Métabolisme des annexes hydrauliques des corridors hydro-écologiques – des casiers Girardon du Rhône aux gravières de la Bassée

Sophie Guillon[1]*, Didier Jézéquel[2], Nicolas Flipo[1], Pierre Marmonier[3], Evelyne Franquet[4], Maxine Thorel[4], Antonin Vienney[3], Benjamin Oursel[4], Jean-Michel Olivier[3], Jean-Jacques Bourrand[2], Alexis Groleau[2]

[1] MINES ParisTech, PSL ResearchUniversity, Centre de Géosciences, 77300 Fontainebleau, France.
[2] Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Univ Paris Diderot, UMR 7154 CNRS, F-75005 Paris, France
[3] Université Lyon 1, UMR CNRS 5023 – LEHNA, 69622 Villeurbanne Cedex
[4] Aix Marseille Univ, Univ Avignon, CNRS, IRD, IMBE, Marseille, France.
*sophie.guillon@mines.paristech.fr

Résumé

Le fonctionnement biogéochimique des annexes hydrauliques des plaines alluviales, et plus particulièrement le cycle du carbone et les flux de CO_2, sont encore assez mal connus et mal pris en compte dans les bilans de gaz à effet de serre. Un dispositif de mesure et un outil de quantification du métabolisme sont développés.

À partir d'un dispositif de mesure en continu mis en place dans des « casiers Girardon » du Rhône, au sud de Lyon, les chroniques haute-fréquence d'oxygène dissous et de température permettent de quantifier le métabolisme et sa variabilité spatiale et temporelle (collaboration ZA Seine - ZA Bassin du Rhône). Dans ces casiers, plus ou moins connectés avec le fleuve, des types de fonctionnement divers peuvent se développer, auto ou hétérotrophes, avec des zones d'anoxie en profondeur, pouvant aller jusqu'à la dénitrification.

Un dispositif de suivi du métabolisme est en cours d'élaboration dans les gravières de la plaine alluviale de la Bassée, en amont de Paris. Les mesures haute fréquence d'oxygène dissous et de température sont associées à celles du CO_2 dissous, ainsi qu'à des mesures ponctuelles des flux de gaz CO_2 et CH_4 à l'interface eau-atmosphère. Les résultats préliminaires dans une gravière de la Bassée révèlent une stratification thermique et chimique de la colonne d'eau en été : une forte activité autotrophe en surface est associée à un flux net de dissolution du CO_2 atmosphérique. En profondeur, le milieu est anoxique et réducteur, avec une production de méthane qui dégaze en partie en surface.À l'automne, la colonne d'eau s'homogénéise, le fonctionnement devient hétérotrophe. La variabilité temporelle, mais aussi spatiale, du métabolisme et des flux de CO_2, devra être considérée avant d'être intégrée dans les bilans globaux.

1 Calcul du métabolisme par la méthode des courbes journalière

1.1 Métabolisme : définition et méthodes de quantification

Le métabolisme d'un écosystème est déterminé par les réactions de production et de consommation de matière organique. On distingue ainsi la production primaire (GPP, Gross Primary Production), conversion autotrophe du carbone inorganique en carbone organique, et la respiration (ER, Ecosystem Respiration), oxydation de C organique en C inorganique, par les voies autotrophe ou hétérotrophe. La NEP (Net Ecosystem Production), différence entre GPP et ER, représente la balance globale entre tous les processus d'anabolisme et de catabolisme.

Plusieurs méthodes ont été utilisées depuis le XIX^{ème} siècle pour quantifier le métabolisme des écosystèmes aquatiques (Staehr et al., 2010), avec des échelles spatiales et temporelles variables, et chacune avec des limites. Les premières mesures directes étaient réalisées dans des chambres d'incubation, à la lumière ou

dans l'obscurité. Les méthodes basées sur la variation journalière des teneurs en O_2 ou CO_2 dissous (Odum, 1956) ont ensuite vraiment donné accès au métabolisme in situ. Plus récemment, ces méthodes se sont élargies au suivi de la variation des isotopes $^{18}O/^{16}O$ dans O_2. Récemment, des approches couplant les chroniques d'oxygène dissous et des approches stochastiques ont été proposées (Cremona et al., 2014), qui considèrent plus spécifiquement les incertitudes sur le métabolisme.

La méthode utilisée ici est celle des courbes journalières en O_2, décrite dans (Needoba et al., 2012) et (Escoffier, 2014; Escoffier et al., 2016), et illustrée en Figure 1, et qui repose sur le suivi temporel des concentrations en oxygène dissous. Cette méthode présente l'avantage de fournir un suivi quasi continu du métabolisme, et donc d'en étudier la variabilité à l'échelle saisonnière.

(Staehr et al., 2012) présente une revue détaillée de l'application de la méthode des courbes journalière pour la détermination du métabolisme des lacs.

1.2 Méthode des courbes journalières d'oxygène dissous

Le bilan de matière de l'oxygène dans la colonne d'eau est réalisé à l'échelle journalière (Figure 2) :

- production d'oxygène due à l'activité photosynthétique pendant la période éclairée,

- consommation d'oxygène due à la respiration (hétérotrophe en permanence, autotrophe en période éclairée),

- apport ou dégazage d'oxygène en surface pour tendre à l'équilibre de saturation en oxygène avec l'atmosphère.

L'équation qui régit l'évolution de la concentration en oxygène dissous s'écrit ainsi :

$$\frac{d[O_2]}{dt} = GPP(t) + ER(t) + k_{rea} \cdot \{[O_2]_{sat}(T) - [O_2]_t(t)\} \qquad (1)$$

où dO_2/dt est la dérivée temporelle de la concentration en oxygène mesurée (en mg L^{-1} $jour^{-1}$), GPP (resp. ER) la production primaire (resp. la consommation par la respiration) (en mg $L^{-1}jour^{-1}$), k_{rea} est la constante de ré-aération en (m $jour^{-1}$), $O_{2\ sat}$ la teneur en oxygène à saturation à la température T (en mg L^{-1}), O_2 la concentration mesurée en oxygène dissous (en mg L^{-1}).

Tous les flux sont comptés algébriquement: les flux d'oxygène négatifs correspondent à une consommation ou un export d'oxygène depuis le compartiment considéré, les flux positifs à un apport. La Figure 1 représente l'évolution théorique de O_2 et de dO_2/dt.

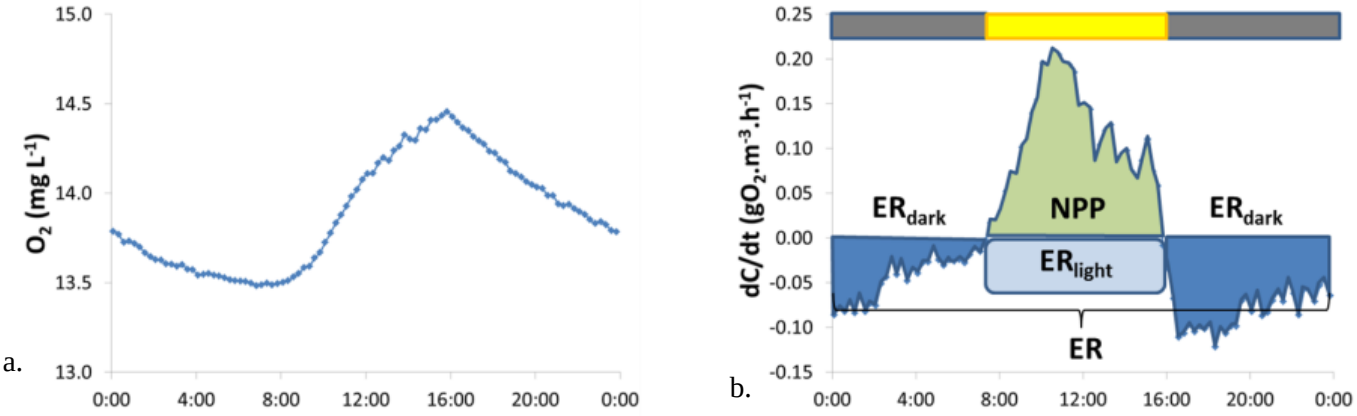

Figure 1 : Exemple d'évolution journalière de la concentration en O_2 dissous (à g.), et contributions de la respiration et de la production primaire au bilan d'O2.

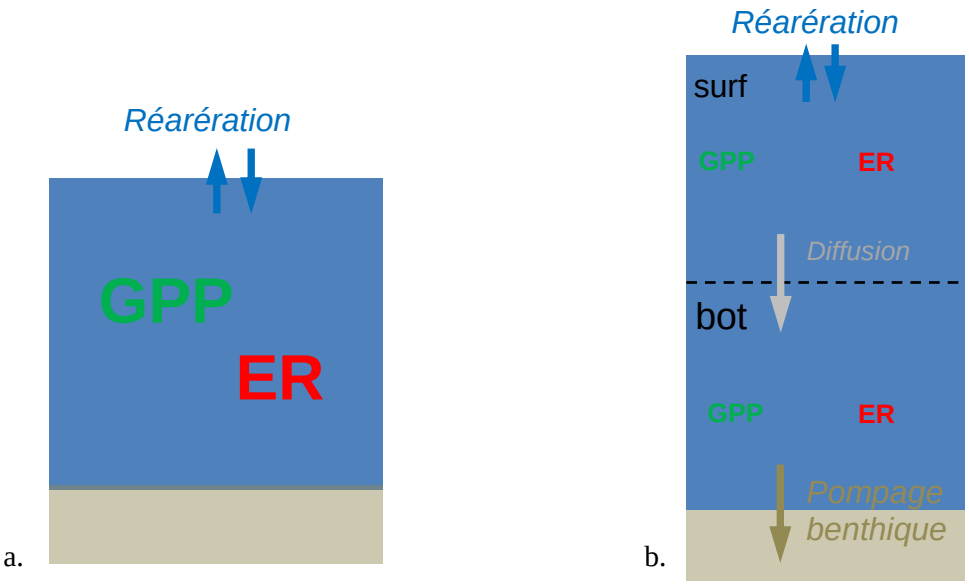

Figure 2 : Schéma simplifié des différents flux d'O_2 pris en compte dans la méthode des courbes journalières. À gauche le modèle classique (a.), à droite un modèle à deux compartiments utilisé dans le cas des casiers (b.) (cf partie 2.)

