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

Soutenance le 18 Juin 2009
Master 2 H3, Université Rennes 1
Hervé SCHMOOR

Marie-Paule Bonnet (CR - IRD Brésil)

Résumé

Il a été établi que le bassin Amazonien émettait d'importantes quantités de carbone vers l'atmosphère (CO_2) ainsi que vers l'océan sous forme organique dissoute (COD) (Richey et al, 2002). Cependant, ces estimations ne prennent pas en compte le rôle des várzeas (ou plaines d'inondations Amazoniennes) dont la production primaire agit comme piège à CO_2. Les objectifs sont d'acquérir les données et connaissances nécessaires à la modélisation du bilan hydrologique de la plaine d'inondation de Janauaca (40 km au sud de Manaus au Brésil) ainsi qu'à la mise en oeuvre d'une modélisation couplée hydrodynamique/biogéochimique dans la várzea. Une base de données dans laquelle les paramètres de qualité des eaux mesurés lors des missions de terrain, ainsi qu'un modèle hydrologique, ont été réalisés. Le modèle, validé par la comparaison des courbes de hauteurs d'eau in-situ et modélisée, montre que les eaux de la várzea proviennent de deux sources principales, le bassin versant et le Solimões, dont les contributions varient suivant les cycles. Pour le cycle actuel (2008-2009), qualifié d'exceptionnel en terme d'hydrologie, un débordement du Solimões a lieu dans la várzea. Cette année pourra servir de cas extrême pour le modèle hydrologique. Les teneurs en Na-Cl montrent une dilution des eaux de la várzea par celles du bassin versant entre janvier et mars 2009. Les teneurs globales en chlorophylle dans la várzea montrent également une diminution (d'un facteur 5) entre janvier et avril 2009. Cette diminution, corrélée à des débits sortant de la várzea très importants, semblerait indiquer qu'un transfert de la biomasse se produit actuellement. La várzea constitue donc une source pour le fleuve de matière organique labile qui participera aux émissions de GES (gaz à effet de serre).

Abstract

It has been established that the Amazonian basin emits important quantities of organic carbon to the atmosphere, as well as to the ocean in the form of dissolved carbon (DOC) (Richey & al. 2002). However, these estimations do not take into consideration the role of the várzeas (or Amazonian floodplains) in which primary production can capture CO2. The goal is to acquire the necessary data and knowledge to modelize the hydrological balance of Janauacà floodplain (40 km south of Manaus, in Brazil) and to make a hydrodynamic/biogeochemical coupled modelization in the várzea. A database, in which the parameters of the water quality were measured in field missions, as well as a hydrological model, was carried out. The model validated by comparing water level in situ and modelized graphics, shows that the várzea waters come mainly from two sources, which are the basin on the south, and the Solimões, whose contributions vary according to the water cycle. For the actual cycle (2008-2009), qualified as exceptional in hydrological terms, the Solimões overflowed into the várzea. This year could serve as an extreme case for the hydro model. The Na-Cl contents show that the water in the várzea is subject to a dilution from the water of the basin, from January to March 2009. The global chlorophylle content of the várzea also decreased (by 5) between January and April 2009. This reduction, correlated to an important outgoing discharge from the várzea, would seem that a biomass transfer was actually in play. The várzea represents a source of organic matter to the Solimões River, organic matter that will participate in green house gases (GHG) emissions.

Introduction

Les zones tropicales sont des zones très actives en termes d'échanges de carbone avec l'atmosphère. L'Amazone, le plus grand fleuve au monde (débit moyen de 209 000 m3 s^{-1}), contribue pour 20% au transport mondial d'eau douce à l'océan. Il est en outre une source importante de CO_2 pour l'atmosphère. Ceci est lié à une importante respiration aquatique alimentée par des apports considérables de matière organique terrestre et une faible production primaire dans l'eau expliquée en grande partie par une turbidité importante des eaux (Benner et al., 1995; Richey et al., 2002). Les émissions de CO_2 vers l'atmosphère associées à l'Amazone et ses plaines d'inondation ont récemment été estimées à 0.5GtC/a pour une surface en eau de 250 000 km² (Richey et al., 2002). Cependant un dégazage de carbone (CO2) 10 fois supérieur au flux de carbone organique (COD) exporté vers l'océan (Borges et al. 2006; Ciais et al. 2007, Billet et al. 2004) semblerait indiquer une surestimation des émissions liée à un échantillonnage insuffisant; les várzeas, plaines d'inondation Amazoniennes et hauts lieux de production primaire, n'ayant pas été étudiées pour établir cette estimation. La production primaire dans les várzeas constitue une pompe à CO_2 depuis l'atmosphère, une partie de cette matière organique produite est respirée dans les várzeas, une partie est éventuellement sédimentée et piégée au sein des sédiments, une autre est exportée sous forme de carbone organique particulaire et dissous labile qui contribuerait de façon non négligeable aux émissions depuis les fleuves. Il est donc important de quantifier le bilan net de production primaire/respiration, les termes d'exportation afin de ré-évaluer le bilan des émissions.

Les surface des várzeas, associées à l'Amazone et à ces affluents, connaissent des fluctuations importantes au cours du cycle hydrologique. L'eau, au cours de son séjour dans une várzea, connait de nombreuses modifications hydrobiogéochimiques principalement liées à des réactions de sorption et des réactions d'oxydo-réduction en lien avec les activités de production et de respiration dans la várzea (Melack et al., 2004; Richey et al., 1988, 1990; Seyler and Boaventura, 2001, 2003).

