganique dissoute, les concentrations en NO3 sont maximales en hiver (comme précédemment observé par Gosse *et al.* 2000) ; et de juin-juillet à octobre, N est principalement sous forme organique dissoute et les teneurs en N tendent à augmenter dans la fraction particulaire. Il n'y a en revanche pas d'évolution saisonnière claire pour le phosphore. Il n'y a pas de relation entre ces caractéristiques et l'origine amont de l'eau douce (provenance du réservoir de Serre-Ponçon ou de Sainte Croix, données non présentées).

Il est important de noter que la moitié de l'azote total porté à la lagune par la centrale est sous forme organique dissoute DON (seulement 13 % pour le phosphore). DON et DOP sont des composants qui ne sont pas complètement biodisponibles. Ils sont en partis constitués de composés inertes qui persistent sur de longues périodes (Jackson et Williams, 1985). La fraction labile de DON inclue les protéines, l'urée, les acides aminés dissous libres et combinés, les acides nucléiques (ADN, ARN), les sucres aminés et les substances humiques (Berman et Bronk, 2003) ainsi que d'autres composés non identifiés. Il n'existe pas de techniques de routine pour évaluer leur degré de labilité, bien que DON et DOP soient supposés contribuer à l'eutrophisation marine (Berman, 1997 ; Seitzinger et Sanders, 1997 ; Stepanauskas *et al.* 2002). Dans l'Etang de Berre et ses tributaires, il n'y a pas encore d'informations au sujet de la biodisponibilité de DON et DOP. Ce point pourra faire l'objet d'études ultérieures pour une meilleure compréhension et gestion de l'eutrophisation (Voss *et al.* 2011).

Nous n'observons pas de relation entre les concentrations en MES et le débit, ni entre les nutriments et le débit. Les caractéristiques hydrologiques de l'eau turbinée à Saint Chamas ne suivent pas une évolution fluviatile naturelle. Le débit naturel de la Durance et les flux sédimentaires sont modifiés par la canalisation partielle du lit et par les barrages (Lefort et Chapuis, 2012). Pendant les crues, les MES augmentent significativement dans la Durance. L'origine et la mobilité des sédiments dans la Durance font l'objet d'études spécifiques (e.g. Chapuis 2012, Juramy et Monfort 1986). Selon les besoins en électricité, les MES, et les quotas hebdomadaires et annuels imposés au niveau de SC, le gestionnaire de la chaîne de production électrique peut choisir, au niveau de Mallemort, de dériver le flux de la Durance vers la centrale de SC ou non. Pendant les périodes de faibles turbinages ou d'arrêt complet de la centrale SC, le canal usinier, dans la partie Mallemort-Saint Chamas, reste en eau mais les particules peuvent sédimenter et s'accumuler au fond du fait des faibles vitesses d'écoulement. Une augmentation des teneurs en MES au niveau de la centrale SC peut être due : à la qualité de l'eau de la Durance elle-même, ou à la remise en suspension de la matière dans le canal. En effet, à la reprise du débit dans le canal Mallemort-Saint Chamas, l'énergie turbulente est généralement assez forte pour remettre en suspension les particules préalablement accumulées. L'eau devient provisoirement chargée en particules. C'est ce que l'on observe à l'échelle horaire pendant l'échantillonnage haute fréquence du mois d'août, *i.e.* après les faibles débits estivaux (§3.1.), et à l'échelle hebdomadaire (§3.2.2).

Gosse (1988 et 1999) observe que les concentrations en NO3 sont multipliées par 2, entre le réservoir Serre-Ponçon et la centrale SC, en relation avec les apports successifs des différents confluents de la Durance. De plus, il suggère que les faibles concentrations en phosphore sont liées à la rétention au niveau des barrages. La Durance fait l'objet d'un suivi intense sur l'ensemble de son bassin versant selon les critères du SDAGE Bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Quand elles existent, les sources de dégradation sont ponctuelles, d'origine domestique et industrielle principalement (http://sierm.eaurmc.fr/sdage/atlas-bassin.php). La stratégie d'échantillonnage proposée dans cette étude n'est pas adaptée pour mettre en relation l'évolution des concentrations en nutriments du canal usinier avec les phénomènes qui se déroulent dans la totalité du bassin versant. Cependant, l'échantillonnage journalier intégrant les prélèvements horaires est parfaitement adapté pour prendre en compte ces évolutions et calculer des bilans annuels représentatifs.