Le coefficient de réaération à l'interface eau-atmosphère est une fonction de la vitesse d'écoulement d'eau (ici nulle) et de la vitesse du vent. On utilise ici la formule donnée par (Escoffier, 2014) d'après (Thibodeaux et al., 1994):

$$k_{rea} = 86400 \cdot k_{wind} \cdot {V_{wind}}^{2.23} \cdot {D_{O2}}^{2/3} \qquad (2)$$

oùk_{rea} est en m jour^{-1}, k_{wind} = 3.4 10^{-4}, V_{wind} est la vitesse du vent à 10 m (en m s^{-1}), et D_{O2} exprimé en m² s^{-1} (2.0 10^{-9} m² s^{-1}).

Dans le cas d'une eau de faible salinité et à faible altitude, la solubilité de l'oxygène $O_{2\ sat}$ (en mg L^{-1}) en fonction de la température est donnée par (Cox, 2003):

$$[O_2]_{sat}(T) = 14.652 - 0.41022 \cdot T + 0.007991 \cdot T^2 - 7.7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \qquad (3)$$

où T est la température de l'eau (en °C).

Pendant la nuit, il n'y a pas d'activité photosynthétique (GPP=0), et le seul flux inconnu est celui de la respiration. La dérivée temporelle de la concentration en oxygène dissous pendant la nuit permet ainsi de déterminer l'intensité de la respiration (Figure 1). Cette valeur de respiration est ensuite extrapolée pendant la période éclairée, ce qui permet alors de déterminer l'intensité de la production primaire.

Dans le cas des masses d'eau qui présentent des hétérogénéités verticales fortes, comme c'est le cas pour les casiers Girardon du Rhône et les gravières de la Bassée, un modèle avec 2 couches, surface et profondeur, est considéré (Figure 2b). L'équation (1) est écrite pour chaque couche, avec en plus un terme d'échange diffusif basé sur la loi de Fick et un coefficient de diffusion turbulente de l'oxygène dans l'eau. Le principe de détermination des termes du métabolisme reste sinon inchangé.

Le compartiment benthique (Figure 2b)n'est pas ici considéré explicitement, et le pompage d'O_2 associé est inclus dans le terme de respiration.

1.3 Algorithme de calcul

Pour pouvoir appliquer la méthode des courbes journalières, il est nécessaire de disposer des photo-périodes, c'est-à-dire des heures de lever et de coucher du soleil, afin de déterminer les bornes temporelles de l'activité photosynthétique. En l'absence de données de rayonnement incident mesurées à proximité du site d'étude, les dates de lever et de coucher du soleil peuvent être obtenues à partir du calculateur NOAA-ESRL (http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/calcdetails.html).

Un algorithme de calcul en langage C a été développé, qui calcule le métabolisme (GPP et ER, exprimés en mmol O_2 m^{-2}jour^{-1}) au pas journalier, à partir des mesures de teneur en oxygène dissous, de température de l'eau et de vitesse du vent. Le pas de temps des mesures en oxygène dissous et température de l'eau doit être au maximum de 1h, et si possible de 30 ou 15 min.

Pour chaque pas de temps, on calcule d'abord le coefficient de réaération en surface ainsi que la teneur en oxygène à saturation. La dérivée temporelle de la concentration en oxygène dissous est également calculée (approximation linéaire).

Ensuite, les périodes de nuit sont identifiées. Pour chaque nuit, la moyenne de la dérivée de la teneur en oxygène est calculée à partir de l'intégrale sous la courbe, divisée par la durée de la période de nuit. La moyenne de la respiration pour la nuit est alors déduite.

Pour chaque période de jour n (éclairé), la respiration est définie par la moyenne de la respiration déterminée pour la nuit précédente, entre les jours n-1 et n, et la respiration pour la nuit suivante, entre les jours n et n+1. Les moyennes du terme de réaération et de la dérivée de la teneur en oxygène sont calculées, et la moyenne du terme GPP pendant la période éclairée peut être alors déduite. Le NEP est enfin déterminé.

Les flux de C correspondant au métabolisme calculé à partir de l'oxygène peuvent être obtenus, en considérant un facteur de conversion de 1 mmol O_2 pour 1 mmol C.

1.4 Limites de l'approche

La méthode des courbes journalières permet une détermination relativement simple de l'intensité du métabolisme à partir des mesures de concentration en oxygène. Ces dernières années, ces mesures sont devenues faciles d'accès avec les capteurs de type optode, qui présentent une faible dérive temporelle et peuvent être déployés sur le terrain pour un suivi long terme à haute fréquence. Cette méthode est cependant basée sur un certain nombre d'hypothèses et simplifications. La plus importante est que la respiration anaérobie et la respiration photosynthétique (qui s'ajoute à la respiration des producteurs primaires lorsqu'ils ont une activité photosynthétique) ne sont pas prises en compte. La respiration utilisée pour la période éclairée est donc sous-estimée. Par ailleurs, les hétérogénéités temporelles de la respiration à l'échelle journalière sont négligées.

2 Variabilité spatiale et temporelle du métabolisme des casiers Girardon du Rhône

Entre la fin du XIX^{ème} siècle et le début du XX^{ème} siècle, de nombreux aménagements ont été réalisés sur le Rhône dans le but d'exploiter le fleuve pour les besoins du transport fluvial. Les casiers Girardon constituent les principaux aménagements qui ont contribué à améliorer la navigabilité du Rhône. Ils sont constitués de digues longitudinales submersibles connectées à la berge par des épis transversaux. La principale fonction de ce système était de définir et de figer un chenal de navigation en concentrant les flux dans le chenal principal et en favorisant un exhaussement des marges fluviales par les dépôts des crues. Les casiers sont progressivement comblés par la sédimentation, jusqu'à être déconnectés du chenal et végétalisés.

Ces aménagements sont aujourd'hui remis en cause, en particulier pour les problèmes des crues. Un projet de réactivation des marges alluviales du Rhône est ainsi en cours, qui passe entre autres par le démantèlement des casiers Girardon. La mise en œuvre de telles mesures nécessite une bonne compréhension du fonctionnement écologique des casiers et des effets de leur connectivité avec le chenal actif. La contribution des casiers à la productivité du fleuve pourrait en effet être significative.

Six casiers situés dans le secteur de Péage-de-Roussillon, à 50 km au Sud de Lyon (Figure 3), ont été instrumentés. Dans ce secteur, le canal de dérivation pour la navigation a relégué les casiers Girardon sur le bras du Vieux Rhône, où coule le débit réservé.

Les objectifs de ce projet, en collaboration entre les Zones Atelier Seine et Rhône, sont d'une part la validation de l'application de l'algorithme de détermination du métabolisme à partir de chroniques haute-fréquence d'oxygène dissous présenté ci-dessus, et d'autre part d'établir un bilan du fonctionnement écologique et de l'intensité du métabolisme des casiers Girardon du Rhône.

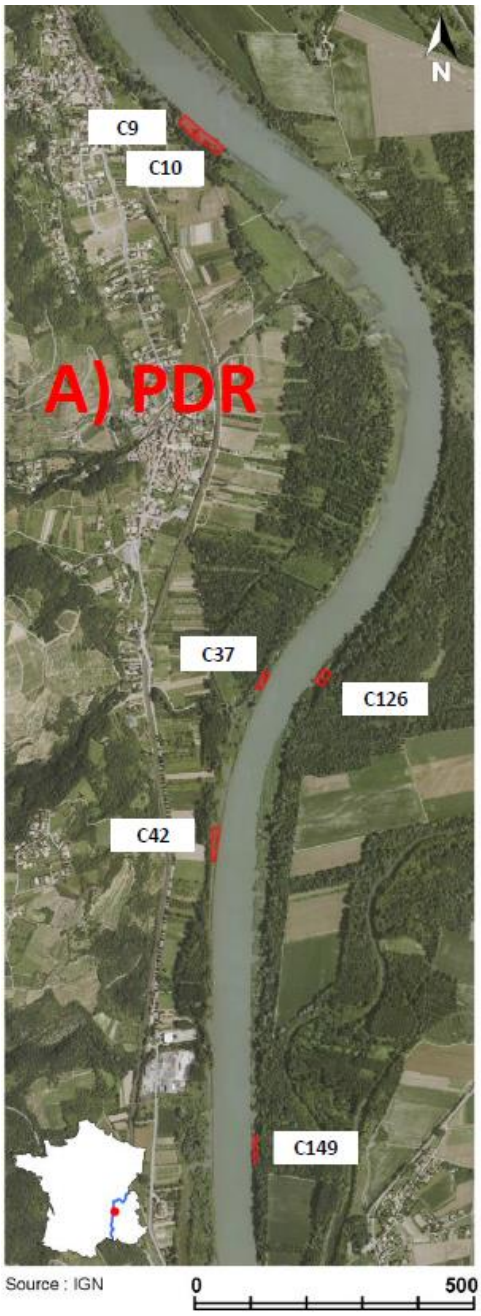

Figure 3 : À droite : Localisation de la zone d'étude au sud de Lyon, et position des 6 casiers étudiés le long du Vieux Rhône dans le secteur de Péage-de-Roussillon. À gauche : photographies des casiers C9 et C10.

