Suivi de la production primaire et ses facteurs de contrôle dans la várzea de Janauacà

Beatriz LAMBACK

Tuteur : Marie-Paule BONNET (IRD)

Soutenance le 7 septembre 2009

Master 2 BCE - Milieux aquatiques

2008-2009

Avant Propos

Je voudrais tout d'abord remercier Marie Paule Bonnet pour m'avoir offert la possibilité d'effectuer ce stage au sein de l'IRD Brésil, et bien plus encore.

Merci également à toute l'équipe de l'IRD Brésil, et aux autres chercheurs qui ont participés à la mission CARBAMA 5.

Je tiens à remercier Alain Plenecassagne (US 191) pour sa bonhomie, et sans qui une grande partie des résultats n'aurait pu être obtenus.

Je remercie également Joao Bosco Alfenas pour sa gentillesse pour avoir assuré le bon déroulement des campagnes.

Ce travail n'aurait pu être effectué sans Hervé Schmoor, hydrogéologue, et mon binôme de stage. MercI.

Enfin je remercie chaleureusement tout les stagiaires, IRD ou non, et en particulier Clio Canerot et Adrien Selles, sans qui mes journées n'auraient pas été aussi enrichissantes.

Table des matières

Introduction 4
A. Présentation de l'IRD 4
1) Présentation générale 4
2) L'IRD au Brésil 4
3) Le projet HyBAm 5
B. Description et objectifs du stage 5
1) Position du projet dans le contexte du développement durable du Brésil et de la coopération entre l'IRD et les institutions brésiliennes 5
2) Problématique scientifique et état de l'art : écosystèmes aquatiques amazoniens et effet de serre 6
C. Le site d'étude 7
1) Le bassin amazonien 7
2) La várzea de Janauacà 9

I – Partie expérimentale 9
A. Missions en Amazonie 9
1) Mesures in situ 10
2) Prise d'échantillon et conditionnement pour analyses en laboratoire 10
3) Autres sources de données 12
B. Analyses en laboratoire 12
1) Analyse de la chlorophylle par fluorimétrie 12
2) Analyse des cations et des anions majeurs en chromatographie ionique en phase liquide 13
3) Analyse des cations majeurs par spectrométrie d'absorption atomique 14
4) Analyse des cations majeurs par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-AES) 15
5) Autres analyses 15
C. Mise en place du modèle hydrologique 15
1) Principe du modèle 15
2) Données d'entrée du modèle 16

II – Résultats 17
A. Hydrologie de la várzea 17
1) Débits 17
2) Hauteurs d'eau 17
3) Modèle hydrologique 18
B. Variations spatio-temporelles des paramètres de la qualité de l'eau 20
1) Gradient vertical 20
2) Lumière et zone euphotique 22
3) Gradient horizontal : variation des paramètres dans le temps et dans l'espace 22
4) Cycles diurnes 26

III – Discussion 28
A. Hydrologie et hydrodynamique de la várzea 28
B. Evolution de la qualité des eaux et activités de production/respiration 30

Conclusion 33

Bibliographie 34

Annexes 36

Introduction

A. Présentation de l'IRD

1) Présentation générale

Créé en 1944, l'Institut de recherche pour le développement est un organisme de recherche public français dédié au développement des pays du Sud (fig. 1). Il est placé sous la double tutelle des ministères chargés de la Recherche et de la Coopération. Ses recherches, centrées sur les relations entre l'homme et son environnement, se font dans une perspective de développement durable. Ses activités se déclinent autour des grandes problématiques du développement, que sont le domaine des risques environnementaux, du réchauffement climatique, de la désertification, de l'évolution des ressources en eau, de la gestion des écosystèmes marins et continentaux, de la nutrition, de la santé, des maladies émergentes, de l'éducation, des migrations et des politiques de lutte contre la pauvreté.

Figure 1 : implantation des centres IRD en France et dans le monde

2) L'IRD au Brésil

L'institut au Brésil est basé à Brasilia. Implanté depuis plus de 40 ans au Brésil, l'IRD représente, sur les 5 dernières années, un effectif moyen de près de 35 agents expatriés et conduit annuellement de 20 à 30 projets conjoints sur des thèmes divers. Les recherches de l'IRD sont menées dans le cadre général des accords de coopération signés entre la France et le Brésil, en 1967. Plus spécifiquement elles sont réalisées au terme de la convention avec le Conselho Nacional do Desenvolvimento (CNPq), signée le 2 janvier 1981 et renouvelée le 19 décembre 1996, ou encore de la convention avec la Fondation Oswaldo Cruz (FIOCRUZ), signée en septembre 2003. Outre ces accords cadres, il existe plusieurs accords particuliers concernant des projets conjoints

avec divers établissements, sous couvert de l'Agência Brasileira de Cooperação du Ministère brésilien des Relations Extérieures (ABC-MRE).

3) Le projet HyBAm

L'IRD au Brésil travaille en collaboration avec le programme HyBAm (Hydro-géodynamique du Bassin Amazonien). Ce programme est orienté vers le suivi à long terme des variables géodynamiques, hydrologiques et biogéochimiques de l'érosion/altération et des transferts de matière dans le bassin de l'Amazone. Ce projet scientifique regroupe le Brésil, l'Equateur, la Bolivie, le Pérou et la France. L'observatoire de recherche en environnement (ORE) - HyBAm est opérationnel depuis 2003, et est destiné à fournir aux chercheurs des données scientifiques de qualité, nécessaires pour comprendre et modéliser le fonctionnement des systèmes et leur dynamique à long terme. Proposé par une équipe de recherche du LMTG (Laboratoire des Mécanismes de Transferts en Géologie) qui développe depuis 1995 des projets de recherche en hydrogéodynamique dans le bassin de l'Amazone, l'ORE-HYBAM s'appuie également sur des partenaires locaux (agences nationales et universités) pour assurer la pérennité de ses observations.

B. Description et objectifs du stage

1) Position du projet dans le contexte du développement durable du Brésil et de la coopération entre l'IRD et les institutions brésiliennes

Le bassin amazonien est le plus grand réservoir tropical de carbone sur Terre. L'évolution de ce réservoir affecte et affectera significativement le climat de la planète (Malhi et al. 2008). Il est donc au cœur des débats scientifiques sur le climat.

La politique de développement du bassin amazonien au Brésil est fortement soumise à des contraintes environnementales appuyées par les organismes internationaux qui prônent un développement minimisant les émissions de gaz à effet de serre (GES). Le protocole de Kyoto fixe aujourd'hui des mesures allant dans le sens d'une diminution des émissions de GES et propose des coopérations entre pays industrialisés forts émetteurs et pays en voie de développement, tel que le Brésil. Ceci se traduit notamment par la mise en place de mécanismes de développement propre (MDP) élaborés dans le cadre du protocole de Kyoto. Aujourd'hui le Brésil fait partie des trois pays qui utilisent le plus de MDP, avec des projets parfois en partenariat avec la France (Bellier 2003 ; IEFP 2006).

Dans ce contexte, le Brésil a besoin d'évaluer ses bilans nets, d'origine naturel et anthropique, d'émissions de GES, en suivant les conseils du groupe d'experts intergouvernemental

sur l'évolution du climat (GIEC). Parmi les sources naturelles d'émissions de GES, les écosystèmes aquatiques continentaux sont aujourd'hui pris en compte dans les inventaires (IPCC 2006).

Ce stage s'inscrit dans une dynamique engagée ces dernières années au Brésil par l'équipe « Grands Bassins Fluviaux Tropicaux (GBFV) » de l'IRD. Le GBFV a pour objectif de renforcer la thématique de recherche sur le cycle du carbone dans les plaines d'inondations de l'Amazone, grâce à une collaboration étroite avec le Laboratoire Mixte International (LMI), l'Observatoire des Changements Environnementaux en Amazonie (OCE) qui associe l'IRD et l'Institut de Géosciences de l'Université de Brasilia (UnB).

2) Problématique scientifique et état de l'art : écosystèmes aquatiques amazoniens et effet de serre

Des processus naturels et anthropiques complexes modifient de nos jours le réservoir de carbone amazonien. Ces modifications affectent le recyclage et le stockage de carbone dans les forêts et les sols, et par conséquent, les teneurs en CO_2 dans l'atmosphère. Cependant, des incertitudes persistent quant à l'importance et à la distribution des flux de carbone entre l'atmosphère et le bassin amazonien. D'autre part, il manque des informations sur comment la déforestation pourrait être compensée par la reforestation ou la simulation de la production primaire associée au changement global.

Les émissions vers l'atmosphère de CO_2 associées à l'Amazone et ses plaines d'inondation ont récemment été estimées à 0,5 GtC/a pour une surface en eau de 300 000 km² (Richey et al., 2002). Pour comparaison, les émissions industrielles mondiales étaient de 7 PgC/a en 2005 (IPCC 2006). Cependant, cette estimation semble très élevée en comparaison avec d'autres sites : le dégazage de CO_2 serait 10 fois supérieur au flux de COD exporté par l'Amazone vers l'océan, ce rapport étant un ordre de grandeur supérieur à ceux estimés récemment pour des fleuves européens (Borges et al. 2006; Ciais et al. 2007, Billet et al. 2004).

Par ailleurs, Mayorga et al. (2005) ont montré par des mesures de carbone 14 que le CO_2 dégazant au niveau du fleuve était jeune (moins de 5 ans), nettement plus jeune que la majorité de la matière organique transportée par le fleuve (100-1000 ans). Ceci met en évidence l'extrême rapidité du recyclage de carbone entre la végétation, les sols et enfin, le milieu aquatique où il rejoint à nouveau l'atmosphère. Une conséquence majeure de ces travaux est que si le dégazage de carbone par les surfaces aquatiques n'est pas pris en compte, le pompage de carbone par la biosphère continentale sera surestimé. Dans leurs travaux, ces auteurs proposent que le pool de carbone labile provienne pour une part des plaines d'inondation.

Les travaux réalisées par l'équipe IRD GBFV et ses partenaires dans les plaines d'inondation amazonienne tendent à confirmer cette hypothèse en montrant que la production

primaire phytoplanctonique peut être intense dans les plaines d'inondation et que ces systèmes exportent une quantité importante de matière organique labile (Moreira et al, en révision). La production primaire dans les plaines d'inondation conduit à une réduction significative des émissions de CO_2 par ces surfaces (Abril et al, données non publiées). Ces résultats suggèrent que la valeur des émissions proposée par Richey et al, (2002) est probablement surestimée, leur échantillonnage ne prenant que très peu en compte les plaines d'inondation.

Les travaux engagés par l'équipe GBFV de l'IRD et ses partenaires visent à quantifier le rôle de la production primaire dans les plaines d'inondation amazoniennes sur les émissions de GES (CO_2, CH_4) et d'en étudier les variations spatio-temporelles. Il s'agit de caractériser la production primaire, ses facteurs de contrôle (contrôle hydrologique et hydrodynamique, par la lumière, par les conditions nutritives et par la pression zooplanctonique en relation avec les groupes phytoplanctoniques présents) et de son devenir. La méthodologie proposée repose sur un suivi de terrain, la mise en œuvre d'une modélisation couplée et l'utilisation de la télédétection pour régionaliser les résultats. Deux sites pilote contrastés ont été retenus pour la constitution d'une base de données suffisante à la modélisation couplée hydrobiogéochimique. Ce suivi est complété par des missions le long du cours inférieur de l'Amazone (Manaus/Santarem), ces missions étant destinées à servir de support à la régionalisation des résultats obtenus sur les deux sites pilotes.

C'est donc dans ce cadre qu'a été effectué ce stage. Des campagnes ont été réalisées sur un des sites retenus, la plaine d'inondation de Janauacà, mais également, sur d'autres plaines inondables, entre Manaus et Santarem, entre juin et juillet 2009.

C. Le site d'étude

1) Le bassin amazonien

Le bassin amazonien (fig. 2) est le plus grand bassin hydrographique continental au monde avec une superficie de $6{,}11 \times 10^6$ km^2. Il reçoit des précipitations moyennes de 2460 mm/a et le débit moyen à l'embouchure est estimé à 209 000 m^3/s (Molinier et al., 1997). Le bassin versant de l'Amazonie contribue à 20 % des apports en eaux douces aux océans (Callède et al., 2002) et le fleuve représente 5 % des surfaces continentales. L'Amazone est la plus grande rivière au monde en termes de flux d'eau et en termes de surface de drainage.