La várzea de Janauaca, située à 40 km au sud-ouest de Manaus au Brésil, est l'objet de notre étude. Elle est constituée d'un lac d'eaux claires (teneurs moyennement riches en carbone organique dissout, teneurs moyennes en matière en suspension) qui est alimenté par un bassin versant d'eaux noires (teneurs élevées en carbone organique dissout, faibles en matière en suspension) et qui intéragit, par l'intermédiaire d'un chenal, avec les eaux blanches du Solimões (riches en matière en suspension). Aucune étude antérieure sur les processus de production primaire et de dégradation de la matière organique ainsi que sur la dynamique des espèces phytoplanctoniques au cours du cycle hydrologique n'a été menée dans ce type de milieu.

Les objectifs de cette étude sont d'acquérir les données et connaissances nécessaires à la compréhension et à la modélisation du bilan hydrologique de la plaine d'inondation d'une part, et d'autre part à la mise en oeuvre d'une modélisation couplée hydrodynamique/biogéochimique dans la várzea.

La première étape a été de construire et d'interpréter une base de données (Hydraccess) basée sur les paramètres physico-chimiques mesurés in-situ. Cette base de données permet une comparaison plus aisée des différents paramètres mesurés dans l'espace et dans le temps. En effet, des cartes de répartition 2D (pas de 0,001° en latitude/longitude) et 3D (pas de 50 cm dans la direction verticale) ont été réalisées afin de mieux visualiser la répartition spatiale des différents paramètres. Celles-ci pourront en outre servir à initialiser le modèle couplé puis à comparer les résultats.
La deuxième partie a été consacrée à la mise en place d'un modèle hydrologique (bilan hydrologique, sources d'eau) et à l'interprétation des résultats. Pour établir ce modèle, les données et paramètres suivants sont nécessaires : précipitations, évaporation, caractéristiques de la várzea (surface et volume en fonction de la hauteur d'eau), caractéristiques du chenal de connexion (type de section, aire, cote du fond). Dans un premier temps, les apports par infiltration seront négligés, faute de données.

Ce stage « Suivi de la production primaire et de ses facteurs de contrôle dans la várzea de Janauaca » fait parti d'un projet plus vaste, PROCARBAMA (Impact de la PROduction primaire phytoplanctonique des plaines d'inondation sur le bilan de dioxyde de CARBone du fleuve AMAzone), dont le but est d'étudier la production primaire aquatique et son devenir (quantité de carbone émise, exportée vers le fleuve, stockée dans les sédiments) dans des plaines d'inondation présentant des caractéristiques géomorphologiques, hydrologiques et biogéochimiques contrastées afin de régionaliser les résultats à l'ensemble du bassin Amazonien par l'utilisation couplée de la modélisation hydrodynamique/biogéochimique et de la télédétection. Ce travail s'inscrit également dans le programme plus vaste CARBAMA (cycle du CARbonne dans le Bassin AMAzonien) qui vise à réestimer les émissions de CO_2 et de méthane du bassin Amazonien.

Matériel & méthodes

1 - Site d'étude

Situation géographique (fig.1)

La várzea de Janauaca est localisée à environ 40 km au sud-ouest de Manaus au Brésil (latitude: entre 3°20'S et 3°25'S; longitude: entre 60°23W et 60°13W).

Figure 1 : localisation de la várzea dans le bassin amazonien ("Atlas Mondial, nouvelle cartographie de la Terre")

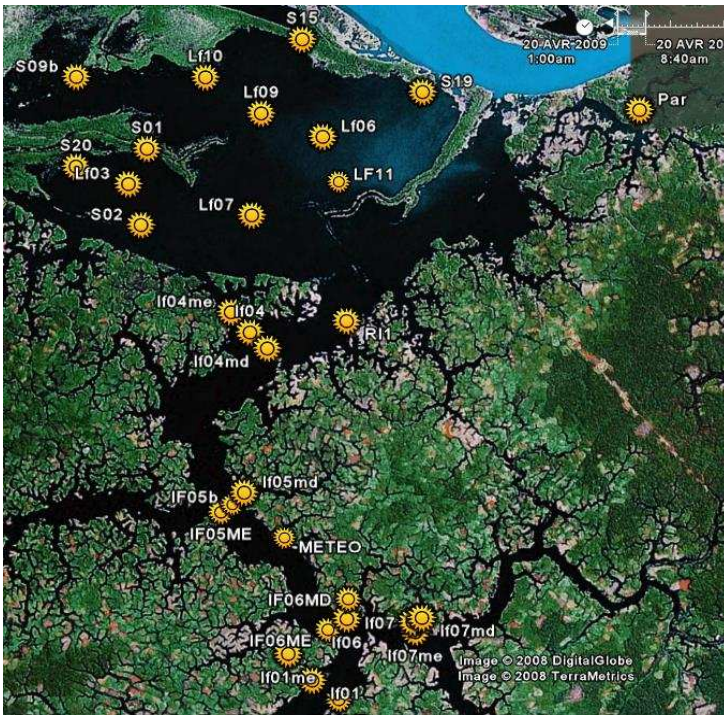


Figure 2 : localisation de la várzea et de ses stations (Google Earth)

Le site (fig.2)

La várzea a une superficie qui varie entre 60 et 160 km^2 environ, avec des hauteurs d'eau variant au cours du cycle hydrologique de 13 à 25 m environ par rapport au géoide. Elle est composée d'un lac d'eaux claires et a la particularité d'être associée à un bassin versant au sud, d'une superficie relativement élevée (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 présente des profondeurs plus élevées que dans le lac. Il existe un chenal d'alimentation au nord-ouest, le paranà , qui sert de connexion avec le Solimões. Le paranà joue un rôle majeur en permettant l'entrée ou la sortie des eaux de la várzea vers le Solimões. Ce chenal est la principale connexion avec le Solimões et est en eau tout au long de l'année.

2 - Méthodologie

La méthodologie abordée dans ce travail a concerné, des travaux de terrain et de laboratoire (2-1), l'organisation de la base de données (2-2) et la mise en oeuvre d'un modèle du bilan hydrologique de la plaine d'inondation (2-3).