2.1 Dispositif expérimental

Les 6 casiers instrumentés ont une profondeur comprise entre 1.2 et 2.5 m, et une surface entre 1369 et 2890 m² (Tableau 1), ce qui correspond à un coefficient de creux très élevé. Dans chaque casier, la température et la teneur en oxygène dissous de l'eau ont été mesurées toutes les 30 min d'une part à 20 cm sous la surface et d'autre part à 20 cm du fond du casier. La variabilité temporelle du niveau d'eau dans les casiers n'a pas été enregistrée, et elle est ici supposée négligeable. Les vitesses de vent mesurées à 10 m au pas horaire ont été obtenues pour la station Météo France de Albon, proche du site d'étude.

Le suivi a été réalisé entre le 22/07/2014 et le 24/11/2014, soit 125 jours, excepté pour le casier 10, où le suivi a commencé le 15/09/2014 pour une durée de 70 jours).

La plupart du temps, les casiers sont déconnectés du Vieux Rhône. En période de crue, les casiers peuvent être connectés au fleuve de manière transitoire. Cette connectivité dépend de la position et du contexte local de chaque casier (digues latérales ou non, etc.). La connexion d'un casier avec le fleuve entraine un mélange et une homogénéisation de la colonne d'eau, ainsi qu'un apport important de matières en suspension et de matière organique.

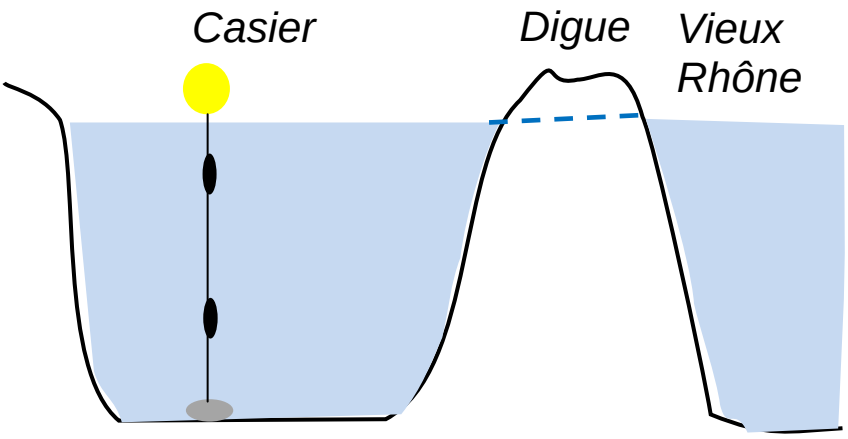

Figure 4 : Schéma du dispositif de suivi continu de la concentration en oxygène dissous et de la température en surface et en profondeur dans les casiers Girardon du secteur de Péage-de-Roussillon.

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques des 6 casiers étudiés, connectivité avec le Vieux Rhône (voir le texte pour plus de détails), et concentration en oxygène dissous et température moyennes sur la période étudiée.

Casier	Prof moy. (m)	Surface (m²)	Connectivité / Vx Rhône	[O_2] (mg/L)		T (°C)	
				Surface	Fond	Surface	Fond
37	1.4	1470	--	4.4 ± 5.1	0.9 ± 2.6	17.9 ± 4.2	16.2 ± 3.1
10	2.3	1369	-	9.2 ± 4.3	6.6 ± 3.8	15.7 ± 3.2	15.1 ± 2.8
42	1.2	2000	-	7.8 ± 3.7	5.6 ± 4.1	17.9 ± 3.7	17.1 ± 3.2
9	1.8	2890	-	8.4 ± 2.6	8.0 ± 2.5	18.5 ± 3.6	18.3 ± 3.4
149	0.7	2700	+	8.5 ± 2.5	7.7 ± 3.0	18.0 ± 3.2	17.3 ± 2.8
126	2.2	2100	+	8.7 ± 3.2	3.3 ± 4.1	18.4 ± 3.4	17.4 ± 2.8

2.2 Résultats : dynamique des teneurs en oxygène dissous et de la température

Les chroniques d'évolution des températures et des concentrations en oxygène dissous dans les 6 casiers instrumentés sont présentées en Figures 5 et 6. Le Tableau 1 récapitule les valeurs moyennes et écarts types des concentrations en oxygène et des températures dans chaque casier.

La température présente des cycles nycthéméraux marqués, dont l'amplitude varie en lien avec les variations du rayonnement solaire et probablement de la turbidité de l'eau. Ces cycles sont fortement amortis et légèrement déphasés au fond du casier, ce qui indique un contrôle de type diffusif. Les casiers 9, 42 et 149 présentent des contrastes de températures modérés entre fond et surface, alors que dans les casiers 10, 37 et 126, la température de fond est très amortie.

Même si une stratification thermique n'est pas attendue dans les casiers de faible profondeur, on observe que la surface est toujours plus chaude et légère que le fond, la surface de certains casiers allant jusqu'à 4 °C de plus que le fond.

Bien que les casiers soient situés dans la même zone géographique, ils présentent des températures moyennes contrastées, avec le casier 10 qui est ainsi 2 à 3 °C plus froid que les autres casiers (Tableau 1).

Les périodes de connexion du casier avec le fleuve sont facilement identifiables par une homogénéisation de la température sur toute la colonne d'eau (Figure 6). Ces périodes de connexion correspondent également à une homogénéisation de la concentration en oxygène sur toute la colonne d'eau, à une valeur proche de la saturation par rapport à l'atmosphère. Au premier ordre, les périodes de connexion sont identiques pour les

casiers. Deux périodes de connexion principales affectent tous les casiers, au début entre le 28/07 et le 02/08/2014, et à la fin de la période de mesure du 02 au 23/11/2014.

La concentration en oxygène dissous présente de forts gradients verticaux, ainsi que des cycles nycthéméraux en surface, d'amplitude variable en lien avec le rayonnement, la température et les teneurs et apports en matière organique. Les casiers 9, 149 et 42 sont relativement bien oxygénés sur toute la colonne d'eau. En revanche le fond des casiers 37 et 126 est anoxique la plupart du temps (Tableau 1).

Ces différences de comportements des casiers, tant pour l'oxygène que pour la température, ne sont au premier ordre pas corrélées à leurs profondeurs (Tableau 1), ce qui suggère des contextes hydrauliques et biologiques différents.

2.3 Intensité et variabilité du métabolisme

Dans un premier temps, les périodes de connexion de chaque casier avec le fleuve ont été identifiées à l'aide d'un critère sur l'homogénéité verticale de la température. Les périodes de connexion ne sont ensuite pas considérées pour le calcul du métabolisme.

Les termes du métabolisme ont été calculés dans un modèle à deux couches, et les résultats sont présentés en Figure 7. En surface, la production primaire est de l'ordre de 100 à 1000 mmol O_2 $m^{-2}jour^{-1}$, la respiration de 100 à 500 mmol O_2 $m^{-2}jour^{-1}$, pour une production nette variant entre 200 et 1000 (resp. -100 et 300) mmol O_2 $m^{-2}jour^{-1}$.Au fond, la production primaire est de l'ordre de 200 mmol O_2 $m^{-2}jour^{-1}$, la respiration de 100mmol O_2 $m^{-2}jour^{-1}$, pour une production nette variant entre -100 et 300 mmol O_2 $m^{-2}jour^{-1}$ (Figures 7 et 8).

Les différents casiers présentent des situations contrastées, à la fois pour l'intensité des flux et l'intensité des gradients entre la surface et la profondeur. Les casiers 9 et 42 sont autotrophes à la fois en surface et au fond, les casiers 10 et 126 sont autotrophes en surface, légèrement hétérotrophes au fond, le casier 37 est fortement productif en surface mais a une production nulle au fond, le casier 149 a une production quasiment nulle à la fois en surface et au fond.

Tableau 2 : Intensité du métabolisme (production primaire, respiration et métabolisme net) calculée en surface et au fond des casiers.

Casier	Surface (mmol O_2/m^2/jour)			Fond (mmol O_2/m^2/jour)		
	GPP	ER	NEP	GPP	ER	NEP
37	385	-215	**170**	??	0	**??**
10	415	-201	**214**	??	-25	**-??**
42	323	-172	**151**	180	-109	**70**
9	165	-92	**73**	98	-63	**35**
149	48	-26	**23**	73	-38	**36**
126	340	-182	**158**	??	-24	**??**

2.1 Discussion

L'ordre de grandeur du métabolisme est similaire aux valeurs déterminées à partir de données d'oxygène ou bien de modélisation numérique dans la rivière Grand Morin en aval de la Seine (Flipo et al., 2007), ainsi que dans la Seine (Vilmin et al., 2016).