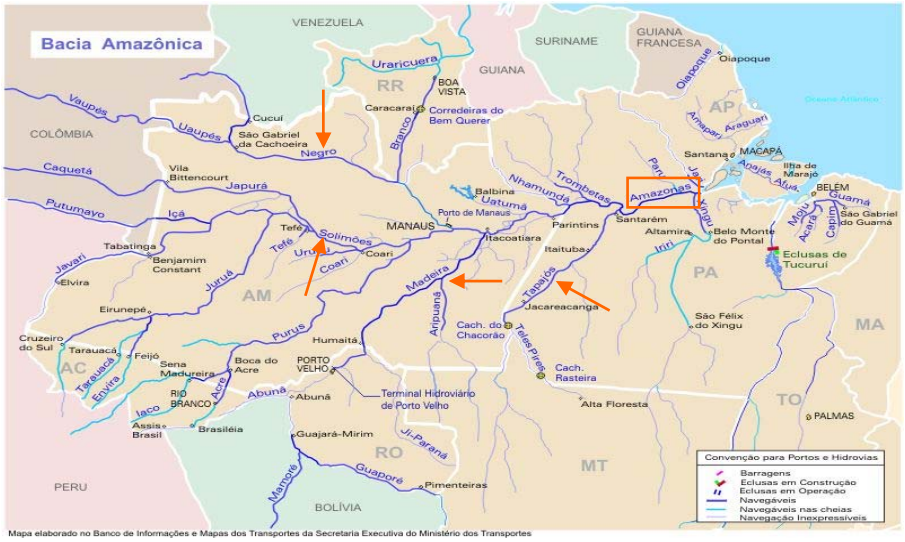


Figure 2 : bassin de l'Amazone et affluents principaux

Les tributaires de l'Amazone sont classés par la couleur de leurs eaux. Les eaux noires sont dominées par les matières organiques dissoutes (MOD), tel que le Negro. Ce fleuve prend sa source dans les plaines oxydées à sol sableux, où le taux en substances humiques dissoutes est élevé, le pH acide, et les matières en suspension (MES) quasi inexistantes (Moreira-Turcq et al., 2003).

Les eaux blanches, telles que le Solimões ou le Madeira sont dominées par les MES, qui proviennent de l'érosion mécanique des chaines andines. Elles ont peu de MO et sont moins acides que les eaux noires. Le Madeira et le Solimões sont les deux contributeurs majeurs en minéraux de l'Amazone (Moreira-Turcq et al., 2003).

Les eaux claires ont une forte production phytoplanctonique, comparable à celle des plaines d'inondations (Richey 1990, Junk 1997). Le Xingu, le Tapajos et le Trombetas sont parmi les plus grands fleuves d'eaux claires.

Table 1 : paramètres principaux (en moyenne) des tributaires principaux du bassin amazonien (Moreira-Turcq et al., 2003)

Fleuve	Surface (km^2)	Débit (m^3/s)	Précipitations (mm/an)	pH	Conductivité (µS/cm)
Negro	686 810	28 400	2 566	4.2	12.1
Solimões	990 780	103 000	2 900	7.6	78.2
Madeira	1 420 000	31 200	1 940	6.8	58

Les caractéristiques de la table 1 varient bien évidement en fonction du cycle hydrologique. Cependant, la faible variabilité interannuelle des précipitations, la taille importante du bassin

versant, le décalage entre les apports des tributaires et la capacité de stockage des várzeas, font qu'il y a une très faible variabilité interannuelle en ce qui concerne l'hydrographie de l'Amazonie.

Les fleuves du bassin amazonien sont accompagnés tout au long de leurs cours des zones d'inondations, les *várzeas*. Elles sont une composante importante de l'hydrologie, de la biogéochimie et de l'écologie du bassin. En effet, ces várzeas représentent une surface de 300 000 km^2, soit 5% de la superficie totale du bassin. La qualité des eaux des fleuves transitant par les várzeas est modifiée sous l'influence des processus hydrosédimentaire et biogéochimiques prenant place dans les plaines. De plus, 30 % de l'eau des tributaires de l'Amazone passe par les várzeas, tous les ans (Richey 1989).

Le régime hydrique des fleuves se décline en quatre phases ; la montée des eaux (janvier à avril), les pleines eaux (mai et juin), la descente des eaux (aout et septembre) et les basses eaux (octobre à décembre). Pendant la saison des hautes eaux, l'Amazone est à certains endroits 12 à 15 m plus haut que pendant la saison sèche. Il inonde alors, d'un bout à l'autre de son cours, une surface de plusieurs centaines de kilomètres carrés, couvrant ainsi les plaines inondées. En fonction de la taille des várzeas, leur niveau d'eau peut varier de plusieurs mètres.

2) La várzea de Janauacà

La plaine d'inondation de Janauacà est située à 40 km du sud-ouest de Manaus, dans l'état de l'Amazone (latitude entre 3°20'S et 3025'S ; longitude entre 60°23'W et 60°13'W). Sa superficie varie entre 60 et 160 km^2, avec des hauteurs d'eau allant de 13 à 25 m par rapport au géoïde, en fonction de la période hydrologique.

La várzea est reliée à un bassin versant, au sud, d'une superficie de 660 km^2 environ. Le système de rivières drainant ce bassin (igarapes) est caractérisé par des eaux noires riches en matière organique dissoute de type acide humique et fulvique. L'igarape principal alimentant la várzea a des profondeurs plus élevées que celles du lac.

Au nord-ouest de Janauacà il y a un chenal d'alimentation (paranà) qui sert de connexion avec le Solimões. C'est à partir de lui que la majorité de l'eau rentre ou sort du lac. Il est en eau toute l'année.

I – Partie expérimentale

A. Missions en Amazonie

De janvier à mai 2009, 4 missions de 3 à 4 jours ont été réalisées dans la várzea de Janauacà. Sur la figure 3 sont reportés les points échantillonnés conformément à ce qui est décrit ci-dessous.

1) Mesures in situ

Utilisation d'une sonde multiparamètres

De l'entrée de la várzea jusqu'au dernier point échantillonné (fig. 3) des transects sont enregistrés (une mesure toutes les trente secondes) grâce à la sonde multiparamètres YSI (modèle 6820-V2), préalablement calibrée d'après les instructions du fabricant. La sonde mesure les valeurs des différents paramètres de la qualité de l'eau : la température, le pH, la conductivité, la concentration en chlorophylle, la teneur en RFU, le pourcentage d'oxygène dissous et la concentration en oxygène. Cette sonde est placée dans un sceau alimenté à travers un tuyau qui pompe l'eau du fleuve en continue. Grâce à un GPS connecté à l'ordinateur, et à travers le logiciel GPS TrackMaker, il est possible de suivre le trajet du bateau sur une carte géoréférencée, marquée avec les points à échantillonner, existants.

Au niveau de chaque station, sont réalisés des profils verticaux avec la sonde multiparamètres (une mesure toute les dix secondes) tous les 50 cm. Une mesure à 50 cm de surface est également prise grâce à la sonde, pendant 1 minute.

Mesures in situ complémentaires

Les mesures de profondeur totale, à travers une corde graduée tout les 50 cm reliée à un poids, et de profondeur de pénétration de la lumière, grâce à un disque de Secchi artisanal, sont également réalisées.

Mesure de débit

Un jaugeage ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers, RD instrument) est réalisé dans le paranà d'alimentation de la várzea. L'ADCP utilise l'effet doppler pour calculer la vitesse des particules en suspension. Il y a 4 faces émettant un signal ultrason qui va être intercepté par les MES et ces dernières vont renvoyer ce signal à des intensités proportionnelles en fonction de la vitesse. L'ADCP calcule ainsi la vitesse des MES que l'on attribue à la vitesse de l'eau. L'ADCP permet également d'avoir le profil de la section (comme un sonar). Ainsi, avec la vitesse de l'eau et la section, le débit est obtenu.

Pour effectuer un profil ADCP, celui-ci est placé sur une embarcation qui effectue un aller-retour sur une section. L'aller-retour permet d'avoir une meilleure estimation du débit. Les données sont enregistrées grâce au logiciel Winriver préalablement configuré.

2) Prise d'échantillon et conditionnement pour analyses en laboratoire

Les échantillons d'eau sont récoltés à l'aide d'un préleveur type Van Dorf de 2 L, puis mis dans deux types de bouteilles. Dans deux bouteilles en verre ambré de 1 L, de l'eau destinée à la filtration de la chlorophylle et du carbone organique (CO), et dans une en plastique de 2 L pour la filtration des matières en suspension (MES).

Figure 3 : stations échantillonnées dans la várzea de Janauacà – au sud, les Igarapes (à gauche, celui de Janauacà, et à droite celui de Samauana) et au nord est, le paranà d'alimentation Les stations à suffixe « ME » et « MD » correspondent respectivement aux berges gauches et droites de points situés au milieu du lit

Les échantillons sont filtrés *in situ* à vide (500 mL ou 750 mL en fonction de la concentration) sur fibre de verre (porosité = 0.70 µm) pour la chlorophylle, ou sur filtre GF/F pyrolisés (450°C pendant 12h) et pré pesés pour le COP (porosité = 0.70 µm). Les MES sont récoltées sur des filtres en acétate de cellulose pré pesés (porosité = 0.45 µm).

La filtration de la chlorophylle se fait sur des unités de filtrations NALGENE de 250 mL placées sur une rampe de filtration. La chlorophylle est filtrée en deux réplicas. Les filtres à chlorophylle sont emballés et congelés à -20°C jusqu'à analyse.

Pour la filtration des MES, 250 mL d'eau sont passés dans des unités de filtration NALGENE de 250 mL en plastique afin d'éviter une contamination par la silice, puis jetés. De nouveau 250 mL d'eau sont passés, desquels sont récupérés trois fois 50 mL qui sont versés dans trois tubes gradués destinés à l'analyse des cations, des anions et de l'alcalinité. Les tubes pour

l'analyse des ions sont placés dans le congélateur à -20°C. Les filtres à MES sont mis à sécher dans leur boite de pétri.

La filtration du CO se fait sur une unité de filtration en verre de 250 mL afin d'éviter toute contamination par le plastique. Comme pour la filtration des MES, 250 mL d'eau sont filtrés puis jetés. De nouveau 250 mL sont passés, desquels sont récupérés environ 50 mL destinés à l'analyse du COD, dans un tube pyrolisé à 450 °C. L'échantillon est acidifié au H_3PO_4 puis congelé à -18°C. Deux cent cinquante millilitres repassent sur le filtre. Celui-ci est ensuite mis à sécher dans sa boite de pétri pour l'analyse du COP. Les filtres du COP et les tubes de COD sont envoyés au LMTG de Toulouse pour y être analysés. Les autres échantillons (filtres à chlorophylle, à MES, anions, cations, alcalinité) sont analysés au LAGEQ de Brasilia.

3) Autres sources de données

En complément des données de campagnes, deux observateurs locaux permettent le suivi journalier des hauteurs d'eau (deux lectures par jour) au point PAR (Station Santa Maria) et au point RL1 (station Tilheiro).

Des campagnes de terrain ont été réalisées au cours de l'année 2008. La table 2 récapitule les données récoltées et les mesures prises.

Table 2 : résumé des campagnes précédentes (paramètres mesurés, types d'échantillonnage)

Date	Paramètres limnologiques mesurés	Echantillonnages	Nombre de profils et de points	Epoque hydrologique
6-10 février 2008	*, ions, COD/COP, débits.	Profils verticaux	13;30	Montée des eaux
16-17 mars 2008	**, ions, COD/COP, débits.	Profils verticaux	7;26	Montée des eaux
mai 2008	**, ions, COD/COP, débits, MES.	Profils verticaux, cycle diurne	10;10	Hautes eaux
31 janvier 2009	**, ions, COD/COP, débits.	Superficie et profils verticaux	13;30	Montée des eaux

** : température, pH, conductivité spécifique, teneur en oxygène dissout, turbidité, ** : température, pH, conductivité spécifique, teneur en oxygène dissout, chlorophylle*

B. Analyses en laboratoire

1) Analyse de la chlorophylle par fluorimétrie

La fluorimétrie est la mesure de la fluorescence d'un échantillon, à une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière incidente. La fluorescence est obtenue lors du passage des électrons

de certaines molécules de l'échantillon d'un état excité à un état de base. Il y a absorption de la lumière par l'échantillon à une longueur d'onde (340-500 nm) et réémission à une nouvelle longueur d'onde (> 665 nm), généralement supérieure. Le détecteur reçoit une lumière à deux composantes. La première est proportionnelle à la concentration inconnue de l'échantillon. En réalité, au delà d'une certaine concentration, il n'y plus proportionnalité et une certaine saturation de la lumière fluorescée se produit. La seconde composante est relativement constante. Il s'agit d'une lumière parasite due aux imperfections techniques de l'appareil et à l'effet Raman du solvant (c'est la diffusion d'une partie de la lumière transmise par le solvant à une longueur d'onde différente de celle de la lumière incidente).