2-1 Acquisition de données

2-1-a Méthodologie de terrain

Dans la várzea de Janauaca, 4 campagnes de mesures plus ou moins complètes pour notre étude ont été réalisées précédemment (table 1).

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

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

Table 1 : caractéristiques des campagnes précédentes.

La méthodologie de terrain des campagnes actuelles (22/24 mars et 21/23 avril 2009) a reposé sur :

1) un échantillonnage en surface (50 cm de profondeur) en différents points du lac et dans l'igarape principal pour analyse de la chlorophylle, du COP et du COD, des MES, de l'alcalinité et des ions majeurs (fig.2); les échantillons d'eau sont récoltés à l'aide de préleveur de type Van Dorf de 2 litres.

2) des profils verticaux avec une sonde multi-paramètres YSI (modèle 6820-V2) au niveau des points les plus étudiés afin de caractériser la colonne d'eau (température, conductivité, pH, oxygène dissous et chlorophylle) ainsi que des transects sur tout le site (60 cm de profondeur) pour rendre compte de l'hétérogénéité spatiale (fig.2),
3) l'évaluation des débits dans le paranà d'alimentation entre le Solimões et la várzea de Janauaca.
   Les mesures de débits ont été réalisées avec un ADCP 1200 Hz (Acoustic Doppler Current Profiler, WorkHorse Rio Grande TMRD Instruments) dans une section transversale du paranà d'alimentation puis mis en forme avec le logiciel Winriver. Au minimum quatre jaugeages de la section sont réalisés, afin de déterminer le débit moyen et le pourcentage d'erreur que l'on souhaite inférieur à 5%.
4) le traitement immédiat des échantillons prélevés: les échantillons ont été filtrés à vide sur fibre de verre (GF/F Ø = 0.70 µm) pour la chlorophylle, ou sur filtre d'acétate de cellulose (Ø = 0.45 µm) pré pesés pour les MES et pour le COP (Ø = 0.70 µm) sur des filtres GF/F pré-pesés et calcinés. Les filtres à chlorophylle ont été emballés et congelés à -18°C. Les eaux issues de l'extraction du COP ont été récupérées (dans des tubes pyrolisés à 450 °C) puis congelées à -18°C pour analyse du COD. Les eaux issues de l'extraction des MES ont été récupérées et congelés à -18°C pour analyse des ions majeurs et de l'alcalinité, au Laboratorio de Geoquímica (LAGEQ) de l'Université de Brasilia.
5) un cycle diurne a été réalisé du 23/04/2009-16h au 24/04/2009-16h au point LF03 (fig.2), des profils verticaux et un échantillonnage dans la colonne d'eau ont été effectués toutes les 3 heures.

2-1-b Analyses en laboratoire

Les filtres de chlorophylle ont été extraits à l'éthanol puis analysés par fluorimétrie. Les filtres de MES ont été pesés après sèchage pour quantification des MES. L'alcalinité a été déterminée par dosage acido-basique au H_2SO_4. Les cations sont déterminés par ICP-AES et AAS et les anions sont déterminés par HPLC ionique. Le COD a été analysé au laboratoire des mécanismes et transferts en géologie (LMTG) de Toulouse.

2-2 Organisation de la base de données

2-2-a Mise en place de la base de données

Une base de données a été réalisée à l'aide du logiciel HYDRACCESS développé à l'IRD par Philippe Vauchel (IR, IRD) à partir du logiciel Acces (Microsoft). Ce logiciel permet de classer les données par station puis par type de paramètres mesurés in-situ (pH, température, conductivité, teneur en oxygène dissous, teneur en chlorophylle, turbidité). Cette base de données permet de comparer tous types d'informations à l'aide de requête (comparaison dans l'espace pour un même paramètre, comparaison dans le temps pour une même station). L'ensemble des données acquises lors des campagnes 2008 et 2009 ont été intégrées dans la base de données afin de garantir leur pérennité.

2-2-b Mise en place des cartes de distribution

A l'aide du logiciel Matlab, nous avons pu caractériser la distribution de ces mêmes paramètres. Les cartes de distribution ont été établi pour les deux dernières campagnes effectuées (22/24 mars et 21/23 avril 2009) ainsi que pour celle du 31/01-2/02/2009. Les autres campagnes, du fait d'un échantillonnage insuffisant, ne permettent pas de visualiser de manière satisfaisante la répartition de ces paramètres sur tout le site.

Des scripts Matlab ont été développés afin de permettre la réalisation de cartes de distribution en surface mais également à différentes profondeurs.

Les cartes de répartition en surface (pas de 0,001° en latitude/longitude) prennent en compte les données ponctuelles des stations et les transects établi à 60 cm de profondeur. Pour interpoler les valeurs le long des contours (qui sont difficilement accessibles lors des misisons à cause de la végétation flottante) la moyenne de tous les points proches des bords a été imposée. Pour construire les cartes aux différentes profondeurs de 50 cm en 50 cm jusqu'au fond, les données de profils verticaux realisés aux stations sont utilisées ainsi que la carte de distribution à la profondeur immédiatement supérieure. Les différentes étapes de la méthode adoptée sont listées ci-dessous:

- établissement d'abord d'une matrice en surface (Ms);
- création d'une matrice des différences de valeurs entre les deux couches en question (Mdiff) à partir des profils verticaux;
- addition de la matrice de la couche supérieure (Ms ici) à celle des différences de valeurs entre les deux couches (Mdiff), et obtention de la matrice de la couche inférieure (Minf);
- établissement d'un masque du lac à la profondeur choisie. C'est une matrice de type 0/1, 1 pour les cellules de la matrice qui nous intéresse, 0 pour les autres cellules;
- produit de la matrice Minf par la matrice 0/1, et obtention de la matrice recherchée Minfbis.