La production nette est globalement positive pour les casiers (Figure 8), indiquant une consommation nette de CO_2. La production nette est plus faible dans le fond du casier qu'en surface, en lien avec une intensité lumineuse atténuée en profondeur.

Pendant les périodes connectées avec le fleuve Rhône (par exemple en novembre 2014, Figure 8), le métabolisme est fortement altéré: à la fois la production primaire et la respiration deviennent quasiment nulles. Alors que la connexion au fleuve pourrait apporter des nutriments, un apport important de matières en suspension pourrait expliquer cette réduction du métabolisme.

A l'échelle de la série de données disponible, il n'est pas possible d'identifier d'évolution saisonnière claire entre l'été et l'automne.

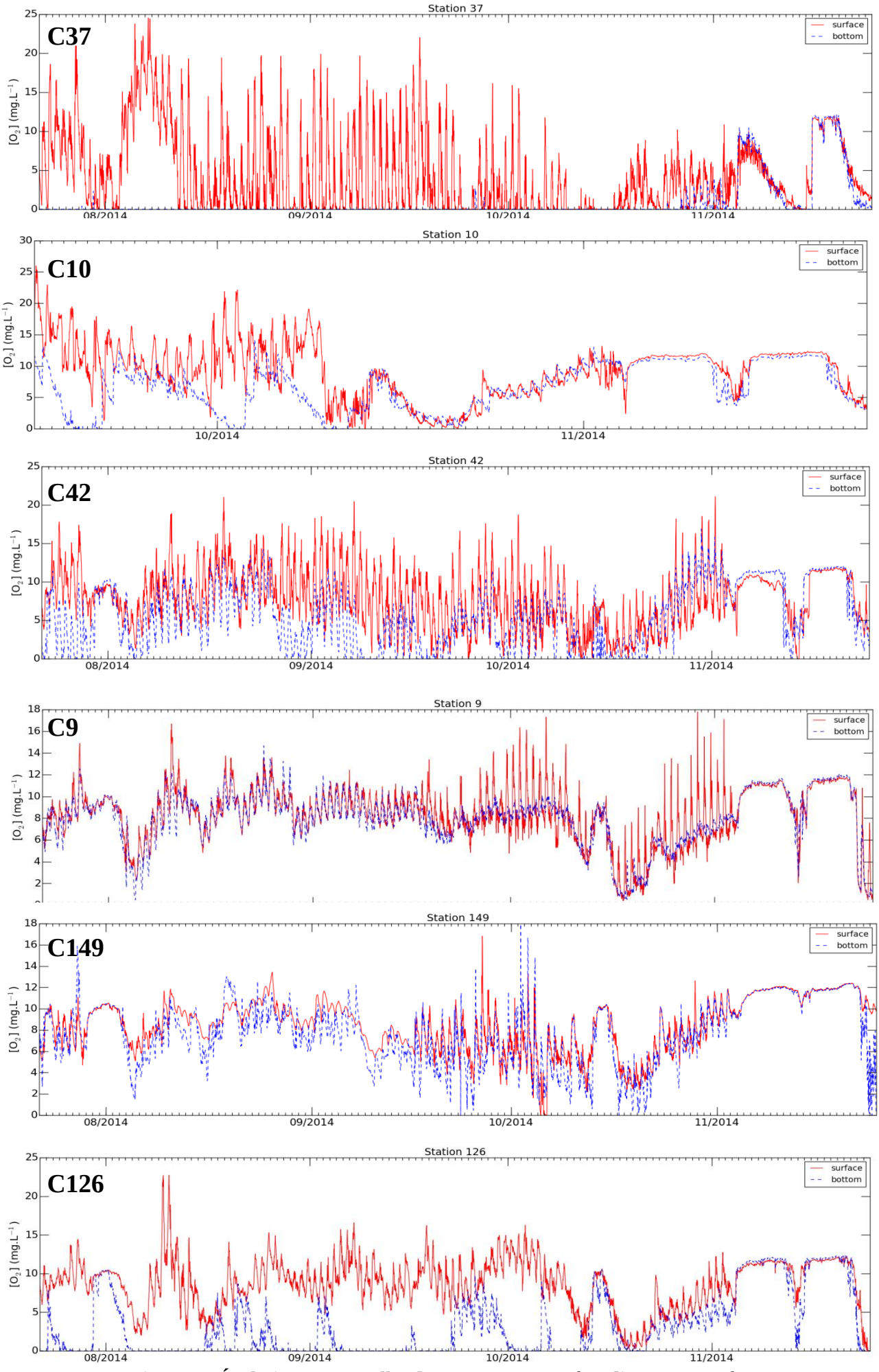

Figure 5 : Évolutions temporelles des teneurs en oxygène dissous en surface (rouge) et au fond (bleu) dans les 6 casiers étudiés.

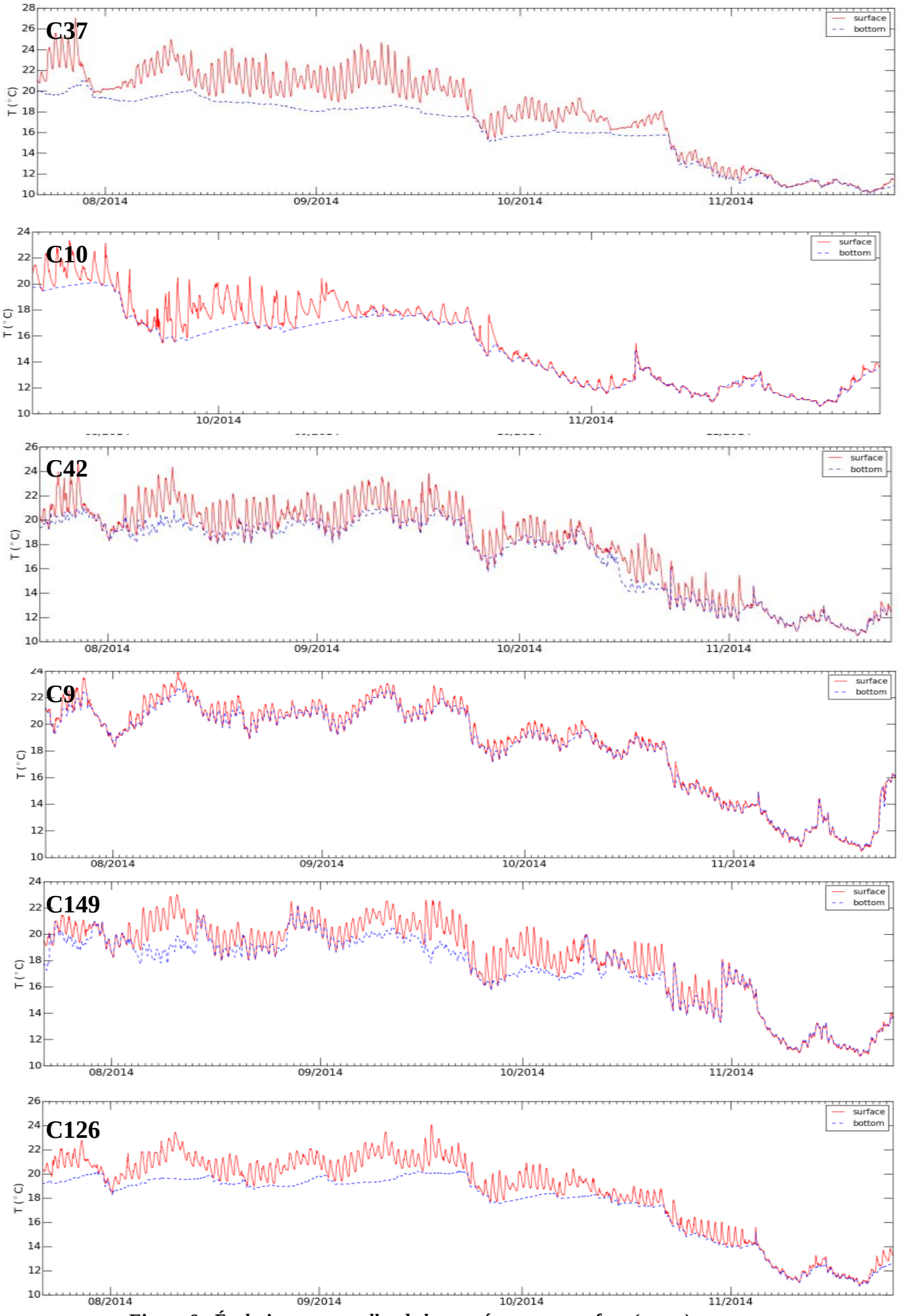

Figure 6 : Évolutions temporelles de la température en surface (rouge) et au fond (bleu) dans les 6 casiers étudiés.