Les filtres sont insérés dans des tubes de 15 mL avec 10 mL d'éthanol à 96 % et broyés jusqu'à l'obtention d'une bouillie. Les tubes bouchés sont conservés au réfrigérateur durant 24 h, puis centrifugés 5 minutes à 3500 tours/min. Selon la coloration de la solution (incolore à vert soutenu), une dilution, avec de l'éthanol à 96 % est appliquée. Dans la majorité des cas, la solution nécessite d'être diluée avant passage au fluorimètre. Pour les échantillons prélevés à Janauacà, les dilutions employées vont de 1/10ème au 1/100ème.

Un blanc (éthanol à 96 %), est réalisé à chaque nouvelle série. Après la première lecture, les échantillons sont acidifiés avec 0,2 mL d'acide chlorhydrique (HCl) à 0,3 M afin de dégrader la chlorophylle pour l'analyse de la phéophytine, puis lus de nouveau après 3 minutes de contact. Deux filtres par station sont analysés. Lorsque les lectures sont similaires, une moyenne est faite pour en déduire la concentration en chlorophylle. En cas d'écart trop important, le troisième filtre est alors analysé. Les deux valeurs les plus proches sont retenues pour la moyenne des concentrations. La procédure est identique pour la phéophytine. La somme des concentrations en chlorophylle a et en phéophytine représente la concentration totale en chlorophylle dans l'échantillon.

2) Analyse des cations et des anions majeurs en chromatographie ionique en phase liquide

La chromatographie est une technique d'analyse permettant la séparation des divers constituants d'un mélange. Un fluide, la « phase mobile » parcours une colonne, la « phase stationnaire ». A l'instant initial, le mélange à séparer est injecté à l'entrée de la colonne où il se dilue dans la phase mobile qui l'entraîne à travers la phase stationnaire. De ce phénomène, appelé rétention, il en résulte que les constituants du mélange injecté se déplacent tous moins vite que la phase mobile et que leurs vitesses de déplacement sont différentes. Ils sont ainsi élués de la colonne les uns après les autres et donc séparés. Un détecteur placé à la sortie de la colonne couplé à un enregistreur permet d'obtenir un tracé appelé chromatogramme. Dans des conditions

chromatographiques données, le « temps de rétention » (temps au bout duquel un composé est élué de la colonne et détecté) caractérise qualitativement une substance. L'amplitude de ces pics permet de mesurer la concentration de chaque soluté dans le mélange injecté en le comparant à une courbe d'étalonnage.

Vingt-cinq microlitres d'échantillon sont injectés dans un courant d'éluant puis envoyés dans une colonne de chromatographie. La solution passe ensuite dans un suppresseur qui supprime la conductivité de l'éluant et favorise ainsi la détection des ions.

L'appareil utilisé est un chromatographe ionique (ICS 90 DIONEX) en mode isocratique. Selon les éléments à doser, cations ou anions, les consommables et paramètres analytiques sont différents (table 3).

Table 3 : caractéristiques des composantes en chromatographie ionique, pour l'analyse des cations et des anions

	Eluant	Régénérant	Précolonne	Colonne	Pression	Conductivité
Cations	acide methanosulfonic	hydroxyde de tetrabutylammonium	IonPac CG12A 4*250 mm	IonPac CS12A, 4*250mm, 5 µm ø	1500 psi	2-3 µS
Anions	carbonate/ bicarbonate de sodium	acide sulfurique	IonPac AG14A 4*250 mm	IonPac AS14A 4*250mm, 5 µm ø	1800-2100 psi	25-27 µS

Préparation de la gamme étalon

A partir de solutions mères à 1000 ppm, est préparée, d'un côté, une solution fille à 100 ppm, pour le magnésium, le potassium et le sodium, à 200 ppm pour le calcium et à 50 ppm pour l'ammonium, et de l'autre, une solution file à 100 ppm pour chaque anion (fluorures, chlorures, nitrates, phosphates et sulfates). A partir de ces solutions filles, une gamme étalon de 6 points est confectionnée pour les cations (annexe 1), et une pour les anions (annexe 2).

3) Analyse des cations majeurs par spectrométrie d'absorption atomique

Un échantillon liquide est injecté sous forme de brouillard au moyen d'un nébuliseur dans une flamme, généralement air-acétylène. Les éléments présents dans l'échantillon sont alors dissociés à l'état d'atomes ou d'ions et excités par l'énergie thermique de la flamme. En retournant à leur état fondamental, les atomes émettent un rayonnement proportionnel à leur concentration à une longueur d'onde caractéristique de chaque élément.

Il existe 2 possibilités de fonctionnement :

• Emission : Mesure directement le rayonnement émis par l'élément

• Absorption : Une lampe (cathode) constituée du métal (ou des métaux) à doser émet un rayonnement de même fréquence que celui d'émission des photons. L'élément, introduit dans la flamme (de type air-acétylène oxydante), absorbe le rayonnement produit par la lampe. Dans ce cas est mesurée la différence d'intensité.

Dans les deux cas les rayonnements émis sont traités par un monochromateur puis, au moyen de logiciels d'acquisition, transformés en signaux quantifiables.

Sont ainsi dosés le potassium (λ = 383 nm) et le sodium (λ = 295 nm) (Perkin Elmer 603).

4) Analyse des cations majeurs par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-AES)

Dans ce type de spectrophotomètre, la flamme est remplacée par un plasma de particules neutres et chargées (mélange gazeux à haute température de 6000 K à 8000 K). Le gaz utilisé est généralement l'argon, parfois l'hélium. Par rapport au spectrophotomètre d'absorption atomique cet équipement permet l'analyse séquentielle de l'ensemble des éléments désirés et présente une limite de détection généralement très nettement supérieure. Cependant, la vétusté de l'appareil ne permet pas le dosage du potassium et du sodium. Le calcium (λ = 422,7 nm) et le magnésium (λ = 285,2 nm) sont dosés à l'aide de cette technique.

5) Autres analyses

Les MES sont quantifiées après que les filtres soient séchés pendant 12 h à 60 °C. L'alcalinité est déterminée sur un échantillon de 50 mL, au moyen d'un titrimètre automatique (SCHOTT TitroLine *easy*) par dosage à l'acide sulfurique (0,001 M) jusqu'à un pH de 4,3. La conductivité est mesurée au moyen d'un conductimètre de terrain (WTW 340i). Les filtres COP sont séchés pendant 3 h à 60 °C puis pesés. Ils sont ensuite acidifiés à l'acide chloridrique (0,01 M) afin d'éliminer les carbonates. Le COP est analysé au moyen d'un analyseur élémentaire CHN Perkin Elmer. L'analyse est basée sur la combustion directe à travers un four à induction et sur l'absorption à l'infrarouge du CO_2 produit. Le pourcentage de carbone organique est ramené à une masse totale de particule. Le COD est analysé à l'aide d'un analyseur de carbone total (Shimadzu 500), à haute température, d'après le protocole décrit par Cauwet (1994).

C. Mise en place du modèle hydrologique

1) Principe du modèle

Le modèle proposé, appelé HEVa, calcule la variation du volume du système en fonction du temps avec un pas journalier, en quantifiant les flux entrant et sortant du système selon l'équation ci-dessous. Ce modèle permet de quantifier les différentes sources d'eau dans le système, et en particulier de connaitre les débits échangés avec le fleuve. Ce modèle a été développé pour la plaine d'inondation de Curuai (Bonnet et al, 2008) à partir des travaux de Lesack et Melack (1995), et a été transposé pour le site de Janauacà. A chaque pas de temps, le modèle calcule les variations du volume du système en fonction du volume au pas précédent tel que :

$$\mathbf{VL_{t+1} = VL_t + (QP - QE + Qpar + Qattz + Qbv)*\Delta t}$$

avec VL le volume (m^3) du système, t le pas de temps, QP les précipitations sur la várzea (m^3/j), QE l'évaporation (m^3/j), Qpar les débits entrants (positifs) ou sortants (négatifs) de la várzea (m^3/j), Qattz le ruissellement provenant de l'ATTZ "aquatic–terrestrial transition zone" (différence entre les surfaces maximale et minimale immergées), Qbv le ruissellement en provenance du bassin versant au sud (m^3/j).

Le modèle quantifie chacun des flux et en déduit la variation de volume au cours du pas de temps. Les résultats sont vérifiés en comparant les hauteurs d'eau calculées avec celles mesurées dans le lac et en comparant les débits calculés dans le paranà et les débits mesurés lors des campagnes. Les données nécessaires et utilisées pour la mise en œuvre du modèle sont listées ci-dessous.

2) Données d'entrée du modèle

La modélisation du bilan hydrique et des bilans de matière adoptée nécessite :

- la géométrie des lacs composant la várzea (courbes de surface, volume en fonction de la hauteur d'eau). Les données de bathymétrie obtenues sur le site ont permis d'établir les relations suivantes :

Surface de la várzea en fonction de la hauteur d'eau dans le lac, décrite par l'équation :

$y = 0{,}2102\ x^3 - 12{,}122\ x^2 + 238{,}08\ x - 1510{,}7$ ($R^2 = 0{,}9938$)

Volume de la várzea en fonction de la hauteur d'eau dans le lac, décrit par l'équation :

$y = 0{,}0053\ x^2 - 0{,}118\ x + 0{,}638$ ($R^2 = 0{,}9986$)

- les précipitations et température moyenne maximales mensuelles pour le calcul de l'évaporation
- les hauteurs d'eau mesurées dans les fleuves et la hauteur d'eau initiale dans les lacs
- la superficie du bassin versant local

II – Résultats

Les résultats exploités concernent les campagnes réalisés de janvier à mai 2009 pour la partie variations spatio-temporelles, mai 2008 pour le cycle diurne, et les données hydrologiques des années 2006, 2007, 2008 et 2009 pour la partie concernant le modèle hydrologique.

A. Hydrologie de la várzea

1) Débits

Les cotes du lac et du paranà (table 4) déterminent en principe la direction de l'eau. Au cours du temps les cotes et le débit ont augmentés. En janvier, le débit était encore entrant, mais à partir de mars, il correspondait à un débit sortant, du lac vers le Solimões.

Table 4 : cotes dans le lac et le paranà, débits et direction de l'eau, à Santa Maria et Terra Alta, pour les mois de janvier, mars, avril, mai et juin 2009; ND=non déterminé

Santa Maria	Janvier	Mars	Avril	Mai	Juin
Cote du lac (m) nivelée	20,25	23,11	24,60	24,79	25,83
Cote du paranà (m) nivelée	19,73	22,50	23,88	23,56	24,04
Débit dans paranà (m^3/s)	263,00	478,19	686,50	**676,73**	756,16
direction	*Entrant*	*sortant*	*sortant*	*sortant*	*sortant*
Terra Alta					
Débit dans paranà (m^3/s)	ND	ND	843,83	968,86	1000,45
direction			*sortant*	*sortant*	*sortant*

A Santa Maria les berges ne sont pas facilement accessibles, pour cela des jaugeages sont maintenant faits à Terra Alta. Le bateau ne pouvant pas atteindre les marges du lit, le débit calculé ne prend en compte qu'un certain pourcentage de l'eau, du débit. Ainsi, avec la montée des eaux, de plus en plus de débit est perdu. Ceci se traduit par un débit en mai inférieur à celui d'avril.

2) Hauteurs d'eau

Depuis le 1/9/2006 deux observateurs contrôlent quotidiennement à 7h et à 17h les cotes d'eau par la lecture de deux règles limnimétriques. La première règle (point RI1 de coordonnées 3.42364S-60.26396W : station Tileiro (fig. 3)) correspond à l'entrée sud du lac et est notée LAC dans la table 5. L'autre station, de coordonnées 3.36836S-60.19268W, est celle de Santa Maria et est située dans le paranà d'alimentation de la várzea (fig. 3). Elle est notée PAR dans la table 5.

Table 5 : valeurs minimales et maximales des cotes (m) dans le lac et le paranà pour les trois cycles hydrologiques étudiés (2006-2007, 2007-2008 et 2008-mi 2009)

2006-2007		**8/10/06-8/10/07**		
	LAC		PAR	
	7h	17h	7h	17h
min	13,73	13,73	13,09	13,12
max	23,85	23,85	23,45	23,45

2007-2008		**9/10/07-14/10/08**		
	LAC		PAR	
	7h	17h	7h	17h
min	13,16	13,17	12,95	12,94
max	24,11	24,11	23,81	23,81

2008-2009		**15/10/08-15/04/09**		
	LAC		PAR	
	7h	17h	7h	17h
min	14,25	14,25	13,79	13,78
max	24,23	24,25	23,5	23,53

En avril 2009, l'année hydrologique actuelle (2008-2009) n'étant pas terminée, la montée des eaux se poursuit et pourtant, les valeurs maximales de cotes (table 5), tant dans le lac que dans le paranà, sont plus élevées que celles rencontrées lors des autres cycles hydrologiques (qui eux sont complets).