IV.2. Comparaison avec les études passées

IV.2.1. Concentrations en nutriments

L'eau de la Durance turbinée au niveau de St Chamas a fait l'objet de nombreuses études dans le passé (tableau 2). Les stratégies de prélèvement et d'analyses ont varié. Alors que les études passées sont basées sur des prélèvements ponctuels, il est important de rappeler ici que, dans cette étude, les dosages sont réalisés sur des échantillons moyens journaliers (intégrant plusieurs prélèvements ponctuels). Seule notre étude propose un dosage des fractions organiques dissoutes et du P particulaire.

Les teneurs en NO3 sont relativement constantes au cours du temps : elles varient entre 400 et 500 µgN/l entre 1968

Tableau 2 : ***Concentrations en matières en suspension et en nutriments mesurées dans l'eau turbinée à la centrale hydro-électrique de Saint Chamas*** *au cours de cette étude et des études antérieures (moyenne m, écart-type s, valeurs minimales et maximales). Pour chaque étude, le nombre d'échantillons (n) et la localisation de l'échantillonnage (amont ou aval des turbines) sont spécifiés. Dans le cas particulier des données du R.N.B. (Réseau National des Bassins www.eaurmc.fr), une partie des mesures est inférieure au seuil de détection (d.l.). Sur les n = 213 échantillons, la part des mesures inférieures au seuil de détection est exprimée en pourcentage dans la colonne « min ». Les limites de détection du laboratoire du R.N.B. ont évolué dans le temps en fonction de la méthodologie utilisée : d.l.MES = 2mg/l – d.l.TP = 3 ; 10 ou 16 µgP/l – d.l.NO3 = 225 µgN/l – d.l.NO2 = 3 ; 6 ou 15 µgN/l - d.l.NH4 = 6 ; 8 ; 16 ou 36 µgN/l – d.l.PO4 = 3 ; 10 ou 16 µgP/l. La moyenne m est calculée à partir des n échantillons : pour les échantillons trop peu concentrés pour être dosés, la valeur du seuil de détection est considérée. « m » est donc majorée.*

		Minas (1973) Nov. 1968 à Feb. 1970 (n = 21 ; aval)				Kim & Travers (1997a et b) Travers & Kim (1997) Dec. 1976 à Dec. 1978 (n = 52 ; aval)				Arfi, 1989 Jan. 1985 à Dec. 1985 (n = 24 ; ?)				R.N.B, www.eaurmc.fr Jan. 1987 à Dec. 2005 (n = 213 ; amont)				Gosse et al. (2000) Juil. 1999 à Dec. 1999 (n = 12 ; amont)				Gouze et al. (2008a) Avr. 2005 à Nov. 2006 (n = 19 ; aval)				Cette étude Nov. 2008 à Oct. 2009 (n = 198 ; aval)			
		m	σ	min.	max.	m	σ	min.	max.	m	σ	min.	max.	m	σ	min.	max.	m	σ	min.	max.	m	σ	min.	max.	m	σ	min.	max.
MES	mg/l													< 52	142	<dl = 5%	1350					263	253	7	687	32	37	0.2	250
NH4	µg N/l									45	22	13	115	< 34	53	<dl = 38%	467					31	8	22	36	8	32	<0.7	209
NO2	µg N/l	6	3	4	13	6	9	2	58	10	8	3	35	< 10	14	<dl = 17%	198					35	38	2	98	5	2	2	12
NO3	µg N/l	414	128	91	609	533	381	33	2 065	407	95	176	609	< 471	138	<dl = 8%	971					388	87	188	648	394	149	149	900
PO4	µg P/l	77	71	24	279	16	19	3	104	19	22	3	87	< 20	22	<dl = 56%	150	6	3	2	10	58	54	6	200	2	2	0.3	14
PP	µg P/l																									23	21	<0.3	134
PN	µg N/l																					466	327	86	997	68	52	<0.7	326
DOP	µg P/l																									5	4	<0.3	28
DON	µg N/l																									470	206	89	1 668
Total N	µg N/l																					1 448	526	356	2 532	946	254	488	2 303
Total P	µg P/l													< 81	22	<dl = 84%	350	27	16	7	51	310	261	6	986	29	22	5	141

et 2008. Les concentrations en NH4 ont montré dans le passé, comme dans cette étude, de fortes variations entre 0 et 200 µgN/l. Pour l'azote total, seules les mesures de 2005-2006 sont disponibles, et les concentrations mesurées sont dans une gamme de valeurs équivalentes à celles de cette étude. Les premières mesures de P datent de la fin des années 80. Malgré un intense échantillonnage, le RNB n'a pas pu doser 56 % des prélèvements en PO4 et 84 % des prélèvements en P total (www.eaurmc.fr). La méthodologie utilisée n'est pas adaptée aux eaux duranciennes. Dans cette étude, une attention particulière a été portée sur ce point et nous avons dosé le P avec une technique développée et utilisée par les océanographes dans les eaux oligotrophes. Gouze *et al.* (2008) ont mesuré des concentrations en P total 10 fois plus élevées que dans l'étude de Gosse *et al.* (2000) et que cette étude. Ceci pourrait s'expliquer par la forte concentration en MES dans les échantillons (en moyenne 263 mg/l contre 32 mg/l dans cette étude).