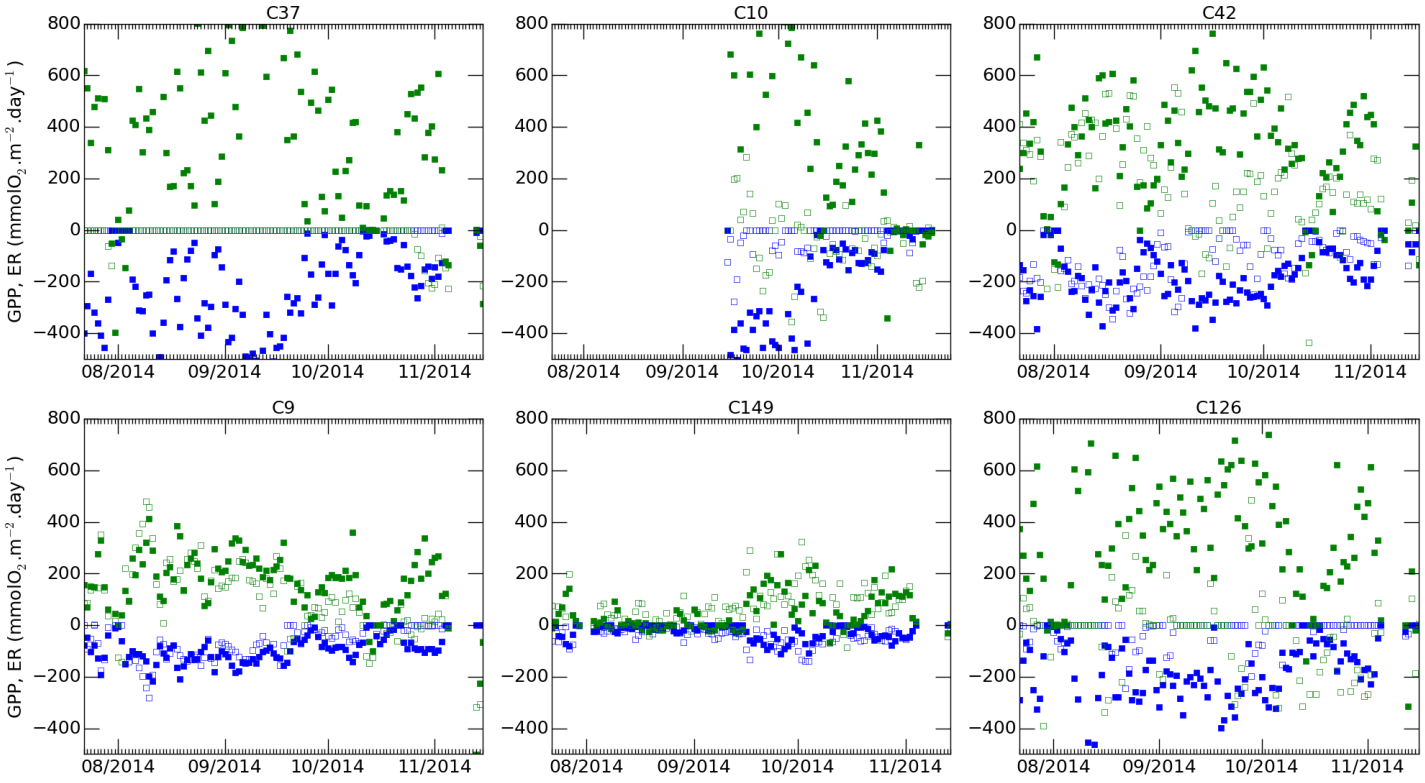

Figure 7 : Évolutions temporelles de l'intensité du métabolisme (production primaire en vert, respiration en bleu) en surface (symboles pleins) et au fond (symboles vides) des casiers.

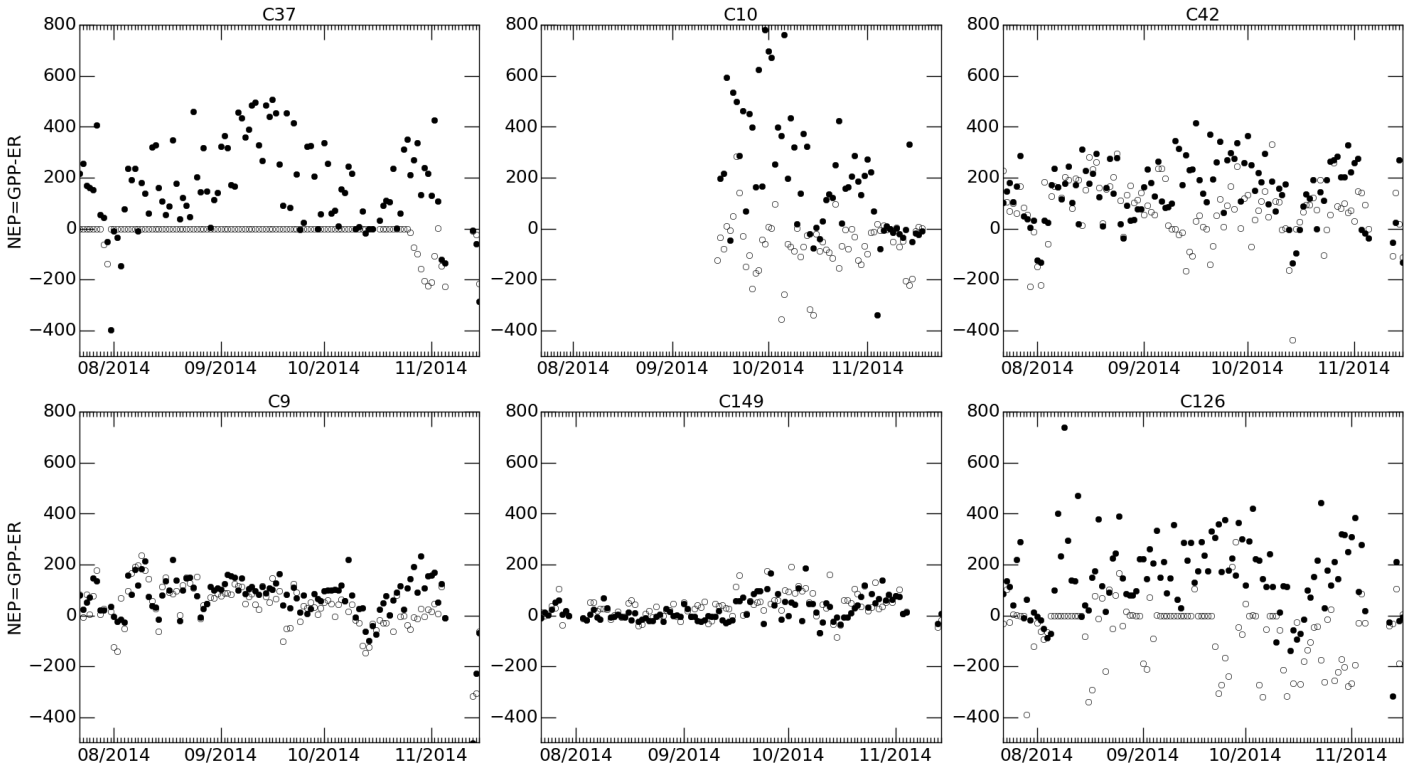

Figure 8 : Évolutions temporelles de l'intensité du métabolisme net calculé en surface (symboles pleins) et au fond (symboles creux) des casiers.

3 Dispositif de suivi haute fréquence du métabolisme et des flux de CO_2/CH_4 dans les gravières de la Bassée (DEGASE)

L'importance des écosystèmes aquatiques continentaux dans le cycle global du carbone est de plus en plus reconnue (Aufdenkampe et al., 2011; Tranvik et al., 2009) malgré une superficie totale modeste à l'échelle du globe. L'estimation des flux de gaz à effet de serre (GES), CO_2, N_2O et CH_4, à l'interface eau-atmosphère est ainsi un enjeu essentiel que ce soit à l'échelle locale d'une zone humide ou d'une rivière, ou à l'échelle régionale d'un bassin versant comme celui de la Seine. Le métabolisme de la Seine a ainsi pu être étudié très précisément à l'aide d'enregistrements biogéochimiques, notamment d'oxygène dissous, à haute fréquence (Escoffier, 2014; Escoffier et al., 2016) et de modélisation couplée (Vilmin, 2014; Vilmin et al., 2016). Le métabolisme des annexes hydrauliques de la Seine joue également un rôle important dans les bilans globaux. Les gravières occupent ainsi 10 % de la surface de la plaine alluviale de la Bassée, en amont de Paris.

L'objectif principal est ici d'évaluer le métabolisme du corridor hydro-écologique de la Seine tout en quantifiant les émissions de gaz à effet de serre, en particulier le CO_2, qui en résultent. Les différents processus et voies métaboliques qui contrôlent l'intensité, le signe et les évolutions temporelles du métabolisme seront identifiés, ainsi que les facteurs qui contrôlent ces évolutions transitoires aux différentes échelles de temps.