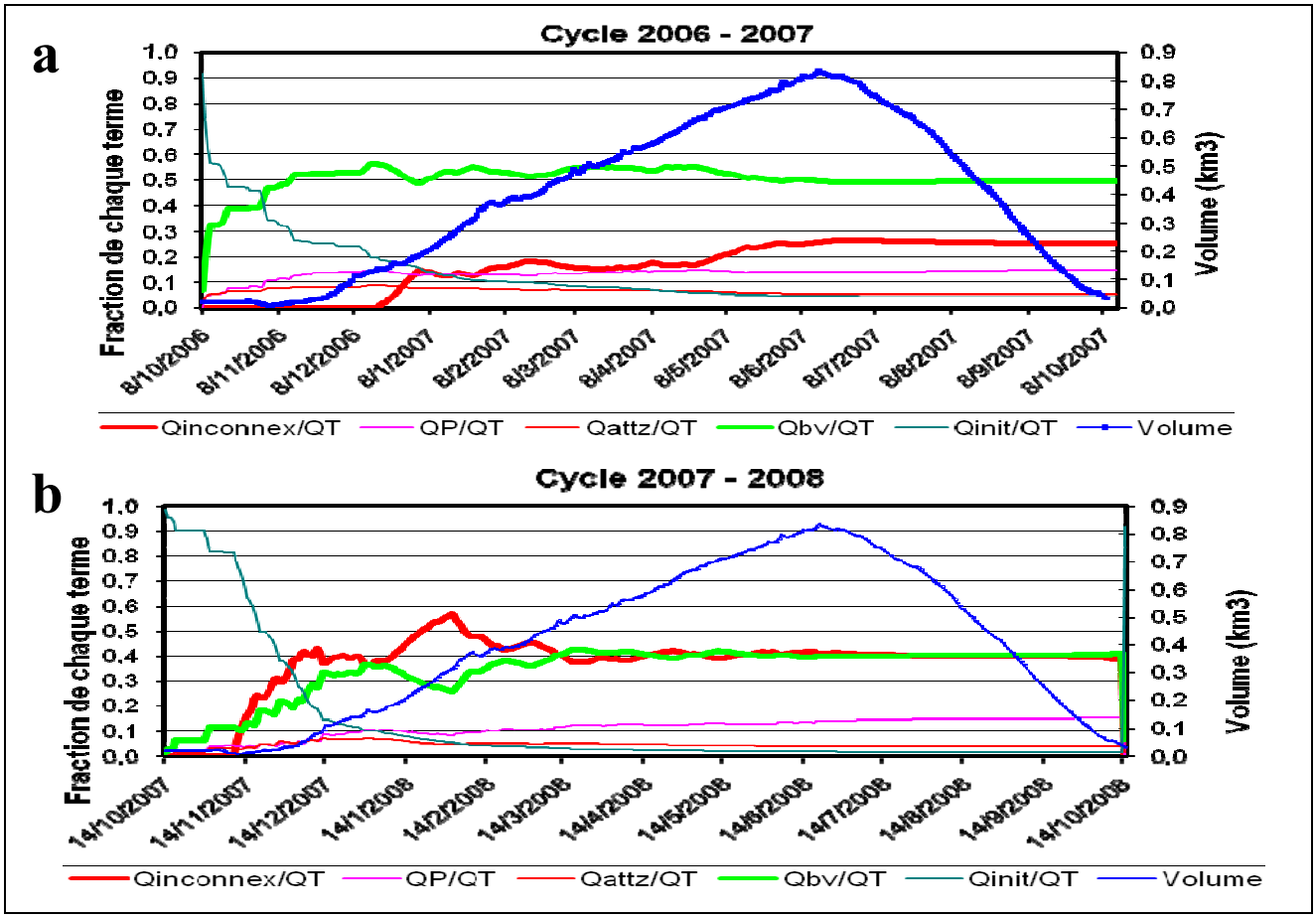
Les échelles limnimétriques ont été nivelées par rapport au niveau de la mer à partir de l'altimétrie satellite radar (données ENVISAT) par Joecila Santos da Silva (Doctorante cotutelle: Université Paul Sabatier/Université Fédérale du Rio de Janeiro). Le nivellement des stations permet de comparer les séries entre elles et en déduire les pentes et est indispensable pour mettre en place la modélisation. Les séries de hauteurs d'eau dans l'igarape au sud ainsi que dans le Solimões (au niveau du paranà à l'entrée de la várzea) ont été calculées à partir des séries temporelles altimétriques (données ENVISAT).

3) Modèle hydrologique

Le modèle a été mis en œuvre pour la période du 1/09/2006 au 6/04/2009, pour laquelle l'ensemble des données nécessaires était disponible. Dans ce travail, le modèle a été utilisé dans sa forme la plus simple, les termes de débordement, d'échanges avec la nappe n'ont pas été pris en compte. Ceci a permis d'une part de limiter au maximum la calibration du modèle et d'autre part, de

mettre en évidence les flux les plus importants pour reproduire le bilan hydrologique de la várzea. La comparaison des courbes de hauteurs d'eau mesurées in-situ avec celles modélisées permet de vérifier et de valider le modèle. L'écart moyen entre les deux séries est de 3 cm pour l'ensemble de la période.

Après avoir validé le modèle par comparaison des courbes de hauteurs d'eau in-situ et modélisée, il est possible d'estimer les contributions des différents réservoirs au cours du temps. Les résultats montrent des variations interannuelles importantes. Le bilan hydrique pour la várzea de Janauacà a été calculé pour la période allant de septembre 2006 à mai 2009. Pour cette várzea, les contributions principales sont le bassin versant local et le Solimões, leur part respective variant selon le cycle hydrologique étudié. En 2006-2007 (fig. 4a), la source principale d'eau est le bassin versant local qui contribue à 50 % tandis que le Solimões contribue à 35 % ; en 2007-2008 (fig. 4b) leur contribution est similaire et égale à 40%, et pour le cycle 2008-2009 (fig. 4c), en mai 2009, le Solimões constituait la source principale avec environ 55 %. Le temps de séjour des eaux moyen est de 5 mois. Il y a des variations des contributions au cours de ce cycle. En effet, au mois de décembre, les apports du bassin versant dominent alors qu'en février, les apports dominants sont ceux du fleuve.



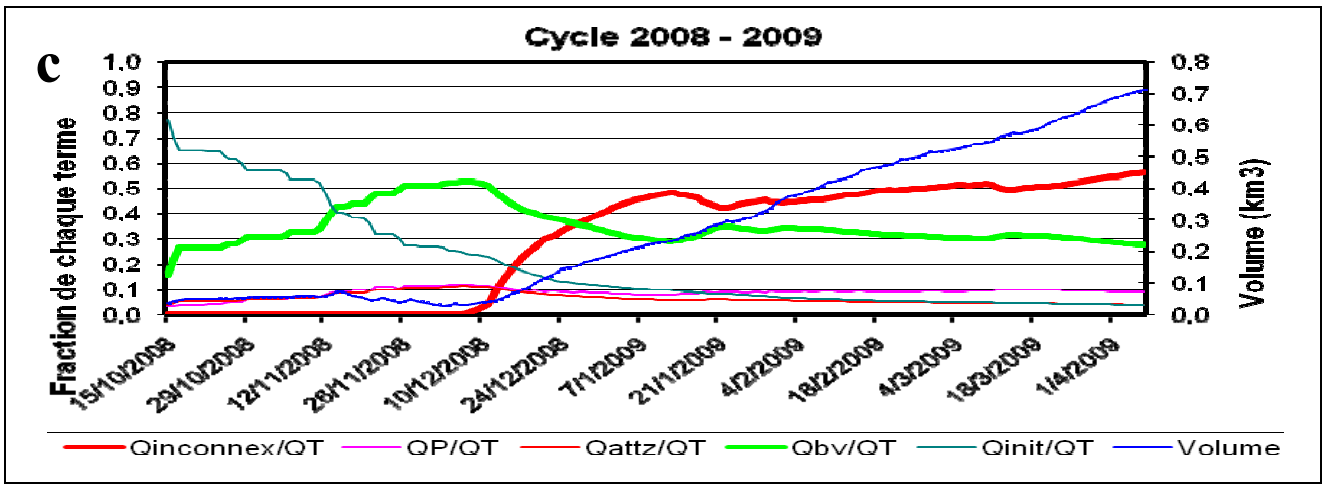


Figure 4 : fraction des différentes sources par rapport au flux total entré pour les cycles 2006-2007 (a), 2007-2008 (b) et 2008-2009 (c). Qinconnex/QT est la fraction provenant du fleuve, QP/QT est la fraction provenant des pluies, Qattz/QT la fraction provenant de la zone ATTZ, Qbv/QT est la fraction issue du bassin versant, Qinit/QT la fraction de départ.

B. Variations spatio-temporelles des paramètres de la qualité de l'eau

Dans cette partie, sont présentés les résultats obtenus lors des campagnes réalisées en janvier, mars, avril et mai 2009. Dans le cycle hydrologique, cette période correspond à la montée des eaux, et les hautes eaux pour le mois de mai.

1) Gradient vertical

Compte tenu du grand nombre de données acquises sur le terrain, cinq stations ont été choisies pour illustrer l'évolution des différents paramètres dans les temps et dans l'espace. Ces points ont été choisis en fonction de leur emplacement et de leurs caractéristiques géochimiques. Il s'agit de : IF06, S09b, LF06, LF07 et LF03 (fig. 3). Les profils verticaux permettent de visualiser ce qui se passe en profondeur, au cours des mois, mais également, les variations en profondeur des différents endroits du lac.

La station IF06 correspond à la rencontre des eaux en provenance des igarapes (annexe 3). Ces eaux proviennent du bassin versant, et sont plus claires que les eaux du Solimões. Le point S09b correspond à l'extrémité ouest du lac (fig. 5). Cette station n'est pas toujours accessible compte tenu de la variation du niveau de l'eau. LF06 se situe à l'est du lac et est toujours accessible (annexe 4). Le point LF07 se situe au milieu du lac, et est toujours accessible. Il n'a été crée qu'en mars d'où l'absence de données en janvier (annexe 5). La station LF03 est située à un endroit stratégique, au sud-est du lac. Il s'agit d'un point qui reçoit le mélange des eaux provenant des igarapes au sud, et du Solimões, au nord, par infiltration à travers des canaux formés sur les berges

qui séparent la rivière du lac. A certaines périodes du cycle hydrologique, il s'agit d'un lieu à forte production primaire (annexe 6).

Au cours des différentes campagnes réalisées de janvier à mai 2009, la même tendance a été notée pour la majorité des stations, à savoir, une baisse de la concentration en chlorophylle accompagnée d'une diminution de la disponibilité en oxygène dissous. En janvier le maximum de chlorophylle est observé. Il s'agit du tout début de la montée des eaux. Du fait de la crue exceptionnelle de 2009, le niveau de l'eau a augmenté très vite et très tôt, et a entrainé une dilution des sels nutritifs et du taux de chlorophylle.

La figure 5 est une illustration de ce qui est observé dans le lac, au cours de la montée des eaux, en S09b. Les autres figures représentant les profils verticaux en IF06, LF07, LF06 et LF03 se trouvent en annexe (respectivement 3, 4, 5 et 6).