Cette matrice servira alors pour l'interpolation à la couche inférieure, et ainsi de suite jusqu'au fond du lac avec un pas invariant de 50 cm. Les contours du système ont été déterminés à partir des images satellites radar JERS-1 à l'aide du logiciel de cartographie Arcview.

2-3 Mise en oeuvre du modèle du bilan hydrologique de la plaine d'inondation

2-3-a 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, en particulier de connaitre les debits échangés avec le fleuve. Ce modèle a été développé pour la plaine d'inondation de Curuai (M.P Bonnet & al, 2008) à partir des travaux de Lesack et Melack (1995), et a été tranposé pour le site de Janauca.

A chaque pas de temps, le modèle calcule les variations du volume du système en fonction du volume au pas précédent tel que :

$$\boxed{V_L^{t+1} = V_L^{t} + (Q_P - Q_E + Q_{par} + Q_{attz} + Q_{bv}) * \Delta t}$$

avec V_L le volume (m^3) du système, t le pas de temps, Q_P les précipitations sur la várzea ($m^3.j^{-1}$), Q_E l'évaporation ($m^3.j^{-1}$), Q_{par} les débits entrants (positifs) ou sortants (négatifs) de la várzea ($m^3.j^{-1}$), Q_{attz} le ruissellement provenant de l'ATTZ "aquatic–terrestrial transition zone" (différence entre les surfaces maximale et minimale immergées), Q_{bv} le ruissellement en provenance du bassin versant au sud ($m^3.j^{-1}$).
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 oeuvre du modèle sont listées ci-dessous.

2-3-b Données d'entrée du modèle

Hauteur d'eau

Des hauteurs d'eau journalières (à partir du 1/9/2006) ont été relevées sur deux règles limnimétriques nivelées 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), dans le lac (3.42364S-60.26396W : station Tilheiro, située à l'est dans le lac) et dans le paranà au nord (3.36836S-60.19268W : station Santa Maria). 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). Les hauteurs d'eau nivellées par altimétrie à la station de Manacapuru, sur le Solimões, ont été fournies par l'ANA (Agence National de l'eau Brésilienne). Une pente d'environ 2,5 cm/km a été calculée entre la station de Manacapuru (située à 45 km en amont) et l'entrée de la várzea. Les données de cote à Manacapuru sont disponibles jusqu'au 6/04/2009.

Précipitations

Les données de précipitations journalières à Manaus, constituant la série temporelle la plus satisfaisante et la plus complète, ont servi à l'élaboration du modèle. La série temporelle est fournie par l'ANA et couvre la période d'étude jusqu'au 15/04/2009.

Température

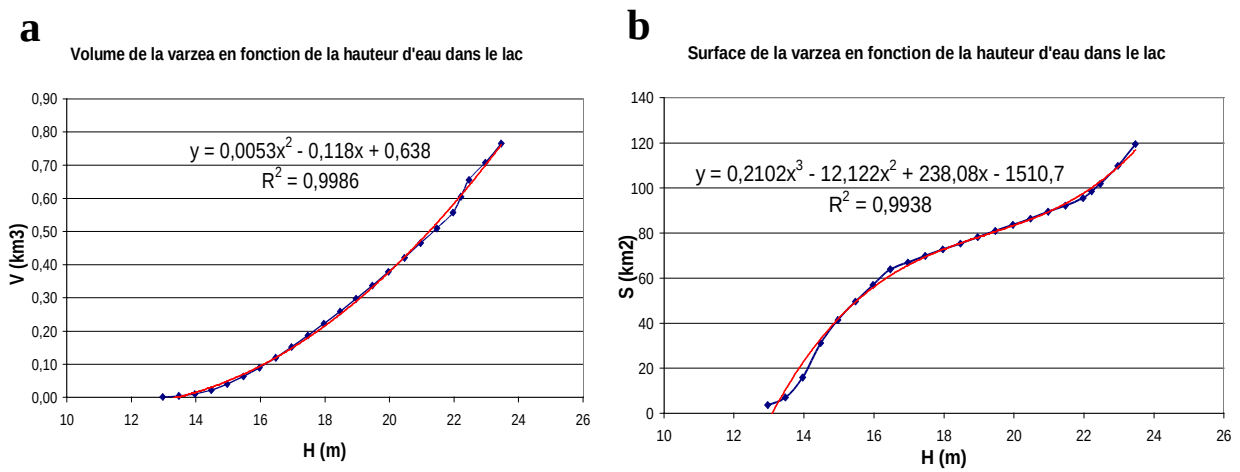
Les données de températures maximales moyennes mesurées à Manacapuru de Janvier 2006 à Fevrier 2009 ont été utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration. Celle-ci a été déterminée de manière empirique selon l'équation de Riou (1975) pour toute la zone de couverture végétale ainsi que pour les surfaces en eau libre de la várzea telle que : ETP = 0,3Tm – 5,9. ETP représente l'évapotranspiration potentielle ($m^3.j^{-1}$), Tm la température maximale moyenne mensuelle (°C).

Surface et volume de la várzea

Des mesures bathymétriques réalisées lors des campagnes de terrain 2006 et 2008 de la várzea ont servi à établir les relations surface et volume en fonction de la hauteur d'eau dans la várzea (fig.3), nécessaire à la mise en oeuvre du modèle.

Débits

Les débits dans le modèle ont été calculés d'après une formule similaire à celle de Strickler-Manning pour une section du paranà de type trapézoidale.



Figures 3 : volume (a) et surface (b) de la várzea en fonction de la hauteur d'eau du lac

Résultats

Les résultats présentés dans cette étude concernent 1) les résultats et l'analyse de sensibilité du modèle hydrologique et 2) la distribution spatiale (horizontale et verticale) des paramètres de qualités des eaux mesurés à l'aide de la sonde YSI lors des campagnes ainsi que les résultats du cycle diurne réalisé lors de la campagne d'avril 2009.