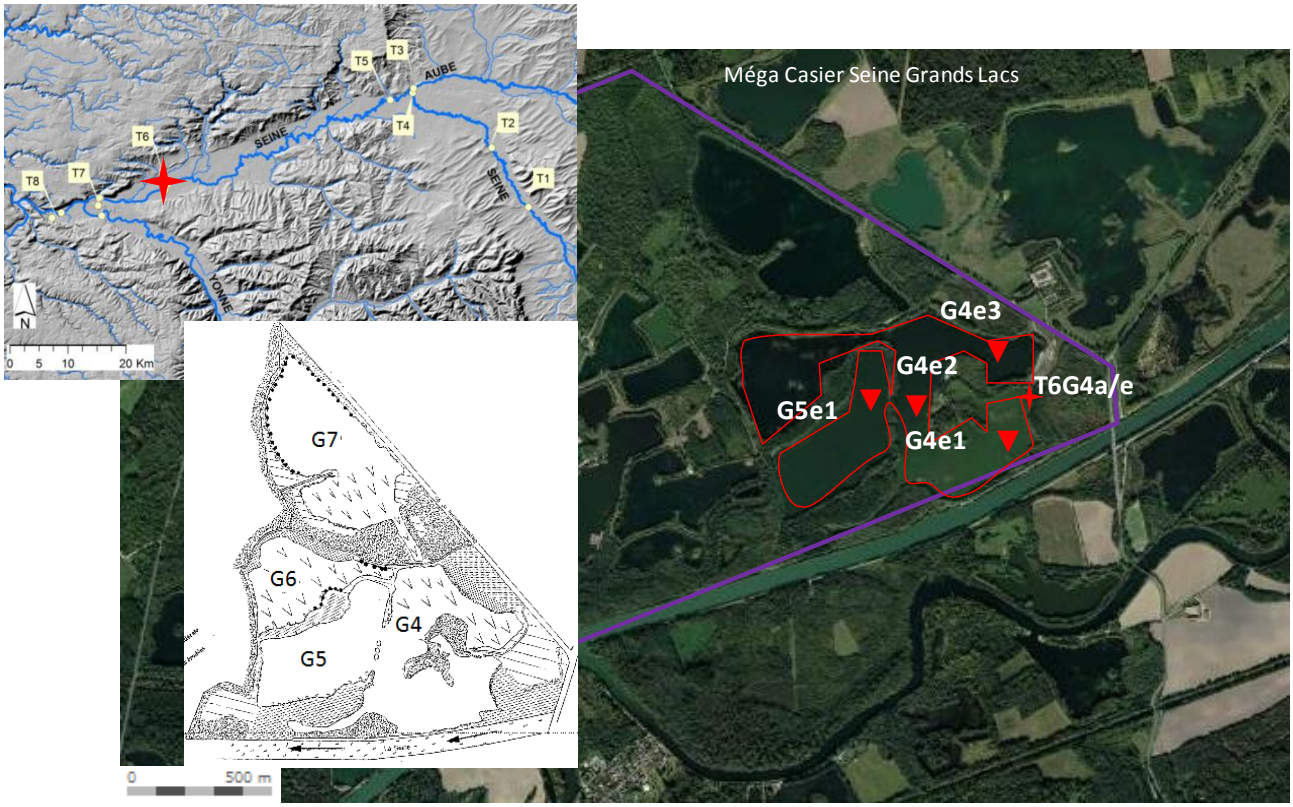

Figure 9 : Localisation de la zone de gravières étudiée, au niveau du transect T6, ainsi que des points des gravières G4 et G5 pour lesquels des mesures et profils verticaux ont été effectués.

Pour cela, des moyens expérimentaux et numériques seront associés. Des dispositifs instrumentaux de suivi du métabolisme et des flux de gaz à effet de serre des gravières sont actuellement mis en place et validés. Le calcul du métabolisme et des flux de CO_2 à partir des mesures de gaz dissous (O_2 ou CO_2) selon la méthode présentée précédemment sera ici couplé aux mesures directes des flux de CO_2 à l'interface eau-atmosphère. Une approche de modélisation directe du métabolisme avec les codes RIVE (Billen et al., 1994) et ProSe (Vilmin et al., 2016) sera également développée dans la thèse de Shuaitao Wang qui a débuté en octobre 2016

3.1 Matériel et méthodes : campagnes de mesures ponctuelles

La gravière G4 retenue pour le début de cette étude est localisée à une dizaine de km en amont de la confluence avec l'Yonne, à proximité de la commune d'Égligny (Figure 9). Elle se relie plus généralement au transect T6 du suivi de la plaine alluviale de la Bassée (Weill et al., 2016).

La gravière G4 est reliée en surface par des seuils à 2 autres gravières, G6 au nord-ouest, G5 au sud-ouest (Figure 9). Ces gravières ne sont pas connectées directement à la Seine. Elles ont des profondeurs maximales entre 4 et 6 m, pour des surfaces entre 11 et 26 ha (Tableau 3). La gravière G4 a été créée il y a plus de 50 ans, la gravière G5 étant la plus jeune (près de 25 ans).

Des études détaillées sur l'hydrodynamique et le fonctionnement écologique de ces gravières avaient déjà été réalisées (Schanen, 1998), et pourront servir de base pour discuter d'une éventuelle dégradation ou amélioration du statut trophique des gravières, qui avaient alors été identifiées comme en voie d'eutrophisation.Comme cela avait déjà été observé par (Schanen, 1998), la gravière G4 est colonisée par de très nombreux macrophytes. Nous avons également observé des macrophytes dans la gravière G5.

Tableau 3 : Caractéristiques géométriques des 3 gravières de la zone d'étude, ainsi que leur date de création et la présence de macrophytes/hydrophytes relevée par (Schanen, 1998).

GravièresEgligny	**G4**	**G5**	**G6**
Prof moyenne (m)	3	3.2	3.1
Prof maximale (m)	4.8	6	3.9
Surface (ha)	25.7	13.5	11.3
Date création	1965	1993	1977
Macrophytes	Oui	Non	Oui

Un suivi hydrodynamique est par ailleurs mené dans le cadre de la phase VII du PIREN Seine. La hauteur d'eau et la température dans la gravière (point T6G4e) et dans la nappe alluviale adjacente (piézomètre T6G4a) sont suivies en continu depuis 2016.

Tableau 4 : Localisation, profondeur et profondeurs du disque de Secchi pour les points de mesures représentés en Figure 9.

	G4e1		**G4e2**		**G4e3**	**G5e1**
GPS	N 48° 24' 38.0''		N 48° 24' 45.3''			N 48° 24' 41.3''
	E 3° 8' 17.8''		E 3° 8' 01.8''			E 3° 07' 53.9''
Prof (m)	3.5		5.5		3	4.6
Secchi (m)(date)	1.3 (28/06/16)	1.15 (05/07/16)	1 (05/07/16)	1.25 (13/10/16)		3.3 (13/10/16)

Au cours de 3 campagnes de terrain effectuées entre juin et octobre 2016, des mesures ont été réalisées en 4 points des gravières, localisés sur la Figure 9 et dont les caractéristiques géométriques sont récapitulées dans le Tableau 4.

Pour chaque point, les mesures suivantes ont été effectuées :
- mesures de flux de gaz (CO_2 et CH_4) à l'interface eau-atmosphère,
- profils verticaux de paramètres physico-chimiques (T, pH, conductivité, redox, turbidité, rayonnement PAR) et de teneurs en O_2 et CO_2 dissous,
- prélèvements d'eau ponctuels dans la colonne d'eau pour la détermination des anions et cations majeurs, du carbone inorganique dissous (DIC), des nutriments (N, P), du carbone organique dissous (COD), des sulfures, des matières en suspension (MES), du CH_4 dissous ainsi que de la composition isotopique $^{13}C/^{12}C$ du DIC.

La mesure directe des flux de CO_2 et CH_4 à l'interface eau-atmosphère est réalisée par la méthode de la chambre d'accumulation flottante (Figure 10). La chambre est déposée à la surface de l'eau, et les concentrations en CO_2 et CH_4 sont mesurées en continu dans l'air de la chambre, au moyen de deux capteurs (respectivement LicorLI820 et PanterraNeodym). Dans les gravières de la Bassée, la concentration en CO_2 augmente ou diminue linéairement au cours du temps dans la chambre, selon la saison et le sens du flux, alors que la concentration en CH_4 augmente de façon plus complexe (parties linéaires croissantes entrecoupées de brusques sauts, reflétant l'émission de bulles). La température de l'eau et de l'air dans la chambre, la conductivité, le pH et la pCO_2 de surface ainsi que la vitesse du vent sont également enregistrés pendant l'accumulation. Des prélèvements sont effectués pendant les déploiements (eau de surface pour détermination de la concentration en CH4 dissous et de l'alcalinité, air de la chambre pour vérification des teneurs en CH_4). L'intensité du flux est ensuite calculée par :

$$\Phi_{CO2} = \frac{P_a}{R \cdot T} \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{d[CO_2]}{dt} \qquad (4)$$

où Φ_{CO2} (en mmol m^{-2} $jour^{-1}$) est le flux de CO_2 à l'interface eau-atmosphère (compté positivement pour une émission vers l'atmosphère), Pa la pression atmosphérique au moment de la mesure (en Pa), R=8.314 J K^{-1} mol^{-1} la constante des gaz parfaits, T la température de l'air (en K), V (resp. S) le volume d'air (resp la section) de la chambre d'accumulation (en m^3 resp m^2), et $d[CO_2]/dt$ la pente de la courbe d'accumulation (ou de diminution) de la concentration mesurée dans la chambre (en mol mol^{-1} $jour^{-1}$) (cf Figure 10).