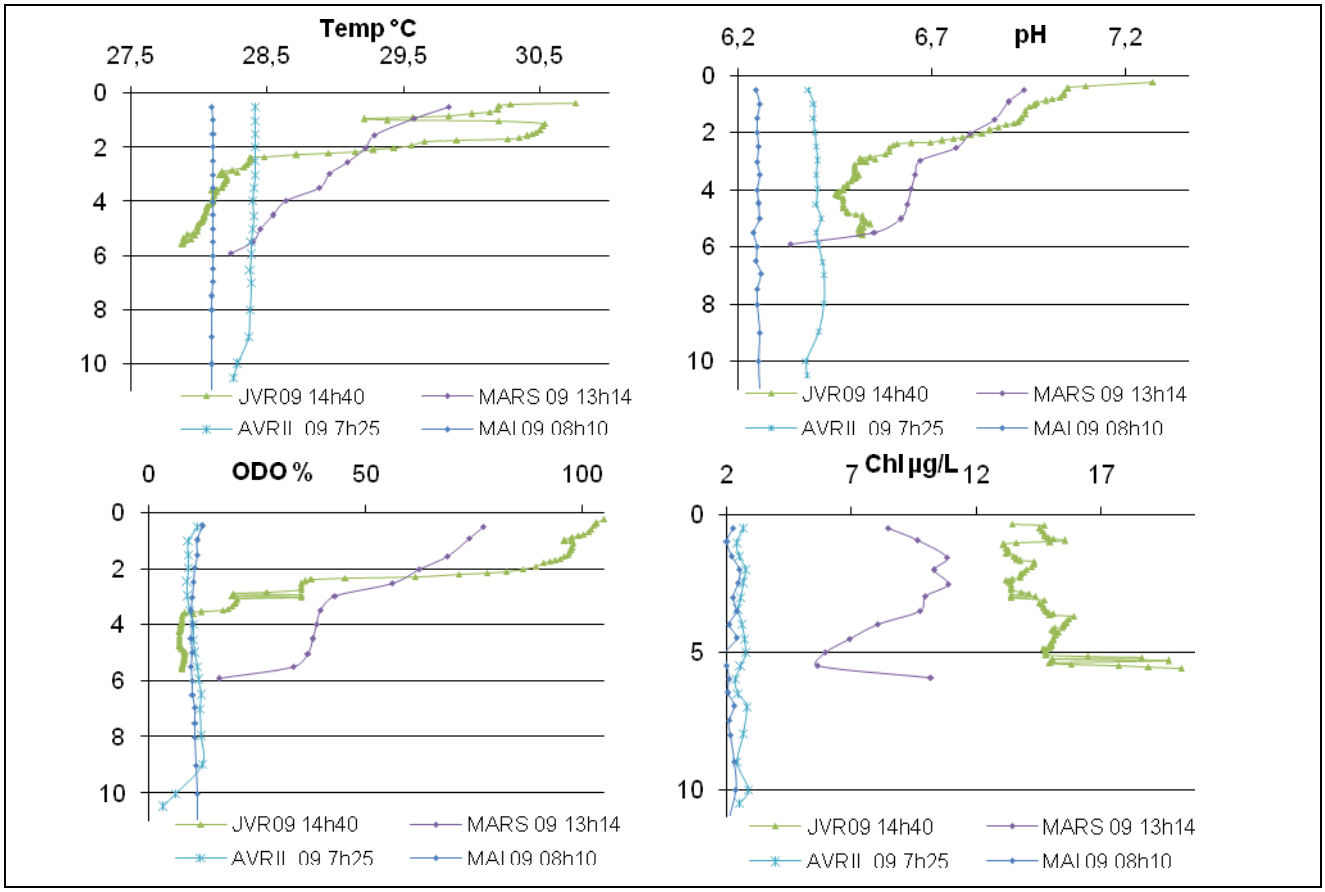


Figure 5 : variations dans le temps des paramètres en fonction de la profondeur, en S09b (profondeurs maximales : 5,5, 6, 10,5 et 11 m, respectivement pour janvier, mars, avril et mai)

Les campagnes de janvier et mars montrent une stratification du milieu qui n'est plus visible à partir d'avril. En ce qui concerne la température, il existe 3 °C de gradient en janvier (30,76 °C en surface, et 27,88 °C au fond), 1,5 °C en mars, entre la surface et la profondeur (respectivement, 29,83 °C et 28,23 °C), puis en avril et mai, cette variation de température s'estompe. Un

refroidissement global de la masse d'eau est également à noter. Les mêmes tendances sont constatées chez les autres paramètres (pH, ODO % et chlorophylle), soit des valeurs plus fortes en janvier et mars, qui diminuent en avril et s'estompent en mai. La colonne d'eau perd sa stratification pendant la montée des eaux.

En ce qui concerne les autres points échantillonnés (IF06, LF06, LF07 et LF03) la même tendance est observée, à savoir un refroidissement de la colonne d'eau et une perte de la stratification entre janvier et mai 2009.

2) Lumière et zone euphotique

A partir du coefficient d'extinction de la lumière (η = 1,77/secchi(m)), la profondeur de la zone euphotique est calculée ($Z_{euph} = (-\ln(0,01))/\eta$). La table 6 récapitule les données de pénétration de la lumière (calculée *in situ* grâce au Secchi), de la profondeur de la zone euphotique et de la concentration moyenne en chlorophylle dans la zone euphotique, d'après les données de la sonde.

Table 6 : profondeur de pénétration de la lumière (m), profondeur de la zone euphotique, moyenne de la concentration en chlorophylle dans zone euphotique, en IF06, S09b, LF07 et LF03, de janvier à mai 2009 - ND = non déterminé

		Janvier	Mars	Avril	Mai
IF06	Secchi (m)	ND	ND	1,50	1,70
	Z. Euphotique (m)			3,90	4,42
	µ chl Z.E. (µg/L)			5,85	4,75
S09b	Secchi (m)	ND	1,12	0,75	1,10
	Z. Euphotique (m)		2,91	1,95	2,86
	µ chl Z.E. (µg/L)		10,00	2,58	2,28
LF06	Secchi (m)	ND	0,50	0,80	1,20
	Z. Euphotique (m)		1,30	2,08	3,12
	µ chl Z.E. (µg/L)		3,40	2,71	2,05
LF07	Secchi (m)	ND	0,71	1,25	1,25
	Z. Euphotique (m)		1,85	3,25	3,25
	µ chl Z.E. (µg/L)		5,74	3,50	2,50
LF03	Secchi (m)	ND	0,90	1,35	1,25
	Z. Euphotique (m)		2,34	3,51	3,25
	µ chl Z.E. (µg/L)		5,60	4,08	2,19

La tendance générale est à une augmentation de la zone euphotique en fonction du temps.

3) Gradient horizontal : variation des paramètres dans le temps et dans l'espace

Chlorophylle et zone euphotique

Malgré le fait que pour ce genre de mesure les données sont fonctions de la lumière et du temps (brassage par le vent), il est à remarquer qu'au cours du temps la concentration moyenne en chlorophylle diminue dans la zone euphotique (table 6).

Chlorophylle extraite

Il a été constaté au cours des campagnes de janvier à mai 2009, que les résultats des analyses en chlorophylle différaient d'un filtre à un autre. L'hypothèse la plus plausible pour expliquer cet écart persistant est que les filtres utilisés n'étaient pas adéquat ; ils se dégradent au cours du temps. Des expériences réalisées au cours de la campagne de juin 2009, avec d'autres filtres ont plus ou moins validé cette hypothèse. Ceci fait que les résultats obtenus pour la chlorophylle extraite ne sont pas bons et ne sont donc pas exploités.

Les cartes de distribution spatio-temporelles des différents paramètres (conductivité, oxygène et chlorophylle) ci-dessous sont des interpolations sous Matlab des valeurs de surface obtenues avec la sonde multiparamètre.

Chlorophylle et sonde multiparamètre

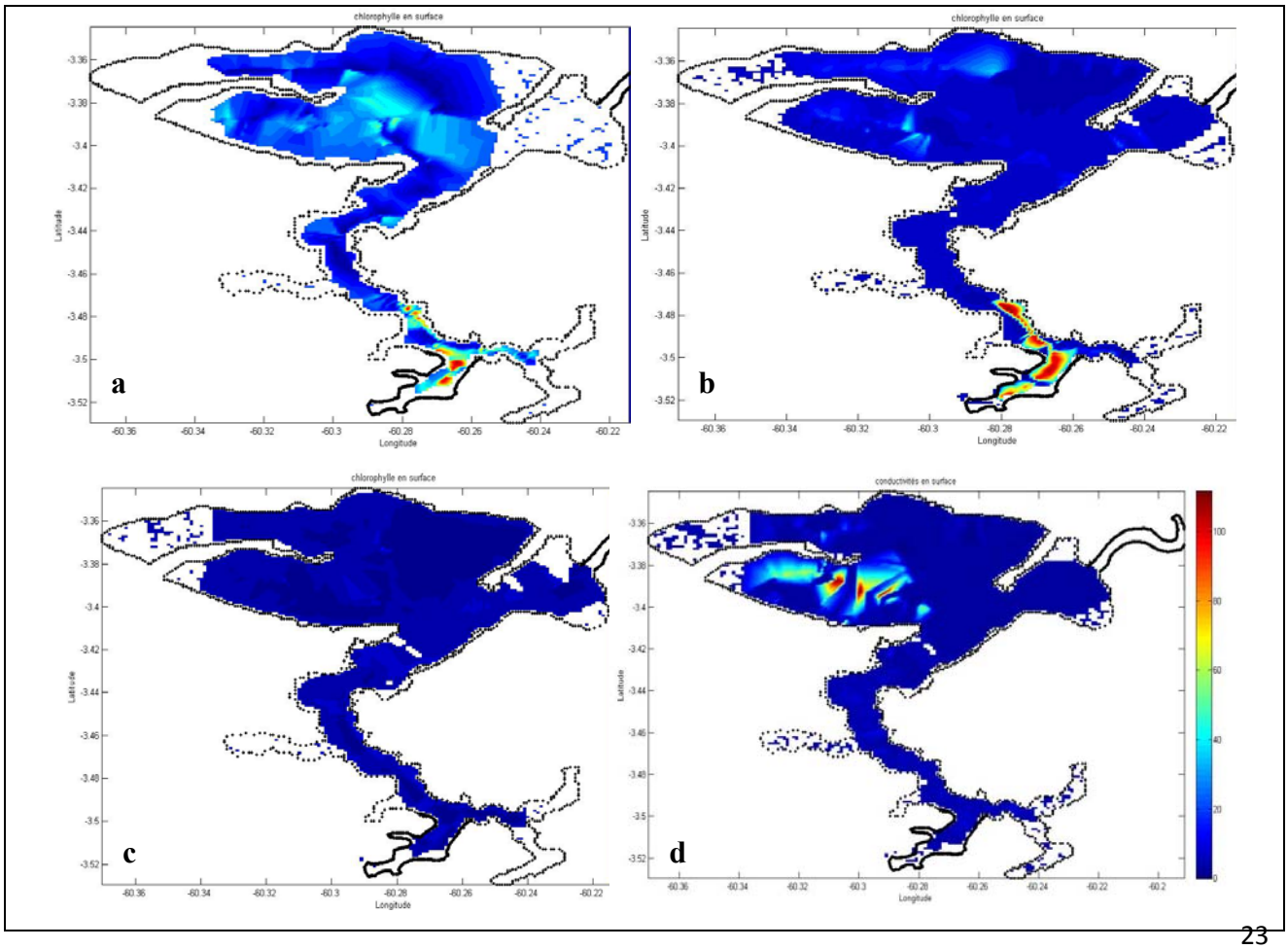


Figure 6 : variation spatiale de la chlorophylle en surface (50 cm de profondeur) obtenue avec les transects, en janvier (a), mars (b), avril (c) et mai (d)

Les données en surface de chlorophylle sont des données relatives parce que la sonde multiparamètre ne fournit pas les valeurs réelles, mais juste une idée qualitative. D'autre part, les variations spatiales peuvent être masquées ou au contraire, surestimées par des variations liées à l'heure de l'échantillonnage ou bien à l'ensoleillement.

Les eaux provenant du bassin versant semblent être plus concentrées en chlorophylle que les eaux du lac, alimentées par le Solimões (fig. 6). Au cours du temps pourtant, les concentrations s'homogénéisent dans l'ensemble de la plaine, même si en fonction des mois, des blooms très localisés sont observés, comme par exemple au sud-ouest du lac, en LF03.

Les valeurs de chlorophylle en surface obtenues avec la sonde multiparamètre ne représentent pas les concentrations réelles dans la zone euphotique du fait de la photo-inhibition. En calculant la profondeur de la zone euphotique, la concentration moyenne en chlorophylle dans celle-ci fut réellement estimée (table 6).