1 - Résultats du modèle hydrologique et analyse de sensibilité

Le modèle a été mis en oeuvre 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 celle modélisée permet de vérifier et de valider le modèle (fig.4). Des tests de sensibilité, afin de caractériser quels sont les flux et les paramètres les plus sensibles pour le modèle, ont été effectués (non prise en compte des précipitations sur le lac, la modification des caractéristiques du bassin versant). Dans la figure suivante, seul le test ayant présenté des différences significatives est présenté.

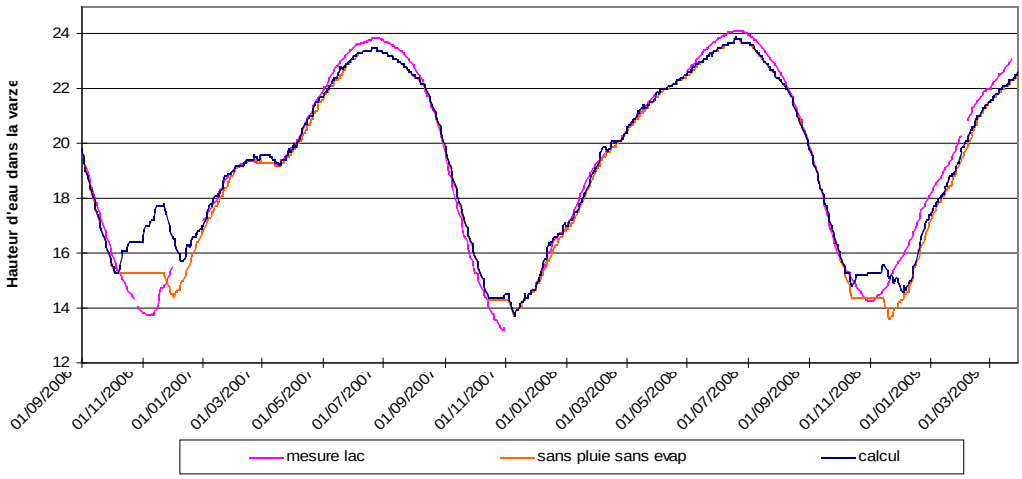
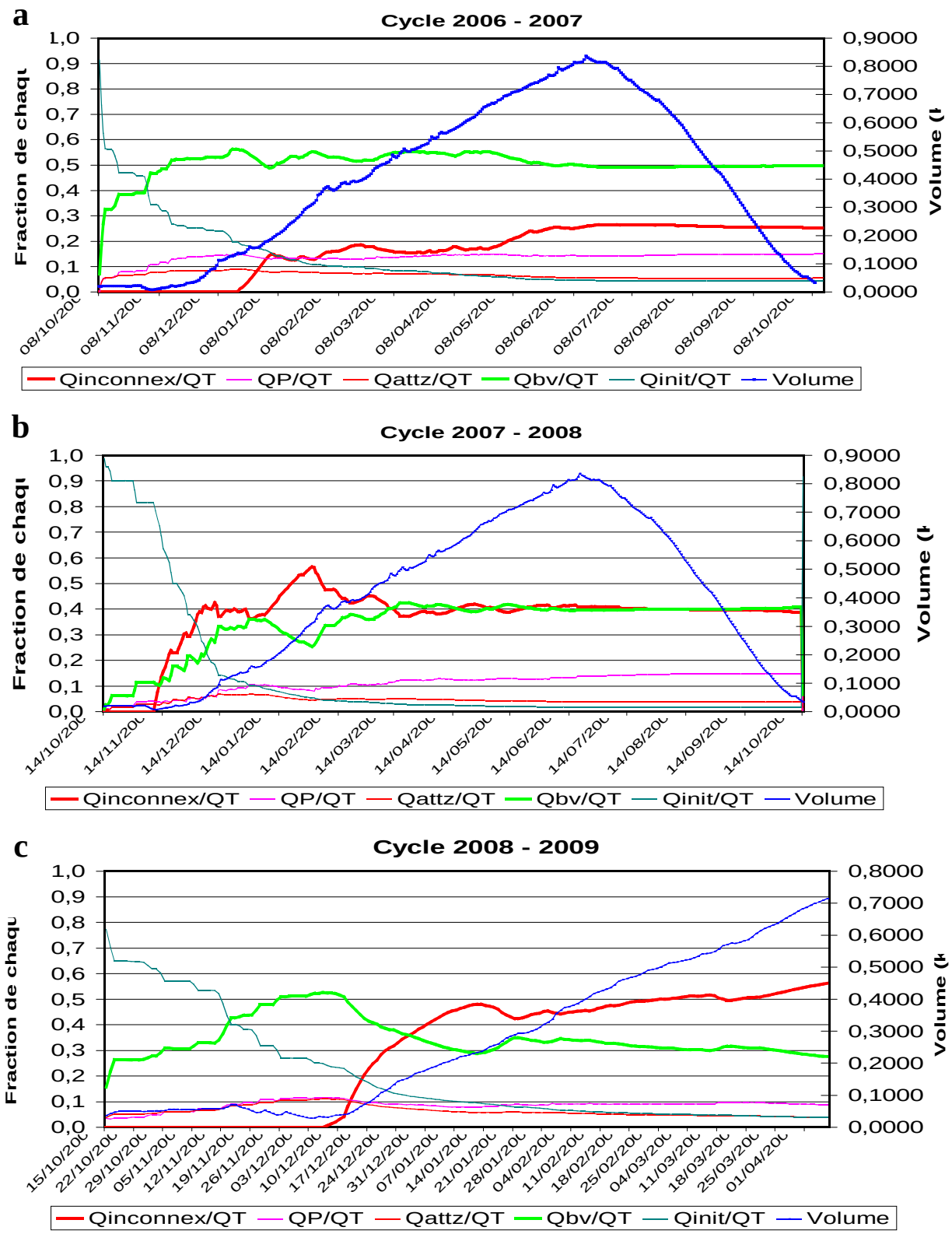


Figure 4 : évolution temporelle des hauteurs d'eau modélisées et in-situ

Les courbes de hauteurs d'eau in-situ et modélisée montrent une bonne corrélation pour les trois années hydrologiques modélisées; l'écart moyen entre les deux séries est de 3 cm pour l'ensemble de la période. On peut remarquer que le modèle sur-estime les niveaux d'eau en période d'étiage, en particulier à l'étiage 2006.