IV.2.2. Bilans annuels

Les apports en eau douce de la centrale hydro-électrique de SC étaient en moyenne de $3{,}3.10^9$ m^3 par an entre 1966 et 1994, montrant un maximum de $6{,}5\ .10^9$ m^3 en 1977 et un minimum de $1{,}2\ .10^9$ m^3 pendant l'année sèche 1989 (figure 6a). Suite au plan Barnier fixant un quota de rejet à $2{,}1.10^9$ m^3 par an à compter de 1995 (quota annuel calculé du 1er novembre au 31 octobre), l'apport moyen annuel de la centrale est réduit en moyenne à $1{,}9.10^9$ m^3 par an sur la période 1995-2005. Puis, les apports en eau douce sont réduits à $0{,}8.10^9$ m^3 par an sur la période 2006-2009 (nouveau quota fixé à $1{,}2.10^9$ m^3 par an calculé du 1er novembre au 31 octobre à partir de 2006).

Les apports en MES ont été également fortement réduits depuis la mise en service de la centrale (figure 6b) : ils étaient de 515 000 tonnes par an sur la période 1966-1994. La construction d'un bassin de délimonage au niveau de Cadarache en 1980 a permis une première diminution nette des apports en MES. La réduction des apports annuels en MES s'est poursuivie dans les années 90 et 2000 : l'apport était en moyenne de 92 000 tonnes par an sur la période 1995-2005, puis de 49 000 tonnes par an sur la période 2006-2009 (le quota annuel est fixé à 60 000 tonnes entre le 1er novembre et le 31 octobre depuis 2006).

D'un point de vue historique, nous avons vu que les concentrations en N et P n'ont pas fait l'objet d'un suivi aussi fréquent que l'eau douce et les MES. Les premiers dosages dans la Durance ont été réalisés ponctuellement par Minas fin 1968. Les prélèvements mensuels lui ont permis d'établir un bilan annuel complet pour 1969 (Tableau 3) : elle estime que, avec un turbinage de $3{,}9\ .10^9$ m^3 (soit 3,7 fois plus qu'en 2009), la centrale apportait 1729 tonnes de N-NO3 (soit 3,4 fois plus qu'en 2009) et 303 tonnes de P-PO4 (soit 150 fois plus qu'en 2009). L'erreur sur ces bilans annuels basés sur un échantillonnage mensuel peut être estimée à partir de notre étude, même s'ils n'intègrent toutefois pas la variabilité journalière (Tableau 3) : elle est comprise entre -15 % et +5 % pour le bilan annuel de N-NO3 et entre -25 % et +60 % pour le bilan annuel de P-PO4. Pour les années 1966, 1967 et 1968, Minas extrapole ses résultats de 1969 sur les débits en eau passés disponibles. L'année du plus fort turbinage en 1977, Kim & Travers estiment un apport de 2800 tonnes de N-NO3 (soit 6 fois plus qu'en 2009 pour un apport en eau 5,5 fois plus élevé). L'apport en P-PO4 est estimé à 110 tonnes : c'est 50 fois plus que ce qu'on estime pour 2009 et c'est presque 3 fois plus faible que ce qu'estime Minas en 1969, malgré un turbinage record. Ceci est un effet direct des concentrations mesurées par Kim et Travers (Tableau 2). Romana *et al.* (1985) sont les premiers à proposer un bilan annuel pour les formes totales de N et de P à partir d'un échantillonnage mensuel : ils estiment que la centrale SC apporte