Conductivité

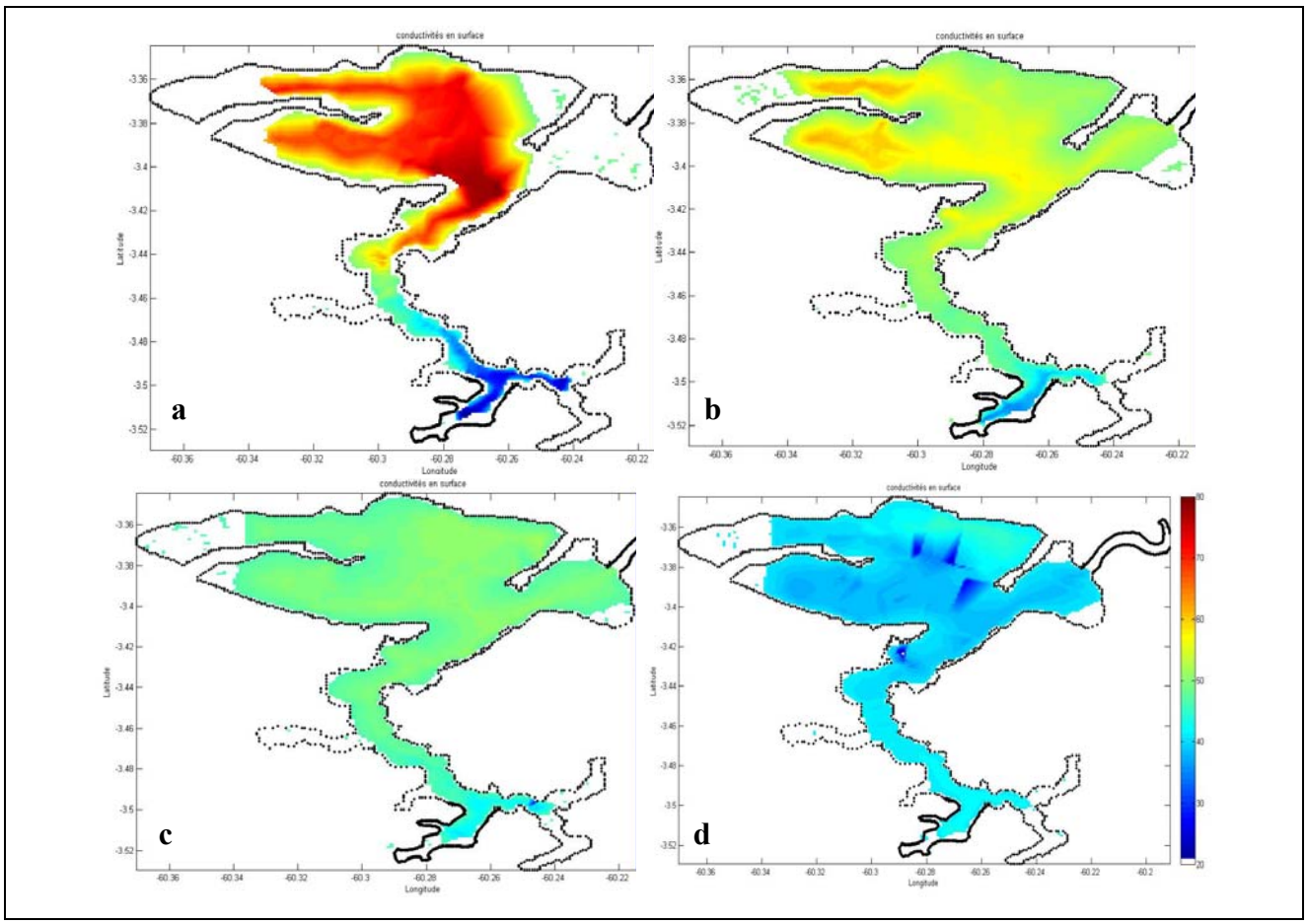


Figure 7 : variation spatiale de la conductivité en surface (50 cm de profondeur) obtenue avec les transects, en janvier (a), mars (b), avril (c) et mai (d)

En janvier la conductivité est plus faible au niveau des igarapes (34 µS/cm en IF06) (fig. 7). Or à la sortie de celui-ci, et dans le lac, elle augmente et atteint des valeurs plus élevées à l'entrée sud du lac (63 µS/cm, en IF04), là où les eaux du Solimões et celles provenant du bassin versant se rencontrent. Au cours du temps, cette hétérogénéité en conductivité s'estompe (table 7), et en mai, l'ensemble igarape-lac a une conductivité homogène.

Table 7 : conductivités moyennes (µS/cm) en surface

	Janvier	Mars	Avril	Mai
IF06	34	44	43	42
IF04	63	55	50	38
S09b	70	61	49	39
LF03	68	58	50	38

Oxygène dissous

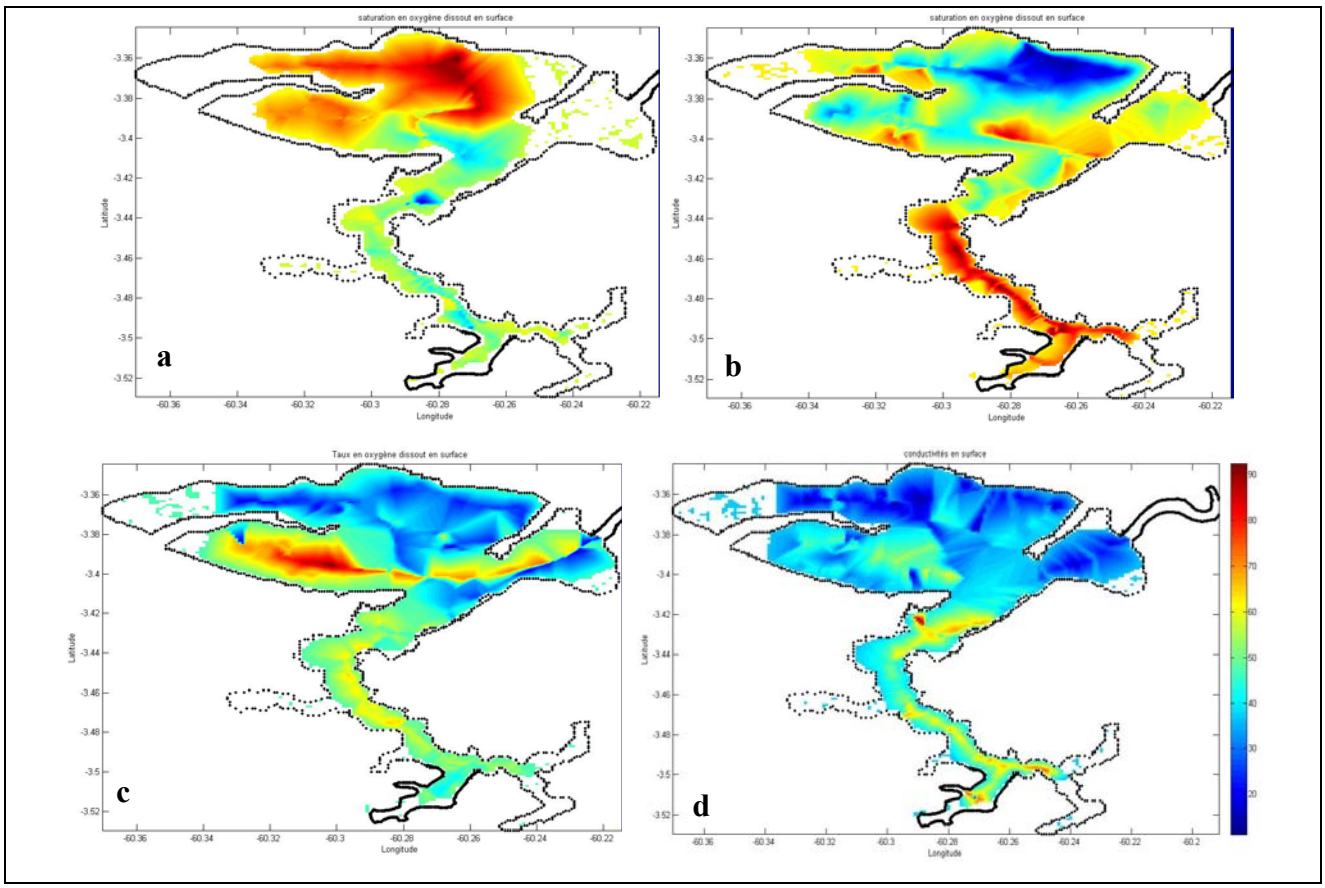
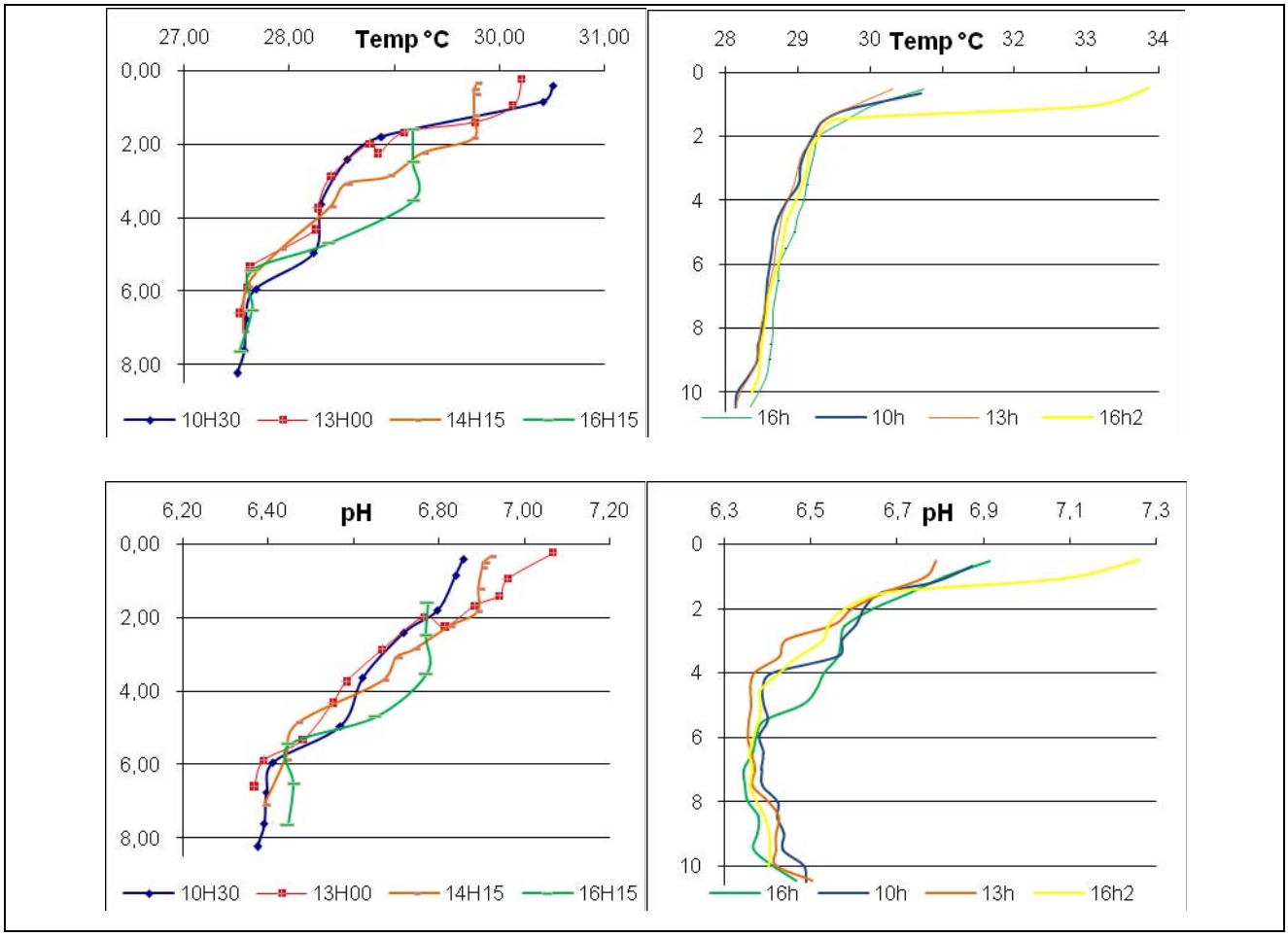


Figure 8 : variation spatiale de l'oxygène dissous en surface (50 cm de profondeur) obtenue avec les transects, en janvier (a), mars (b), avril (c) et mai (d)

Trois zones peuvent être différenciées (fig. 8). La première est le lac *sensu stricto* ; à ce niveau, une diminution du taux de saturation de l'oxygène est visible, de janvier à mai. La seconde est une région du lac située au sud-ouest du lac. Le taux de saturation en oxygène ne descend jamais en dessous de 50 %. C'est l'endroit où il semble y avoir le plus de production primaire, du fait du mélange des eaux. La dernière région est l'igarape. Le taux de saturation en oxygène oscille entre 50 et 70 % mais n'est jamais très faible. Son maximum est atteint au mois de mars, et puis est dilué en avril par un apport très fort des eaux du Solimões qui homogénéise l'oxygène.

4) Cycles diurnes

Deux cycles diurnes ont été réalisés dans la várzea de Janauacà. Le premier en mai 2008, et le second en avril 2009 (fig. 9), tout les deux dans la partie sud-ouest du lac, zone dans laquelle la production primaire est la plus forte.