Une partie des écarts est attribuée à une sur-estimation probable des précipitations sur la zone d'étude, une mauvaise représentation du bassin versant sud (par exemple sous-estimation du temps de concentration) n'aurait que peu d'influence sur les résultats. Cette hypothèse est confirmée par la simulation dans laquelle les termes liés à la pluie et à l'évaporation ont été retirés (fig.4). Les niveaux d'eau simulés en étiage sont plus proches des niveaux d'eau mesurés.

Après avoir validé le modèle par comparaison des courbes de hauteurs d'eau in-situ et modélisée, nous pouvons estimer les contributions des différents réservoirs au cours du temps. Les résultats montrent des variations interannuelles importantes. Pour le cycle 2006-2007, les apports dominants sont ceux du bassin versant (fig.5a). Le cycle de l'année suivante est dominé par les apports du bassin versant (40% environ) ainsi que par ceux du fleuve (également 40%) (fig.5b). Pour l'année hydrologique actuelle (2008-2009), les eaux de la várzea proviennent principalement du Solimões (fig.5c) à hauteur de 55% environ le 1er avril 2009. On observe des variations des contributions au cours de ce cycle. On peut voir en effet qu'au mois de décembre, les apports du bassin versant dominent alors qu'en février, les apports dominants sont ceux du fleuve.



Figures 5 : 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.

2 - Distribution spatiale et temporelle des paramètres de qualité des eaux

Dans cette partie, les résultats des campagnes de Janvier à Avril 2009 sont présentés. Ces campagnes permettent donc de suivre l'évolution de la várzea en période de remplissage. Conformément aux résultats du modèle hydrologique, à cette période de l'année, les eaux de la várzea correspondent à un mélange dominés par les eaux du Solimões (environ 50%) et par les eaux du bassin situé au sud (entre 20 et 30%).

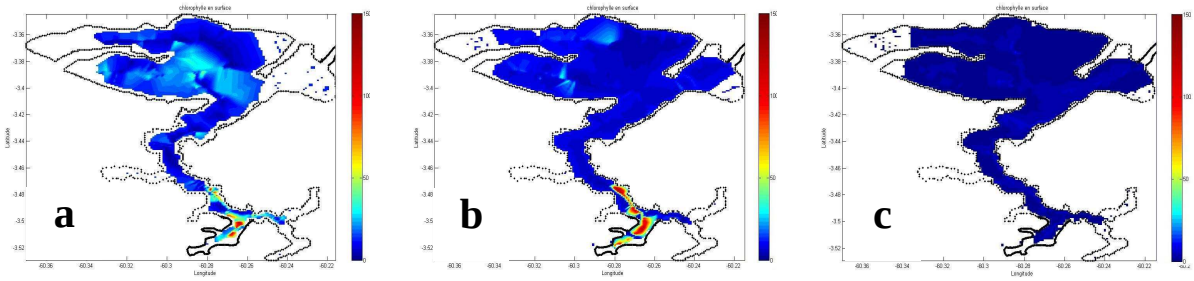
2-a distribution horizontale et variations inter-campagnes

Les cartes de distribution permettent de visualiser la distribution spatiale des paramètres mesurés pour les campagnes de Janvier, Mars et Avril 2009. Elles sont représentées pour les paramètres listés dans la table 2 dans laquelle figurent également les valeurs imposées le long des contours.

	pH	Taux de saturation en oxygène dissous (%)	Chlorophylle (µg/L)	Conductivité (µS/cm)
Janvier 2009	7.00	87.7	15.7	48.3
Mars 2009	6.92	80.8	6.3	49.3
Avril 2009	6.59	59.2	4.3	46.8

Table 2 : moyennes des valeurs des contours du site

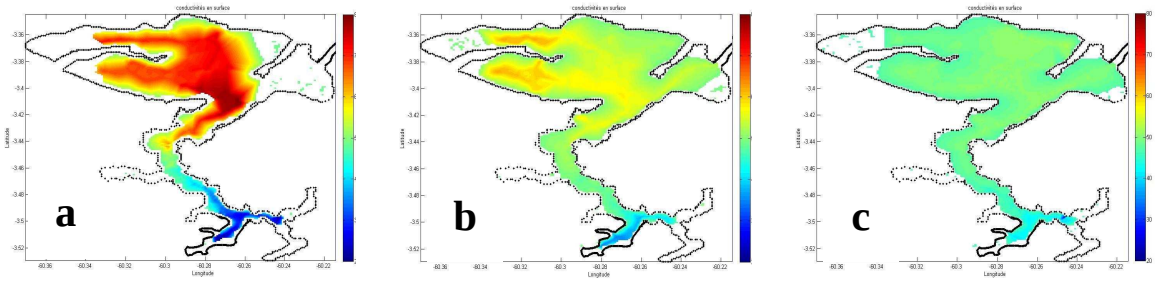
- **Chlorophylle**



Figures 6 : évolution temporelle des teneurs en surface en chlorophylle pour les 3 campagnes de mesures : janvier 2009 (a), mars 2009 (b) et avril 2009 (c).