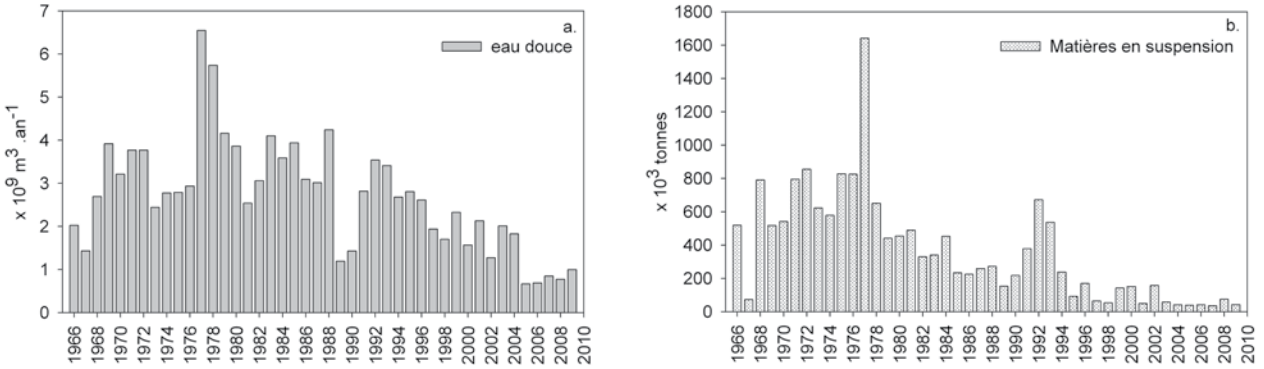

Figure 6 : ***Bilans annuels des apports a./ en eau douce (en milliards de m³ par an) et b./ en MES (en milliers de tonnes par an), par la centrale hydro-électrique SC, de 1966 à 2009.*** *Ici, les bilans annuels sont calculés à partir de données journalières sur des périodes annuelles du 1er janvier au 31 décembre. Pour rappel, les bilans annuels en eau douce et en limons soumis à quotas, non présentés ici, sont calculés du 1er novembre au 31 octobre, décret n°2006-1557).*

près de 5800 tonnes de Total N et de 430 tonnes de Total P entre août 1983 et juillet 1984, soit respectivement 5,3 et 14 fois plus qu'en 2009 pour un apport en eau 3,4 fois plus élevé et un apport en MES 10 fois plus élevé. En 2005, Gouze *et al.* (2008a) estiment les bilans annuels en N et P à partir des concentrations moyennes extrapolées sur le volume apporté en eau. En 2006, ils estiment les bilans en N et P à partir des 13 échantillons irréguliers pour calculer les bilans annuels en N et P ; or si nous utilisons ces échantillons pour estimer l'apport annuel en MES, le bilan est 4 fois plus élevé que celui proposé par EDF à partir de l'échantillonnage règlementaire quotidien (e.g. figure 6). Ceci met en évidence que les 13 échantillons de 2006 sont très chargés en MES et que le bilan annuel, au moins pour les formes particulaires et totales n'est pas représentatif de l'apport.

L'approche comparative avec les études passées reste donc très difficile de par les différences de fréquence d'échantillonnage et de méthodes de calcul. L'apport en azote (Total N) se faisant préférentiellement par voie dissoute (à 95 %), et l'apport en phosphore (Total P) se faisant préférentiellement par voie particulaire (à 80 %), on peut supposer que la réduction des apports en eau douce et en limons de la centrale hydro-électrique de SC dans l'Etang de Berre a eu pour conséquence directe une réduction des apports en nutriments.

IV.3. Comparaison avec les autres sources en nutriments

Outre la centrale hydro-électrique SC, les sources en eau douce et en nutriments pour l'Etang de Berre sont : 1/ continentales : les rivières Arc et Touloubre ont fait l'objet d'un suivi spécifique en 2005 et 2006 (Gouze *et al.* 2008a). Six stations d'épuration (STEP) et 4 industries ont un rejet direct dans la lagune : elles sont suivies par un programme d'autosurveillance (données non publiées). Les sources diffuses et les eaux de ruissellement apportent également des nutriments à la lagune : une première estimation a été réalisée par le GIPREB (données non publiées) ; 2/ atmosphérique : les apports en nutriments n'ont pas été mesurés dans la zone d'étude. Gouze *et al.* (2008b) font une estimation à partir des données de précipitations et de dépôts secs à partir de la région du Cap Ferrat (Alarcon et Cruzado, 1990 ; Sandroni *et al.* 2007). Toutefois ces 2 zones d'études méditerranéennes sont très différentes, puisque seule la région de l'Etang de Berre est sous l'influence d'un aéroport et de l'industrie pétrochimique.