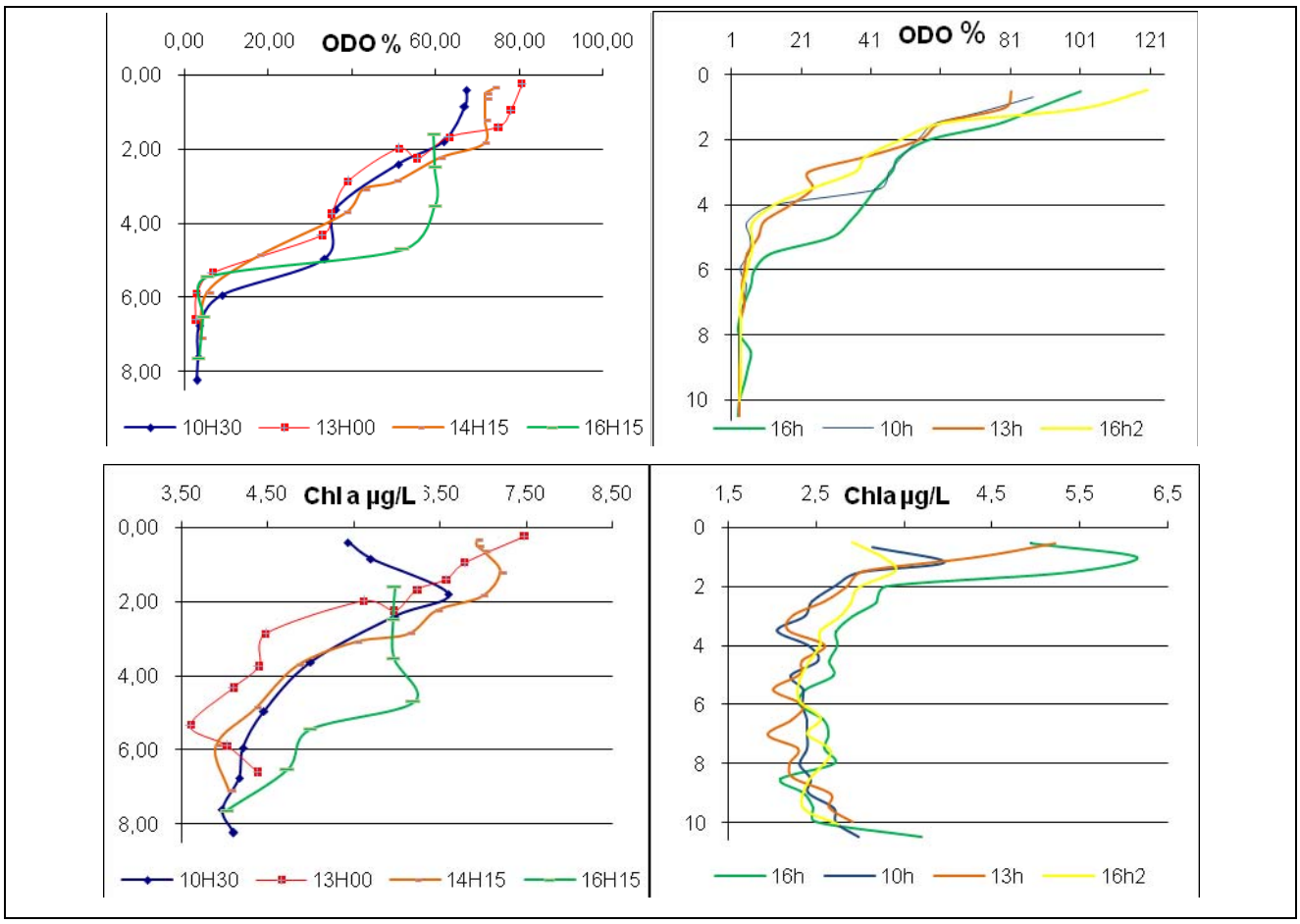


Figure 9 : variation des paramètres (température, pH, ODO % et chlorophylle) en fonction de la profondeur, pendant les cycles diurnes de mai 2008 (gauche) et avril 2009 (droite), en LF03

En mai 2008, une stratification est clairement visible en ce qui concerne les quatre paramètres, température, pH, oxygène dissous et chlorophylle, aux quatre heures étudiées, vers 6 m de profondeur. En ce qui concerne la campagne d'avril 2009, deux tendances sont à constater ; la première, une stratification à 4 m à 10, 13 et 16h-2, pour le pH et l'oxygène ; et la deuxième, une forte turbidité dans la colonne d'eau éliminant une stratification possible au niveau de la chlorophylle. En avril 2009 une double stratification est observée (profil vertical d'oxygène dissous et de pH) qui pourrait être du à un plus fort ensoleillement, et à moins de vent pour brasser la colonne d'eau. Cependant, il faut remarquer que pendant le cycle réalisé en avril 2009, les profils de 16 h se comportent différemment des autres heures de la journée. L'oxycline s'y trouve à 6 m, comme pendant le cycle de 24 h de mai 2008.

En regardant les profils verticaux enregistrés à 16h (le premier jour) et à 16h-2 (le deuxième jour) une différence en surface est visible en ce qui concerne les différents paramètres (pH, température, oxygène dissous plus élevé à 16h-2 ; chlorophylle plus faible à 16h-2).

III – Discussion

La variation spatio-temporelle des paramètres de la qualité des eaux étudiés résulte de l'hydrologie de la várzea, de la circulation des masses d'eau (en particulier des mélanges verticaux) et des processus biogéochimiques, et surtout des processus de production/respiration dont l'influence s'exerce de manière plus ou moins forte en fonction du temps de résidence des eaux dans la várzea.

A. Hydrologie et hydrodynamique de la várzea

En dépit de sa simplicité, l'écart moyen entre hauteur d'eau mesurée et calculée par le modèle est de 3 cm, ce qui suggère la robustesse de l'approche adoptée. Les résultats montrent que les deux sources d'eaux principales sont le bassin versant au sud et le Solimões. Pour le cycle 2006-2007 les apports dominants proviennent du bassin versant tandis que pour le suivant (2007-2008) les apports du Solimões et du bassin semblent être équilibrés (fig. 4). L'année hydrologique actuelle (2008-2009) est qualifiée d'exceptionnelle en terme d'hydrologie avec des hauteurs d'eau et des débits dans le bassin amazonien supérieurs à la plus grosse crue enregistrée depuis 1953. Le modèle montre des apports importants en provenance du fleuve (55 % le 1/04/2009) (fig.4), sachant que le mois d'avril ne correspond pas normalement au maximum de crue du Solimões (la crue du Solimões ayant généralement lieu au mois de mai).

Les volumes entrants cumulés en provenance du fleuve pour l'année en cours sont supérieurs à ceux des autres années simulées, sans que les apports du bassin versant n'augmentent significativement (table 8).

Table 8 : volumes entrants (km^3) cumulés pour les différentes années hydrologiques ; il faut noter que l'année 2008-2009 n'étant pas terminée, ces chiffres correspondent aux six premiers mois de l'année hydrologique

Année hydrologique	Fleuve	Bassin versant	Précipitations
2006 - 2007	0,33	0,64	0,19
2007 - 2008	0,45	0,48	0,17
2008 - 2009	0,49	0,24	0,08

Les temps de résidence moyens calculés comme le rapport entre le volume moyen annuel du lac et les flux entrants moyens annuels sont de 114, 128 et 57 jours en ce qui concerne, respectivement, les cycles de 2006-2007, 2007-2008 et 2008-2009.

Les résultats du modèle hydrologique sont en partie corroborés par les mesures de conductivité réalisées dans la várzea (fig. 7) qui indiquent une dilution progressive des eaux de la plaine d'inondation par des eaux moins chargées de conductivité proche de celles des eaux du bassin versant (38 µS/cm). Le modèle calcule un apport du bassin de l'ordre de 28 % en avril, l'évolution de la conductivité pourrait donc confirmer ces résultats. Pour la période allant de juin 1999 à avril 2008, les concentrations moyennes obtenues pour le Solimões par l'ORE HYBAM sont de 68 µS/cm (min 30 µS/cm ; max 154 µS/cm). Les concentrations mesurées dans la várzea en mai 2009 sont donc a priori plus faibles que celles du Solimões. L'homogénéisation et la diminution globale des conductivités dans le lac pourrait être du au fait que les eaux provenant du bassin versant sont bloquées par celles du Solimões (débit plus élevé, de l'ordre de 138 000 m^3/s en mai 2009), et se retrouvent donc dans le lac. Cependant, pour réellement interpréter l'évolution de la conductivité dans la várzea, les données de conductivité dans le Solimões pour la période étudiée seraient nécessaires.

Les cotes dans le lac et le paranà ainsi que le débit mesuré mensuellement indiquent une sortie de l'eau du lac vers le Solimões à partir du mois de mars 2009 (table 4). A la même période, en 2008, le débit était encore entrant (du fleuve au lac). De plus, les débits enregistrés en 2009 sont relativement élevés comparés à ceux relevés en 2008 (table 9).

Table 9 : cotes du lac et du paranà, débits, et direction de l'eau, pour les mois de février, mars et mai 2008

Santa Maria	Février	Mars	Mai
Côte du lac (m) nivelée	19,65	21,21	23,3
Côte du paranà (m) nivelée	19,57	21,15	23,05
Débit dans paranà (m^3/s)	116	56	533,631
direction	entrant	entrant	sortant

La forte crue du Solimões en 2009 conduit donc à une exportation d'eau et de matière moins tardive dans l'année par rapport à 2008 (il y a environ un mois de différence) et à des temps de résidence beaucoup plus court (cf.ci-dessus).

La perte de la stratification verticale au cours de la montée des eaux (mesures de profils verticaux aux différents points (annexes 3, 4, 5 et 6), hormis le point IF06, dans l'igarape,) indique un renouvellement de la masse d'eau assez rapide qui corrobore le faible temps de résidence des eaux dans la várzea, calculé par le modèle.

B. Evolution de la qualité des eaux et activités de production/respiration

Les variations journalières et temporelles des données font qu'il est difficile d'interpréter et de comparer des points dans le temps et dans l'espace. Ce qui suit sont des éléments d'interprétation qui devront être vérifiées par la mise en place d'une modélisation couplée hydrobiogéochimique.

Au cours de la montée des eaux 2009, les teneurs en chlorophylle-a, en oxygène dissous et le pH diminuent (tables 6, 11 et 12). Tous ces paramètres indiquent une diminution de la production primaire et/ou une augmentation de l'activité de respiration dans la várzea et une dilution par les eaux du Solimões. La dilution importante par les eaux du bassin versant et du Solimões, riche en MES, donc en bactéries consommatrices d'oxygène, pourrait renforcer l'activité de respiration. Ceci est suggéré par la répartition spatiale de l'oxygène lors de la campagne de mars 2009 (fig. 8) dans la partie nord ouest de la várzea. Dans cette partie de la várzea, les taux en O2 sont particulièrement faibles et les teneurs en MES plus élevées.

Table 10 : concentrations en MES (mg/L) en surface, en IF04, IF06, LF06, LF03 et S09b, en février et mai 2008, et en janvier et avril 2009 – ND = non disponible

MES	**Fév 2008**	**Janv 2009**	**Mai 2008**	**Avril 2009**
IF04	21,00	26,40		6,40
IF06	6,20	6,40		4,60
LF06	4,00	17,60		9,00
LF03	6,60	11,90		8,40
S09b	ND	6,80		10,20

Table 11 : pourcentage en oxygène dissous en surface, en IF04, IF06, LF06, LF03 et S09b, en février et mai 2008, et en janvier et avril 2009 – ND = non disponible

O2	**Fév 2008**	**Janv 2009**	**Mai 2008**	**Avril 2009**
IF04	65,00	75,80	75,50	69,84
IF06	90,00	58,10	78,70	70,80
LF06	ND	145,90	ND	26,15
LF03	105,75	112,00	79,80	92,86
S09b	ND	102,80	ND	10,27

Table 12 : pH en surface, en IF04, IF06, LF06, LF03 et S09b, en février et mai 2008, et en janvier et avril 2009 – ND = non disponible

pH	**Fév 2008**	**Janv 2009**	**Mai 2008**	**Avril 2009**
IF04	6,96	6,89	6,87	6,70
IF06	7,16	6,43	6,66	6,48

LF06	ND	8,48	ND	6,47
LF03	7,80	7,60	6,91	6,83
S09b	ND	7,05	ND	6,40

D'autre part, en comparant les campagnes de 2008 et 2009, à deux périodes hydrologiques plus ou moins semblables (février 2008 et janvier 2009, puis mai 2008 et avril 2009), il semblerait qu'en 2008 il y avait moins de MES (table 10), pour un pH plus basique. La crue exceptionnelle de 2009 a donc conduit à une diminution de la production primaire dans la várzea.