Les teneurs en chlorophylle se répartissent de manière hétérogène en janvier 2009. Le lac montre une répartition homogène et des teneurs relativement faibles (25 µg/L environ). Une zone au sud dans l'igarape montre des teneurs relativement fortes en chlorophylle (autour de 100 µg/L) (fig.6). Cette zone est toujours présente pour la campagne de mars 2009. La campagne d'avril 2009 est marquée par une répartition homogène et plus faible des teneurs en chlorophylle.

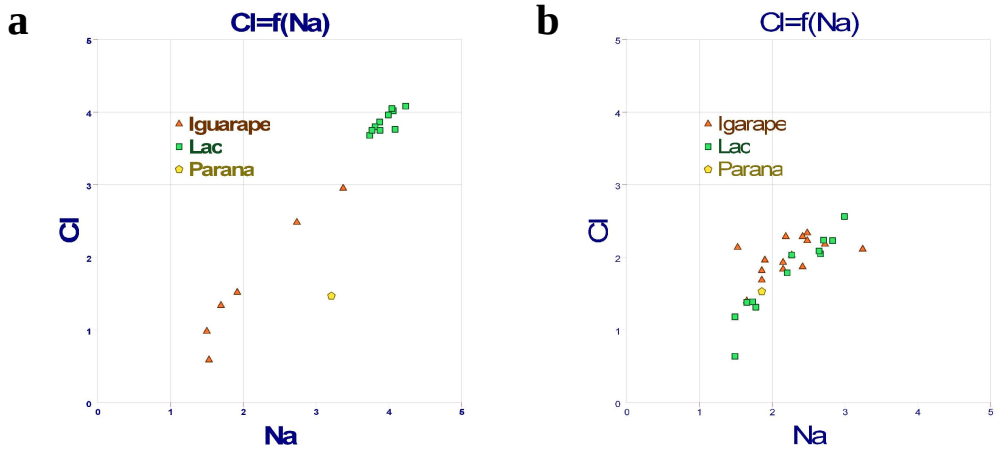
- **Conductivité**



Figures 7 : répartition spatiale de la conductivité en surface pour janvier 2009 (a), mars 2009 (b) et avril 2009 (c).

La campagne de janvier montre des différences significatives entre le lac (70 µS/cm) et l'igarape (de 20 à 50 µS/cm). Au cours du temps, une homogénéisation des conductivités se fait dans la várzea (fig.7).

- **Na-Cl**



Figures 8 : teneurs en Na-Cl dans le lac, dans l'igarape et dans le paranà : campagne de janvier 2009 (a), campagne de mars 2009 (b)

Les teneurs en Na-Cl montrent des distinctions entre les eaux du lac (globalement autour de 4 mg/L en Na/Cl) et de l'igarape (entre 1 et 3 mg/L) en janvier 2009. Lors de la campagne suivante, les deux groupes semblent ne former plus qu'un seul groupe de valeur (entre 1 et 3 mg/L en Na-Cl) (fig.8).

2-b Répartition verticale et variations inter-campagnes

Une stratification chimique a lieu entre 2 et 6 mètres de profondeur séparant les eaux oxiques de celles anoxiques (fig.9).

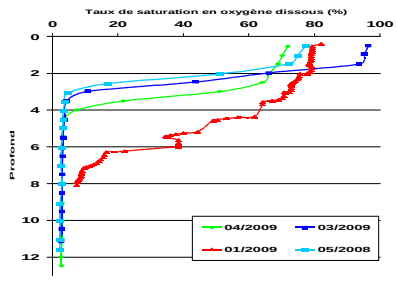
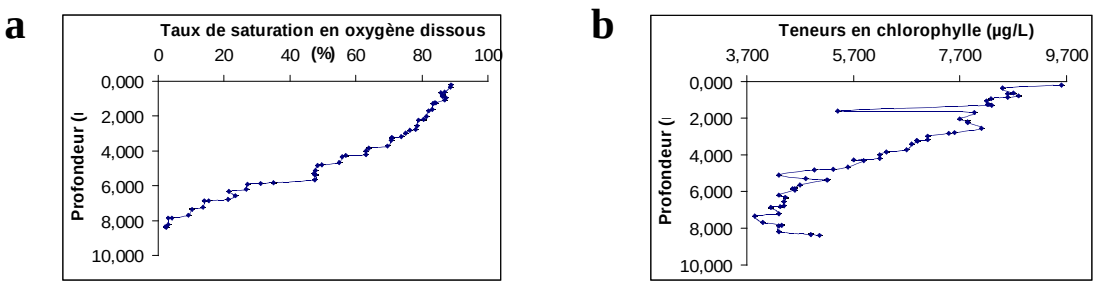


Figure 9 : stratification verticale chimique au cours du temps à la station IF07.

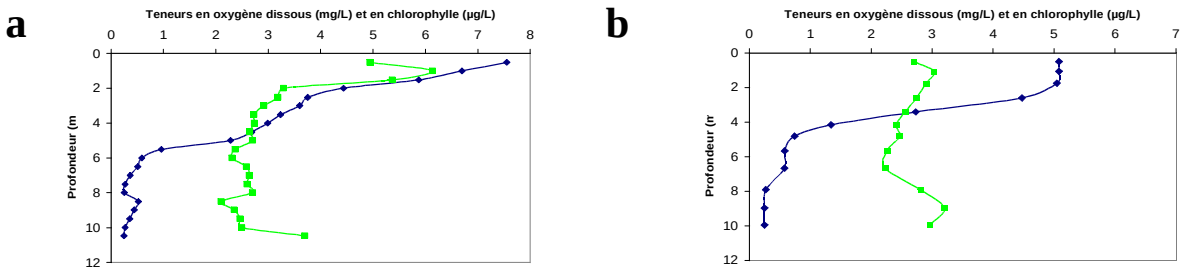
On observe une diminution progressive de la température ainsi que du pH avec la profondeur. La campagne de mars 2008 montre une stratification verticale des teneurs en chlorophylle (fig.10). Cependant, celle-ci n'est pas observée en 2009. On peut toutefois observer des corrélations avec les teneurs en oxygène dissous notamment lors du cycle diurne d'avril 2009.