Le plus grand nombre d'informations sur ces sources est disponible pour 2006 (Tableau 4). En 2006, les apports en nutriments par la centrale SC sont de 1136 tonnes d'azote total (Gouze *et al.* 2008a). On peut au moins attribuer une

Tableau 3 : ***Bilans annuels des apports en N et P par la centrale hydro-électrique de SC à l'Etang de Berre : récapitulatif bibliographique des résultats et des méthodes de calculs.*** *Les bilans annuels sont calculés sur des années civiles (c) (de janvier à décembre) ou sur des périodes annuelles soumises à quota (q) (de novembre à octobre) selon les auteurs.*

Références		Minas, 1974			Kim & Travers, 1997a et b		Romana et al. 1985	Arfi, 1989	Gosse et al. 2000	Gouze et al. 2008		Cette étude
Année		1966(c)	1967(c)	1968(c)	1969(c)	1977(c)	août 1983-juil 1984	1985(c)	1999(q)	2005(c)	2006(c)	2009(q)
Eau (EDF)	x10⁶ m³	2 023	1 429	2 691	3 916	6 545	3 633	3 938	1 356	662	689	1 058
Eau douce*	x10⁶ m³	1 904	1 424	2 691		6 300			2 100	660		
N-NO3	tonnes	840	628	1 187	1 729	2 800		1 739		264 ±25%	346	510
P-PO4	tonnes	147	110	208	303	110	144	87		40 ±83%	24	2
Total N	tonnes						5 791		2 800	924 ±36%	1 136	1 085
Total P	tonnes						436		50	198 ±100%	263	30

échantillonnage mensuel
échantillonnage bi-mensuel
échantillonnage irrégulier
extrapolation des concentrations moyennes sur débit annuel

* volume en eau douce utilisé par les auteurs pour le calcul du bilan annuel

Erreur potentielle (9/10) sur le calcul du bilan annuel

N-NO3	P-PO4	Total N	Total P
-15% à +5%	-25% à +60%	-12% à 3%	-30% à 40%
-7% à +3%	-15% à +35%	-6% à 2%	-15% à 52%

Tableau 4 : Bilan annuel des apports en N total et en P total (en tonnes) des différentes sources à l'Etang de Berre, en 2006.

	N total	P total
Centrale St Chamas	1136 [± 295]	28 [-2 ; +3]
Arc	256	49
Touloubre	251	54
STEP	68	9
Industries	114	3
Atmosphère	123	1
Ruissellement	100	60

incertitude sur ce bilan de +/- 26 % (associée à un échantillonnage mensuel). En revanche, comme 1/ le phosphore dans le canal est principalement sous forme particulaire, 2/ les concentrations en MES des échantillons de 2006 ne sont pas représentatifs pour calculer le bilan annuel des apports en MES et en nutriments particulaires (§IV.2.2), nous suggérons une meilleure évaluation du flux annuel en P total à partir des mesures quotidiennes règlementaires des MES et avec les relations saisonnières TP = f(MES) déterminées dans cette étude (§III.2.4). Nous estimons donc un apport annuel de 28 tonnes de P total en 2006. L'erreur associée à la conversion des concentrations en MES en P total peut être estimée. Soit l'erreur $\varepsilon = TP_c - TP_m$ avec TP_c la concentration en P total calculée avec les relations linéaires saisonnières TP = f(MES) et TP_m la concentration en P total mesurée. On pose l'hypothèse que ε_1 pour la première saison (de novembre à mi-juillet) suit une distribution normale de moyenne 0 et de variance 71 ; ε_2 pour la deuxième saison (de mi-juillet à Octobre) suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance 104. Pour 2006, on simule 10 000 flux annuels de P total à partir du débit moyen journalier en eau et TP_c affectée par une valeur au hasard de ε_1 ou ε_2 selon la saison considérée. La probabilité que le flux annuel de 2006 en P total soit supérieur à 31 tonnes et inférieure à 26 tonnes est de 1/10000. Donc, la conversion des MES en P total conduit à une erreur maximale de -2 à +3 tonnes de P total par an (en 2006).

En 2006, les sources identifiées ci-dessus ont porté 2050 tonnes de N total à l'Etang de Berre (Tableau 4) : environ 55 % de l'apport est lié à l'activité de la centrale hydro-électrique de SC. Les rivières représentent 25 % de cet apport annuel. Les STEP, les industries et les eaux de ruissellement ne sont pas négligeables puisqu'elles portent 280 tonnes de N. La dernière source identifiée est l'atmosphère, mais ce bilan pourrait être sous-estimé par la non prise en compte des rejets atmosphériques aéroportuaires et industriels de la zone.

La lagune reçoit environ 205 tonnes de P total : les rivières Arc et Touloubre représentent 50 % de cet apport. La deuxième source importante identifiée vient des eaux de STEP, d'industries et du ruissellement puisqu'elle représente 72 tonnes de P. La centrale hydro-électrique de SC a un apport de 28 tonnes soit 14 % de l'apport annuel identifié.