Au cours des quatre campagnes réalisées, la profondeur de la zone euphotique a augmenté (car il y a eu une diminution des MES (table 10) et de la chlorophylle-a (table 6)). En même temps, les faibles teneurs en oxygène dissous, en chlorophylle-a et les pH proches de la neutralité indiquent une diminution de la production primaire. La lumière n'est donc pas le facteur de contrôle de la production primaire le plus important pour la période étudiée.

Plusieurs autres facteurs de contrôle de la production primaire peuvent avoir varié au cours de cette période hydrologique. Tout d'abord la profondeur ; plus elle augmente, moins les algues séjournent dans la zone euphotique de la colonne d'eau (qui elle n'augmente pas proportionnellement – cf. profils verticaux en annexe). Pendant la montée des eaux, la zone euphotique augmente mais le taux en chlorophylle-a diminue (table 6).

La production primaire est également contrôlée par les ressources nutritives dans le milieu, en particulier l'azote et le phosphore. Ces ressources proviennent pour partie des différents réservoirs (fleuve et bassin versant principalement) et du recyclage de la matière organique via les bactéries. Les données récoltées indiquent que les teneurs en ions majeurs sont extrêmement faibles, tout au long de la montée des eaux. Il semblerait qu'il n'y ait pas d'ammonium et de phosphore disponibles facilement à Janauacà (table 13). La production primaire n'est donc possible qu'avec un recyclage rapide de la matière organique ou la présence de cyanobactéries capables de pomper l'azote atmosphérique.

Table 13 : bilan ionique (milli équivalent) et conductivités (µS) en IF06, IF04, S09b, LF06, LF07 et LF03, en janvier, mars, avril et mai 2009- ND = non disponible

	JANVIER			**MARS**			**AVRIL**			**MAI**		
	A	C.E.	C	A	C.E.	C	A	C.E.	C	A	C.E.	C
IF06	0,27	27,16	0,30	0,39	39,01	0,41	0,32	13,00	0,13	0,35	36,68	0,39
IF04	0,56	53,26	0,64	0,50	49,62	0,50	0,41	41,74	0,25	0,33	34,89	0,37
S09b	0,65	61,55	0,72	0,56	55,78	0,61	0,44	44,44	0,49	0,34	35,41	0,37
LF06	0,65	63,18	0,68	0,50	48,65	0,56	0,45	45,57	0,51	0,31	36,89	0,37

LF07	ND	ND	ND	0,50	51,75	0,62	0,44	44,89	0,52	0,30	22,45	0,24
LF03	0,60	56,08	0,63	0,54	52,97	0,63	0,44	44,33	0,48	0,33	34,36	0,36

Les résultats des concentrations ioniques à différentes profondeurs (table 14) montrent qu'il existe une légère stratification, avec des concentrations plus élevées au fond.

Table 14 : bilan ionique et conductivités (µS) en LF03 à 10 h, 13 h et 16 h à différentes profondeurs, en avril 2009 – ces profondeurs ont été choisies en fonction de l'oxycline obtenu par un profil vertical

	anions	C.E. µS	cations
LF0310	0,44	44,44	0,50
LF0310 3M70	0,44	43,32	0,47
LF0310 4M50	0,44	41,28	0,46
LF0313	0,43	40,27	0,44
LF0313 2M50	0,45	44,67	0,49
LF0313 4M00	0,44	44,67	0,50
LF0316	0,44	44,33	0,48
LF0316 1M25	0,45	44,33	0,49
LF0316 4M50	0,45	44,44	0,50

Cependant, des concentrations ioniques plus élevées en profondeur ne sont visibles que pendant la journée (13 h et 16 h). Rien ne peut être déduit à partir de cela. Il faudrait un échantillonnage plus approfondie en profondeur, et à différentes heures de la journée et de la nuit.

Si la dégradation in situ de la matière organique constitue une source non négligeable des apports en nutriment pour les algues, la profondeur pourrait là encore exercer un contrôle important. La várzea étant brassée par le vent, il y a des échanges entre les couches supérieures et inférieures, riches en éléments nutritifs, ce qui explique les apports en nutriments indirectement observés à travers les blooms spontanés.

L'identification du phytoplancton dans la várzea indique la présence de cyanobactéries (travaux de Carmen Mendoza, doctorante IRD). Certaines cyanobactéries sont capables de pomper l'azote atmosphérique. Leur développement est généralement favorisé dans les milieux stratifiés et pauvres en nutriments, tel que Janauacà. Les cyanobactéries sont par ailleurs capables de migrer dans la colonne d'eau, car elles disposent de mécanismes de contrôle de leur densité, et peuvent ainsi monter et descendre dans la colonne d'eau en fonction de leur besoins (lumière et sels nutritifs).

D'autres várzeas ont été échantillonnées entre Manaus et Santarem, Para en juillet 2009. Toutes ces várzeas diffèrent de Janauacà par leur taille (souvent bien plus grandes), profondeurs et par le fait qu'elles n'étaient pas stratifiées au moment des échantillonnages contrairement à Janauacà. Ces várzeas diffèrent ensuite entre elles par la composition de leurs eaux. En effet, la physico-chimie de chacune dépend du fleuve qui la borde (eaux noires, blanches ou claires) et du bassin versant qui l'alimente. Cependant, dans l'ensemble de ces systèmes, les mesures indiquent une production primaire faible en raison de la crue exceptionnelle de l'Amazone.

Conclusion

Au cours des différentes campagnes réalisées, de janvier à mai 2009, une dilution des paramètres de la qualité des eaux a été constaté, d'une part, par les eaux provenant du bassin versant, au sud de la várzea, et d'autre part, par des infiltrations par les eaux du Solimões, par des petits chenaux situés au nord du lac. Cette dilution a été mise en évidence notamment par les résultats du modèle, pour l'année 2008-2009, qui montrent un apport de l'ordre de 55% par le Solimões, en avril 2009.

Au niveau chimique, les deux années étudiées, 2008 et 2009 semblent être tout à fait différentes, en particulier à cause de la crue qui amène beaucoup plus d'eau dans la várzea, et qui dilue donc les concentrations ioniques. Le phytoplancton se retrouve dépendant du recyclage rapide de la matière organique. Il semblerait donc, qu'à cause de ce phénomène exceptionnel, le facteur principal de contrôle de la production primaire, en 2009, soit les sels nutritifs, et ensuite, bien évidement, la lumière. Ceci est d'autant plus vrai, que la majorité de l'eau du lac provient, d'après le modèle, du Solimões, fleuve dans lequel la production primaire est limitée parce que les eaux y sont blanchâtres, riches en MES et pauvres en matière organique.

Compte tenu des données acquises, qui sont dépendante des conditions météorologiques, il est difficile de les interpréter ou de les comparer entre elles. Pour cela, il est important de faire un modèle couplé hydrobiogéochimique afin d'extrapoler les données en tenant compte de la météorologie et de l'heure dans la journée.

De plus, pour les campagnes à venir, il serait plus judicieux de faire un échantillonnage plus poussé (prélèvements à différentes profondeurs), et moins localisé (extrapoler les mesures des igarapes aux berges, si pas très éloignées).

Bibliographie

Articles :

BILLETT M.F., DAWSON J.J.C., HOPE D., PALMER S.M., DEACON C.M, (2004). Sources and sinks of aquatic carbon in a Peatland stream continuum. *Biogeochemistry*, **70**(1), 71-92.

BONNET M-P., BARROUX G., MARTINEZ J-M., SEYLER F., MOREIRA-TURCQ P., COCHONNEAU G., MELACK J.M., BOAVENTURA G., MAURICE-BOURGOIN L., LEON J.G., ROUX E., CALMANT S., KOSUTH P., GUYOT J-L., SEYLER P., (2008). Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaì). *Journal of hydrology*, **349**, 18-30.

BORGES A.V., SCHIETTECATTE L.-S., ABRIL G., DELILLE B., GAZEAU F. (2006). Carbon dioxide in European Coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **70**(3), 375-387.

CALLEDE J., GUYOT J.L., RONCHAIL J., MOLINIER M., DE OLIVEIRA E., (2002). L'Amazone à Obidos. Etude statistique des débits et bilan hydrologique. *Hydrological Sciences Journal*, **47**(2), 321-333.

CIAIS ¨P., BORGES A.V., ABRIL G., MEYBECK M., FOLBERTH G., HAUGLUSTAINE D., JANSSENS I.A., (2008). The impact of lateral carbon fluxes on the European carbon balance. *Biogeosciences*, **5**, 1259-1271.

JUNK W.J., (1997). The Central Amazon Floodplain : Ecology of a Pulsing System. *Ecological Studies 126*. Springer-Verlag: Berlin, 525.

LESACK L.F.W. & MELACK J.M.,(1995). Flooding hydrology and mixture dynamics of lake water derived from multiple sources in an Amazon floodplain lake. *Water Resources Research*, **31**(2), 329-345.

MALHI Y., TIMMONS ROBERTS J., BETTS R.A., KILLEEN T.J., LI W., NOBRE C.A., (2007). Climate change, deforestation and the fate of the Amazon. *Science*, **319**, 169-172.

MAYORGA E., AUFDENKAMPE A.K., MASIELLO C.A., KRUSCHE A.V., HEDGES J.I., QUAY P.D., RICHEY J.E., BROWN T.A., (2005). Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. *Nature*, **436**, 538-541.

MOLINIER M., GUYOT J.L., CALLEDE J., GUIMARAES V., DE OLIVEIRA E., FILIZOLA N., (1997). Hydrologie du bassin amazonien, Environnement et développement en Amazonie brésilienne, *Thery H (ed), Belin, Paris*, 24-41.

MOREIRA-TURCQ P., SEYLER P., GUYOT J-L., ETCHEBER H., (2003). Exportation of organic carbon from the Amazon River and its main tributaries. *Hydrological processes*, **17**, 1329-1344.

RICHEY J.E., MELACK J.M., AUFDENKAMPE A.K., (2002). Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO2. *Nature*, **416**, 617-620.

RICHEY J.E., MERTES L.A.K., DUNNE T., VICTORIA R., FORSBERG B.R., TANCREDI A., OLIVEIRA E., (1989). Source and routing of the Amazon River flood wave. *Global Biogeochem.Cycles*, **3**(3), 191-204.

RICHEY J.E., HEDGES J.I., DEVOL A.H., QUAY P.D., VICTORIA R., MARTINELLI L.A., FORSBERG B.R., (1990). Biogeochemistry of carbon in the Amazon River, *Limnology Oceanography*, **35**, 352-371.

Demande de financement de projets

ABRIL G., (2006). Demande de financement du projet EC2CO : Echanges atmosphériques et biogéochimie du CARBone dans le fleuve et l'estuaire de l'AMAzone (CARBAMA).

BONNET M-P., (2007). Demande de financement du projet EC2CO : Impact de la PROduction primaire phytoplanctonique des zones inondations sur le bilan de dioxyde de CARBone du fleuve AMAzone (PROCARBAMA).

Rapport d'avancement de thèse

MENDOZA C., (2008). Suivi par satellite des dynamiques spatiale et temporelle de la production primaire au sein de lacs d'inondation amazoniens.

Rapports de campagnes

ABRIL G., BONNET M-P., ARTIGAS L.F., MEZIANE T., TAKIYAMA L.R., LANDIM DE SOUZA M.F., DEBORDE J., GUERIN F., MATHIEU F., MOREIRA-TURCQ P., MARTINEZ J-M., NEROT C., MACEDO SILVA M.A., SEYLER P., (2007). Biogéochimie du carbone et échanges atmosphériques dans le fleuve et l'estuaire de l'Amazone : Résultats préliminaires de la campagne CARBAMA-1.

Annexes

1 – Volumes de prélèvement de la solution fille pour préparation de la gamme étalon et concentrations finales (ppm) des différents cations, pour analyse des cations en chromatographie ionique en phase liquide i

2 – Volumes de prélèvement de la solution fille pour préparation de la gamme étalon et concentrations finales (ppm) des différents anions, pour analyse des anions en chromatographie ionique en phase liquide i

3 – Variations dans le temps des différents paramètres en fonction de la profondeur, en IF06 ii

4 – Variations dans le temps des différents paramètres en fonction de la profondeur, en LF06 ii

5 – Variations dans le temps des différents paramètres en fonction de la profondeur, en LF07 iii

6 – Variations dans le temps des différents paramètres en fonction de la profondeur, en LF03 iv

7 – Rapport de la mission pro-CARBAMA/CYMENT, Plaine d'inondation de Janauacà du 22 au 24 mars 2009 v