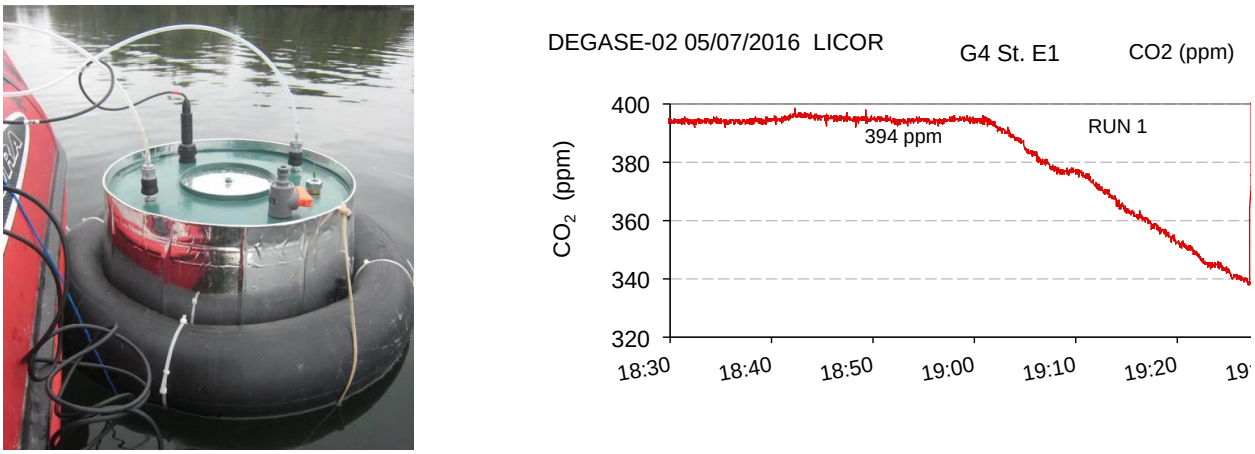

Figure 10 : Chambre d'accumulation flottante utilisée pour la mesure des flux de CO_2 et de CH_4 à l'interface eau-atmosphère (à gauche), et exemple d'évolution de la teneur en CO_2 mesurée dans la chambre dans un cas de pompage de CO_2 (à droite). La pente de la diminution de $[CO_2]$ permet de quantifier le flux.

3.2 Variabilité spatiale et temporelle du fonctionnement écologique

Les résultats préliminaires ont été obtenus sur la base des trois campagnes de terrain réalisées :
- en juin peu après l'épisode de crue de la Seine, qui n'avait pas fortement affecté la région de la Bassée,
- en juillet en période chaude, sèche et ensoleillée,
- en octobre, en période de diminution de la température de l'air et de l'éclairement.

Les profils verticaux de paramètres physico-chimiques principaux et d'oxygène dissous sont présentés en Figure 11.

Conformément aux observations de (Schanen, 1998), les gravières présentent des hétérogénéités verticales, avec une stratification thermique et chimique nette en été. La couche de surface (0-2.5 m) est plus chaude, bien oxygénée (même sursaturée en oxygène) et présente un pH basique (environ 9), alors que la couche du fond (en dessous de 2.5 m), se refroidit progressivement, a un pH plus neutre et ne contient plus du tout d'oxygène.

Dans la gravière G4, la profondeur de disparition du disque de Secchi est de 1 à 1.3 m, assez faible, en lien avec une teneur élevée en MES. En juillet, le réchauffement diurne de la couche de surface (sur 1 m d'épaisseur) a pu être mesuré.

(Schanen, 1998)avait noté l'existence de zones ponctuelles d'anoxie dans les gravières, mais avec une colonne d'eau plutôt bien oxygénée. Nos observations indiquent, en été, que l'anoxie se développe dans toutes les zones sous 2.5 m de profondeur, avec production de méthane et probablement de sulfures dans ce milieu réducteur.

En été, les flux de CO_2sont en moyenne de -16.0 ± 2.4 mmol m^{-2} $jour^{-1}$, indiquant une dissolution de CO_2 atmosphérique dans l'eau de surface sous-saturée (P_{CO2} mesurée <100 ppm), en lien avec une forte productivité biologique. Une faible production de bulles de méthaneest également mesurée en surface. En revanche une très forte concentration en CO_2est mesurée dans la couche profonde (P_{CO2}>2000 ppm).

À l'automne, le refroidissement de l'air entraine celui de la surface des gravières. Le gradient de densité entre le haut et le bas de la colonne d'eau diminue donc, ce qui, combiné à l'effet du vent, entraine des mélanges et une homogénéisation de la colonne d'eau (thermique et physique), conformément aux observations de Schanen et aux mesures réalisées en octobre. Pour tous les points de mesure, la colonne est plus ou moins bien oxygénée sur toute sa hauteur, avec parfois de l'anoxie mesurée dans les 20 à 50 cm au dessus des sédiments du fond (Figure 11). Les teneurs en CO_2 dissous sont légèrement sursaturées, et les flux de CO_2sont en moyenne de 10.9 ± 6.4 mmol m^{-2} $jour^{-1}$, correspondants à une émission nette.

3.3 Interprétation et discussion

Au premier ordre, la gravière G4 apparait homogène spatialement (points de mesures G4e1 et G4e2). En revanche, le point G4e3 semble présenter un comportement différent, qui serait expliqué par la présence d'un seuil délimitant un sous-bassin à l'est de cette gravière. Les gravières G4 et G5 présentent des fonctionnements écologiques différents, avec en particulier des quantités de macrophytes plus importantes dans G4.

Une première image des grands traits du fonctionnement métabolique peut être dessinée. En été, la gravière G4 présente une production primaire très forte en surface, et constitue un puits de CO_2. Elle présente également une sursaturation en oxygène en surface. Plus en profondeur, la lumière devient limitante, la respiration dominante, et la totalité de l'oxygène produit en surface est progressivement consommé en profondeur, jusqu'à atteindre l'anoxie.Au fond, d'autres voies métaboliques sont en place dans un milieu réducteur et anoxique.À l'automne, la production primaire se ralentit, et la respiration est présente sur toute la colonne d'eau. La gravière devient une source de CO_2. Les analyses de nutriments (identification des nutriments limitant) et des mesures de chlorophylle permettront d'aller plus loin dans l'identification des voies métaboliques.

Deux méthodes de mesure des flux de gaz à l'interface eau-atmosphère peuvent être comparées : d'une part par mesure directe du flux par chambre flottante (Equation (4)), d'autre part par calcul du flux de réaération (Equation (2)), à partir de la mesure de la concentration en CO_2 dissous, désormais possible à l'aide d'un instrument nouvellement acquis (Konsberg CONTROS HydroC-CO2), de la température et de la vitesse du vent. À terme, cela permettra de valider les modèles de coefficient de réaérationk_{rea}, et de comparer les deux approches et leurs limites.

En juillet, une faible variabilité nycthémérale des flux de CO_2 a été mesurée. La couche de surface est fortement sous-saturée en CO_2, le gradient de concentration avec l'atmosphère qui reste fort même la nuit, et c'est principalement la vitesse du vent qui contrôle le flux de dissolution (Figure 13 et Equation (2)).

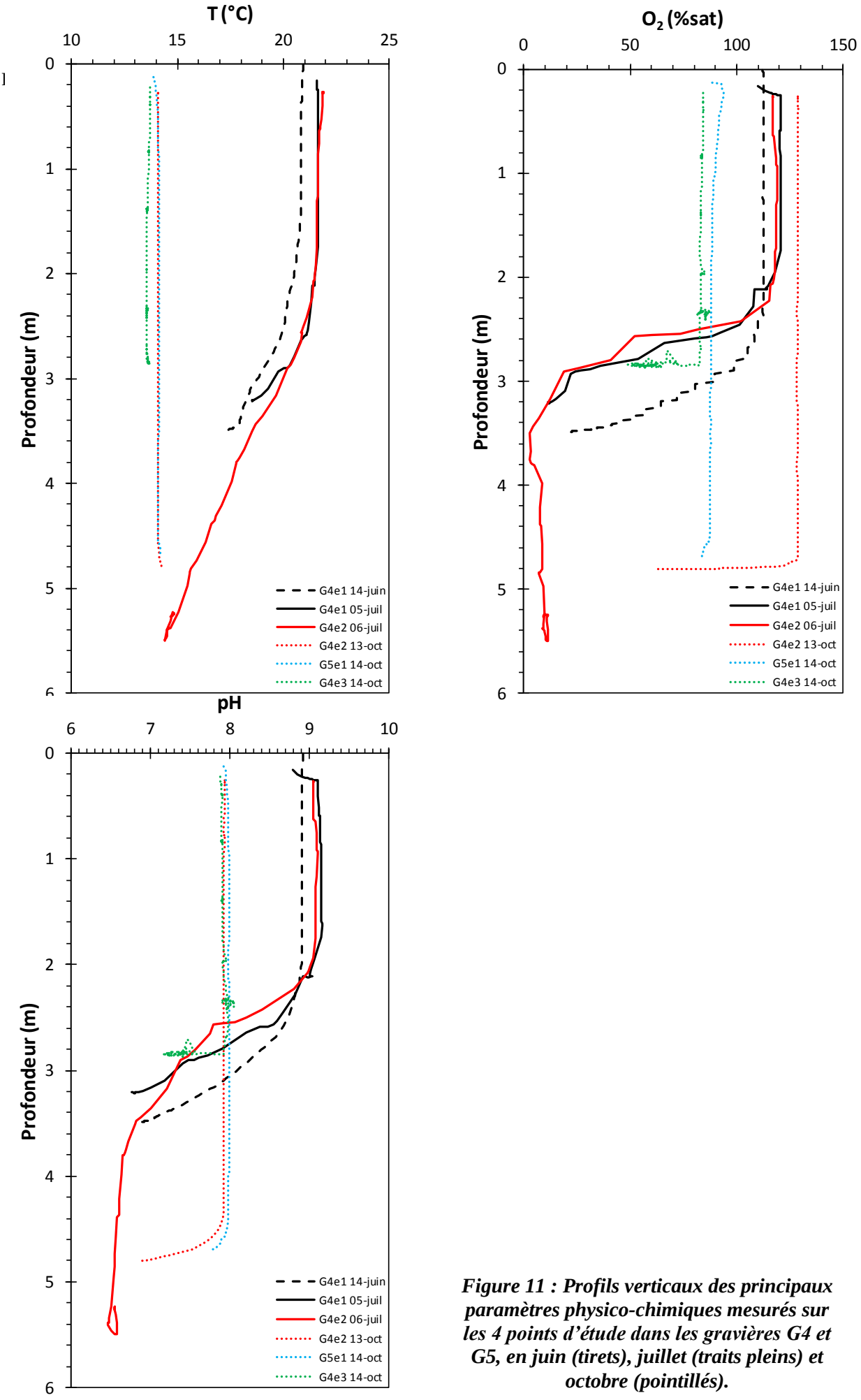

Figure 11 : Profils verticaux des principaux paramètres physico-chimiques mesurés sur les 4 points d'étude dans les gravières G4 et G5, en juin (tirets), juillet (traits pleins) et octobre (pointillés).