Le GIPREB a identifié 270 sources directes, provenant des réseaux pluviaux ou d'irrigation, et initie un suivi de leurs rejets afin de compléter le bilan des apports en nutriments ci-dessus.

V. CONCLUSION

En réponse à de nombreuses discussions soulevées dans les études précédentes, ce travail a permis de quantifier avec précision, les apports en N et P de la centrale hydro-électrique SC à l'Etang de Berre. L'observation des variations horaires des concentrations, déjà signalées dans le passé, nous a conduits à adapter l'échantillonnage pour calculer des bilans annuels représentatifs des apports en N et P à la lagune. Les variations saisonnières des concentrations ne suivent pas les caractéristiques fluviales théoriques parce que le lit et le débit du canal de la centrale sont artificialisés. Cependant, nous avons pu observer 2 saisons dans le pool d'azote : une saison où prédominent les formes minérales de Novembre à début Juillet, et une saison où prédominent les formes organiques le reste de l'année. Les principales formes de nutriments apportés par SC à la lagune sont sous forme dissoute pour l'azote (95 % sont NO3 et DON) et sous forme particulaire pour le phosphore (80 %). Il serait intéressant d'évaluer la labilité et la biodisponibilité de ces formes organiques dissoutes et particulaires afin de mieux comprendre leur implication dans les processus biogéochimiques de la lagune.

Nous montrons que l'erreur sur le calcul du bilan annuel augmente avec la diminution de la fréquence d'échantillonnage. Avec un échantillonnage plus léger, le bilan en NO3 et TN tend à être sous-estimé, et le bilan en PO4 et TP tend à être surestimé. Afin d'évaluer les bilans annuels avec une précision à 20 %, l'échantillonnage mensuel est suffisant pour l'azote, mais il doit être resserré à l'échelle hebdomadaire pour le phosphore.

La comparaison avec les études passées reste difficile à cause des différences dans l'échantillonnage (saison, durée et fréquence) et des méthodes de calcul, mais nous confirmons que les apports en nutriments à la lagune ont diminué ces 2 dernières décennies en relation avec la réduction des apports en eau douce et en matières en suspension par SC, mais également en relation avec la diminution des concentrations (notamment en P) dans l'eau. En 2006, la centrale hydro-électrique de SC a apporté la moitié de l'azote total allochtone et 14 % du phosphore total allochtone. Les apports par les STEP, les industries et les eaux de ruissellement contribuent à 14 % et à 35 % de ces apports annuels allochtones en N et P respectivement. Une étude approfondie sur les flux de ruissellement et les flux atmosphériques sont en cours de préparation (GIPREB, comm. pers.).

Ces résultats peuvent être utilisés pour les études qui traitent de l'eutrophisation du site. Ils peuvent également être intégrés dans un modèle d'eutrophisation qui reproduit les interactions complexes entre les processus physiques et biogéochimiques afin de comprendre les dynamiques des blooms phytoplanctoniques, des développements de macroalgues et de l'anoxie.

VI. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Julie Mosseri, Norbert Schaltenbrand et le personnel de la centrale hydro-électrique de Saint Chamas (Unité de Production Méditerranée, EDF), ainsi que Michel Fornier et Nicole Garcia (Mediterranean Institute of Oceanography) pour l'aide apportée sur le terrain et en laboratoire.

VII. RÉFÉRENCES

ALARCON M., CRUZADO A. (1990) — Particulate aerosol nutrient inputs into the North Western Mediterranean Sea, in : J.M. Martin & H. Barth (Ed.), EROS 2000 Second workshop on the North Western Mediterranean Sea. *Water Pollution Bulletin Report.* **20** 635-644

ARFI R. (1989) — Annual cycles and budget of nutrients in Berre lagoon (Mediterranean Sea, France). *Internationale revue der gesamten hydrobiologie.* **74** 29-49

SIE DU BASSIN RHONE-MEDITERRANEE — *Atlas du bassin Rhône – Méditerranée – Corse, http://sierm.eaurmc.fr/sdage/atlas-bassin.php*

BERMAN T. (1997) — Dissolved organic nitrogen utilization by an Aphanizomenon bloom in Lake Kinneret. *Journal of plankton research.* **19** 577-586

BERMAN T., BRONK D. (2003) — Dissolved organic nitrogen: a dynamic participant in aquatic ecosystems. *Aquatic Microbial Ecology.* **31** 279-305

BERNARD G., BOUDOURESQUE C.F., PICON P. (2007) — Long term changes in Zostera meadows in the Berre lagoon (Provence, Mediterranean Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* **73** 617-629

CHAPUIS M. (2012) — *Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance. Thèse de l'Université Aix-Marseille, France*

COYNEL A., SCHÄFER J., HURTREZ J.E., DUMAS J., ETCHEBER H., BLANC G. (2004) — Sampling frequency and accuracy of SPM flux estimates in two contrasted drainage basins. *Science of the Total Environment.* **330** 233-247

FIANDINO M., MARTIN C. (2004) — Flux de matières en suspension des fleuves côtiers se jetant dans l'Etang de Berre (Bouches-du-Rhône, France). *La Houille Blanche.* **4** 97-101

GOSSE P. (1988) — Description succincte de la qualité de l'eau de la Durance entre le barrage d'Espinasses et le pont de l'Archidiacre. *Electricité de France R&D (Paris) rapport n°H-E30-1988-01975-FR.* 30p

GOSSE P. (1999) — Evaluation des apports d'azote et de phosphore dans l'étang de Berre via le canal de la Durance : flux en jeu, principales sources, effets possibles sur l'eutrophisation. *Electricité de France R&D (Paris) rapport n°HP-31/99/01/A.* 27p

GOSSE P., DE VILLELE X., ROYER T. (2000) — Evaluation d'apports d'azote et de phosphore dans le bassin versant de l'étang de Berre : résultats de la campagne de mesures mai - novembre 1999. *Electricité de France R&D (Paris) rapport n°HP-71/00/02/A*

GOUZE E. (2008) — *Bilan de matière dans l'Etang de Berre – Influence des apports des tributaires et des processus de régénération dans le maintien de l'eutrophisation. Thèse de doctorat Université Aix-Marseille.* 2

GOUZE E., RAIMBAULT P., GARCIA N., BERNARD G., PICON P. (2008) — Nutrient and suspended matter discharge by tributaries into the Berre Lagoon (France): the contribution of flood events to the matter budget. *Comptes Rendus Geosciences.* **340** 233-244

GOUZE E., RAIMBAULT P., GARCIA N., PICON P. (2008) — Nutrients dynamics and primary production in the eutrophic Berre Lagoon (Mediterranean, France). *Transitional Waters Bulletin.* **2** 17-40

HOLMES R.M., AMINOT A., KEROUEL R., HOOKER B.A., PETERSON B.J. (1999) — A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* **56** 1801-1808

HOROWITZ H.J., ELRICK K., SMITH J. (2001) — Estimating suspended sediment and trace element fluxes in large river basins: methodological considerations as applied to the NASQAN programme. *Hydrological processes.* **15** 1107-1132

HOUILLE BLANCHE (1963) — L'aménagement de la Durance. http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1963038. *La Houille Blanche.* **5** 561-578

JACKSON G.A., WILLIAMS P.M. (1985) — Importance of organic nitrogen and phosphorus to biological nutrient cycling. *Deep-Sea Research A.* **32** 223-235

JURAMY S., MONFORT I. (1986) — *L'évolution des lits fluviaux, l'exemple d'une rivière aménagée : la Durance. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 2, France*

KIM K.T. (1988) — La salinité et la densité des eaux des Etangs de Berre et de Vaïne (Méditerranée Nord Occidentale). Relations avec les afférents et le milieu marin voisin. *Marine Nature.* **1** 37-58

KIM K.T., TRAVERS M. (1997) — Les nutriments de l'Etang de Berre et des milieux aquatiques contigus (eaux douces, saumâtres et marines : Méditerranée NW). 2. Les nitrates. *Marine Nature.* **5** 35-48

KIM K.T., TRAVERS M. (1997) — Les nutriments de l'Etang de Berre et des milieux aquatiques contigus (eaux douces, saumâtres et marines : Méditerranée NW). 4. Les nitrites. *Marine Nature.* **5** 65-78

LEFORT P., CHAPUIS M. (2012) — Incidence des aménagements hydro-électriques sur la morphologie des tronçons court-circuités de la Durance et du Verdon. *La Houille Blanche.* **2** 42-48

MEYBECK M., PASCO P., RAGU A. (1993) — Etablissement des flux polluants dans les rivières: pourquoi, comment et à quel prix. *4ème rencontre de l'Agence Régionale pour l'Environnement Provence Alpes Côte d'Azur. Toulon : ARPE, PACA.* 55-67

MEYBECK M., LAROCHE L., DUHRR H.H., SYVITSKI J.P.M. (2003) — Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and planetary change.* **39** 65-93