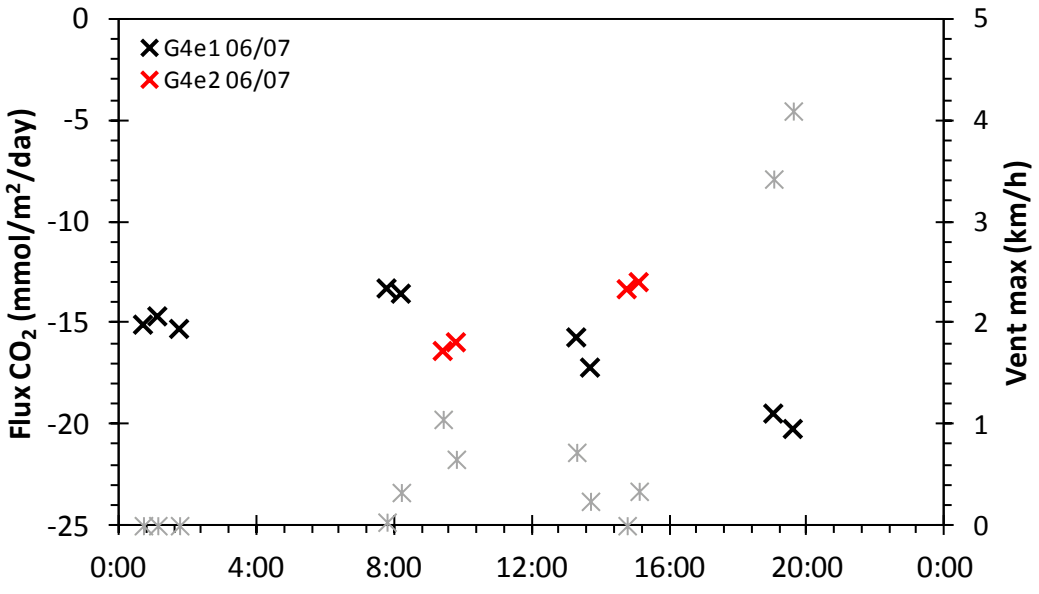

Figure 12 : Flux de CO_2 mesurés aux points G4e1 et G4e2, et vitesse maximale du vent relevée pendant la mesure de flux (symboles gris).

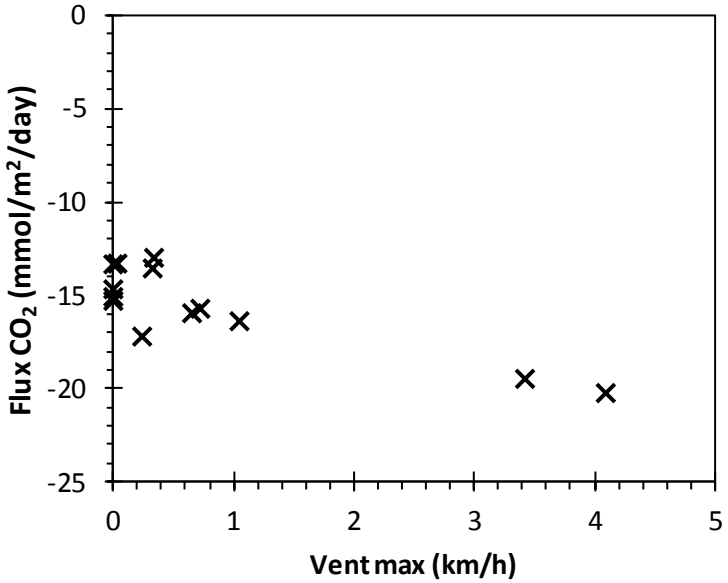

Figure 13 : Relation d'anti corrélation entre le flux de CO2 mesuré à l'interface gravière-atmosphère et le vent maximal pendant la mesure.

3.4 Perspectives

Concernant l'instrumentation et les campagnes de terrain, deux bouées ont été mises en place à l'automne 2016 pour initier un suivi continu en oxygène dissous, température, pH et conductivité en surface et en profondeur, de manière analogue au suivi dans les casiers Girardon du Rhône. Le déploiement des instruments pour le suivi continu de l'oxygène dissous sera poursuivi en 2017, en cherchant à quantifier à la fois l'hétérogénéité verticale à l'échelle d'un point de mesure, la variabilité temporelle en surface et en profondeur, et la variabilité spatiale entre les différentes gravières ou secteurs de la gravière G4. Des sondes pour le suivi continu des différentes espèces de phytoplancton seront également mises en place. Des campagnes de terrain régulières seront poursuivies en 2017, avec des prélèvements ponctuels et mesures de flux de GES.Le suivi des isotopes $^{13}C/^{12}C$ du DIC sera poursuivi et on identifiera la possibilité d'utiliser cet outil pour différencier les processus organique et inorganique.

Enfin, on s'attachera en 2017 à acquérir le relevé de la bathymétrie des gravières, pour identifier les seuils et les zones plus profondes.

Les données acquises sur les gravières serviront de base au développement et à la validation d'un modèle biogéochimique (C-RIVE) du fonctionnement écologique des gravières, avec en particulier l'introduction de plusieurs couches d'eau et celle du gaz CO_2 et des espèces du DIC dans le code.

Bibliographie

Aufdenkampe, A.K. et al., 2011. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. Frontiers in Ecology and the Environment, 9(1): 53-60. DOI:10.1890/100014

Billen, G., Garnier, J., Hanset, P., 1994. Modeling phytoplankton development in whole drainage networks-The Riverstrahler model applied to the Seine river system. Hydrobiologia, 289(1-3): 119-137. DOI:10.1007/bf00007414

Cox, B.A., 2003. A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. Science of the Total Environment, 314: 303-334. DOI:10.1016/s0048-9697(03)00062-7

Cremona, F., Laas, A., Noges, P., Noges, T., 2014. High-frequency data within a modeling framework: On the benefit of assessing uncertainties of lake metabolism. Ecological Modelling, 294: 27-35. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2014.09.013

Escoffier, N., 2014. Apports de la Biogéochimie Haute Fréquence pour l'étude de la qualité de l'eau et la quantification du fonctionnement trophique de la Seine. PhD Thesis, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France, 282 pp.

Escoffier, N. et al., 2016. Estimating ecosystem metabolism from continuous multi-sensor measurements in the Seine River. Environ Sci Pollut Res. DOI:DOI 10.1007/s11356-016-7096-0

Flipo, N. et al., 2007. Primary production in headwater streams of the Seine basin: The Grand Morin river case study. Science of the Total Environment, 375(1-3): 98-109. DOI:10.1016/j.scitotenv.2006.12.015

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

Odum, H.T., 1956. Primary production in flowing waters. Limnology and Oceanography, 1(2): 102-117.

Schanen, O., 1998. Analyse et modélisation de l'impact hydrodynamique et biogéochimique des lacs de gravière sur la nappe alluviale du Val de Seine. PhD Thesis Thesis, Université Paris 6, 380 pp.

Staehr, P.A. et al., 2010. Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science. Limnology and Oceanography-Methods, 8: 628-644. DOI:10.4319/lom.2010.8.628

Staehr, P.A. et al., 2012. The metabolism of aquatic ecosystems: history, applications, and future challenges. Aquatic Sciences, 74(1): 15-29. DOI:10.1007/s00027-011-0199-2

Thibodeaux, L., Poulin, M., Even, S., 1994. A model for enhanced aeration of streams by motor vessels with application to the Seine river. Journal of Hazardous Materials, 37(3): 459-473. DOI:10.1016/0304-3894(93)e0101-7

Tranvik, L.J. et al., 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. Limnology and Oceanography, 54(6): 2298-2314. DOI:10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298

Vilmin, L., 2014. Modélisation du fonctionnement biogéochimique de la Seine de l'agglomération parisienne à l'estuaire à différentes échelles. PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France, 354 pp.

Vilmin, L., Flipo, N., Escoffier, N., Rocher, V., Groleau, A., 2016. Carbon fate in a large temperate human-impacted river system: Focus on benthic dynamics. Global Biogeochemical Cycles, 30: 1-19. DOI:10.1002/2015GB005271

Weill, P., Labarthe, B., Jost, A., Amestoy, J., Cojan, I., Deleplancque, B., Flipo, N. (2016), Complexitéhydrosédimentaire de la plaine alluviale de la Bassée. Dans "Interfaces Nappe-Rivière", PIREN Seine, Rapport de synthèse 2011-2015