MINAS M. (1973) — *Synthèse et dégradation de la matière organique dans l'écosystème de l'étang de Berre. Dynamique et bilans. Rapports avec le régime hydrologique. Thèse de l'Université Aix-Marseille*

MINAS M. (1974) — Distribution, circulation et evolution des elements nutritifs, en particulier du phosphore mineral dans l'Etang de Berre. Influence des eaux duranciennes. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* **59** 509-542

MINAS M. (1976) — Primary organic production in a brackish eutrophic environment (Etang de Berre) – Effects of strong dilution (diversion of waters of Durance). *Marine Biology.* **35** 13-29

MINAS M. (1976) — Dissolved oxygen and saturation in medium producing high concentration of organic substances (Etang de Berre) – Role of halocline on distribution and on oxygen phosphate ratio – Concept of budget. *Hydrobiologia.* **51 1**49-162

MOATAR F., MEYBECK M. (2005) — Compared performances of different algorithms for estimating annual nutrient loads discharged by the eutrophic River Loire. *Hydrological processes.* **19** 429-444

MURPHY J. , RILEY J.P. (1962) — A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta.* **27** 31-36

NAUSCH M., NAUSCH G. (2006) — Bioavailability of dissolved organic phosphorus in the Baltic Sea. *Marine Ecology Progress Series.* **321** 9-17

NERINI D., DURBEC J.P., MANTE C., GARCIA F., GHATTAS B. (2000) — Forecasting physicochemical variables by a classification tree method. Application to the Berre Lagoon (South France). *Acta Biotheoretica.* **48** 181-196

RAIMBAULT P., POUVESLE W., DIAZ F., GARCIA N., SEMPERE R. (1999) — Wet-oxidation and automated colorimetry for simultaneous determination of organic carbon, nitrogen and phosphorus dissolved in seawater. *Marine Chemistry.* **66** 161-169

RAIMBAULT P., DIAZ F., POUVESLE W., BOUDJELLAL B. (1999) — Simultaneous determination of particulate organic carbon, nitrogen and phosphorus collected on filters, using a semi automatic wet-oxidation method. *Marine Ecology-Progress Series.* **180** 289-295

ROMANA L.A., ARNOUX A., GACHELIN S., MORI J.P., PHILIPPE-LOEILLET S., POULAILLON F. (1985) — *Etude régionale intégrée, Etang de Berre, Etude des apports limniques (Canaux et rivières), Rapport IFREMER*

SANDRONI V., RAIMBAULT P., MIGON C., GARCIA N., GOUZE E. (2007) — Dry atmospheric deposition and diazotrophy as sources of new nitrogen to northwestern Mediterranean oligotrophic surface waters. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* **54** 1859-1870

SEITZINGER S.P., SANDERS R. W. (1997) — Contribution of dissolved organic nitrogen from rivers to estuarine eutrophication. *Marine Ecology Progress Series.* **159** 1-12

STEPANAUSKAS R. , JORGENSEN N.O.G., EIGAARD O.R., ZVIKAS A., TRANVIK L.J., LEONARDSON L. (2002) — Summer inputs of riverine nutrients to the Baltic Sea: bioavailability and eutrophication relevance. *Ecological Monographs.* **72** 579-597

STORA G., ARNOUX A. (1983) — Effects of large freshwater diversion on benthos of a Mediterranean lagoon. *Estuaries.* **6** 115-125

TRAVERS M., KIM K.T. (1997) — Les nutriments de l'Etang de Berre et des milieux aquatiques contigus (eaux douces, saumâtres et marines : Méditerranée NW). 1. Les phosphates. *Marine Nature.* **5** 21-34

TREGUER P., LECORRE P. (1975) — *Manuel d'analyses des sels nutritifs dans l'eau de mer (Utilisation de l'Autoanalyser II) Laboratoire de Chimie Marine, Université de Bretagne Occidentale, Brest*

VOSS M., DIPPNER J.W., HUMBORG C., HÜRDLER J., KORTH F., NEUMANN T., SCHERNEWSKI G., VENOHR M. (2011) — History and scenarios of future development of Baltic Sea eutrophication. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* **92** 307-322

WALLING D.E., WEBB D.W. (1985) — Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers (*Marine Pollution Bulletin.* **16** 488-492

WOOD E. D., ARMSTRONG F.A.J., RICHARDS F.A. (1967) — Determination of nitrate in sea water by cadmium copper reduction to nitrite. *Journal of the Marine Biological Association of the UK.* **47** 23-31

View publication stats