Figures 10 : stratification des taux de saturation en oxygène dissous (a) et des teneurs en chlorophylle (b) dans la colonne (mars 2008).

2-c Cycle diurne

Le cycle diurne a été effectué au niveau du point LF03 relativement bien étudié lors des précédentes campagnes. Les résultats montrent une évolution significative de la teneur en oxygène dissous en surface; une diminution de 16h à 1h, puis une augmentation entre 4 et 7h correspondant au levé du jour (fig.11). La même évolution a été observée, de manière moins évidente, pour les teneurs en chlorophylle. Les températures évoluent également de la même manière: une différence d'environ 1°C se produit entre le jour (16h) et la nuit (1h) sur une profondeur d'environ 2 m.



Figures 11 : teneurs en oxygène dissous en mg/L (courbe bleu) et teneurs en chlorophylle en µg/L (courbe verte) dans la colonne d'eau le 23/04/2009 à 16h (a) et le 24/04/2009 à 1h (b).

Discussion

1 - Répartition spatio-temporelle

1-a Bilan hydrologique de la várzea

Le choix du degré de complexité du modèle est lié aux questions posées et aux données disponibles pour la modélisation. Ici, nous voulons connaitre l'origine des eaux au cours du temps ainsi que les intéractions avec le Solimões. Un certain nombre d'approximations sont faites dans le modèle. Outre l'application du modèle dans sa formulation la plus simple (pas de débordement ni d'échange avec la nappe), le modèle calcule une évapotranspiration homogène sur le lac et le bassin versant.
En dépit de sa simplicité, l'écart moyen entre hauteur d'eau mesurée et calculée par le modèle est de 3 cm, ce qui montre la robustesse de l'approche adoptée.

La modélisation du bilan hydrologique de la várzea montre 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.5). 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 jusqu'ici en 1953. Le modèle montre des apports importants en provenance du fleuve (55% le 1/04/2009) (fig.5), sachant que le mois d'avril ne correspond pas normalement au maximum de crue du Solimões (la crue du Solimões est généralement en 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 3).

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

Table 3 : volumes entrants cumulés (km^3) pour les différentes années hydrologiques

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, 57 jours pour les cycles 2006-2007, 2007-2008 et 2008-2009 respectivement.
Ce modèle a été transposé du modèle utilisé par Bonnet & al sur la várzea de Curuaí. Pour ce système, Les eaux provenaient essentiellement de l'Amazone à hauteur de 77% à l'échelle de l'année, ce qui est très

supérieur aux apports du Solimões pour la plaine d'inondation de Janauaca. En effet, la várzea de Curuaí a une géométrie différente de celle de la várzea de Janauaca et est connectée par plusieurs chenaux à l'Amazone. La várzea de Janauaca possède un bassin versant plus grand en proportion par rapport à celui de la várzea de Curuaí, d'où un fonctionnement différent. Le degré de connexion de la várzea de Curuaí avec l'Amazone beaucoup plus fort explique également, qu'en dépit d'un volume beaucoup plus grand (de l'ordre de 4,4 km^3 en moyenne) le temps de résidence dans ce système est plus faible que dans la várzea de Janauaca (3 mois au lieu de 4 mois).

Nos résultats et ceux obtenus pour la várzea de Curuai montrent que la dynamique des plaines d'inondation est au premier ordre contrôlée par le niveau dans le fleuve auxquelles elles sont connectées. Les simulations réalisées qui permettent d'obtenir un écart moyen de 3 cm montrent que les termes négligés (débordement et échange avec la nappe) n'interviennent qu'au second ordre dans le bilan hydrique de la várzea. Par ailleurs, les résultats de la simulation obtenue en négligeant les termes liés à la pluie et à l'évaporation permettent d'envisager une régionalisation du modèle à l'ensemble des plaines d'inondation le long du fleuve Amazone même en l'absence de données météorologiques de qualité.

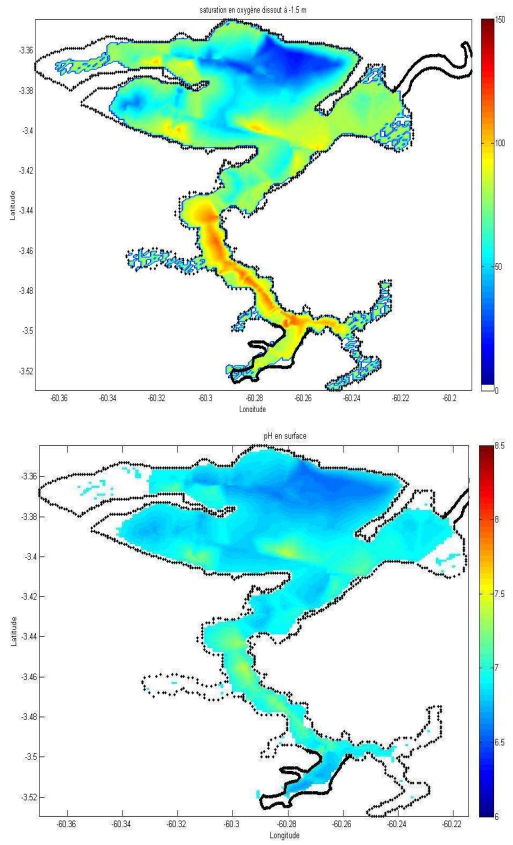
La distribution spatio-temporelle des paramètres de qualité des eaux obtenue à partir des campagnes de Janvier à Avril 2009 permettent en partie de vérifier la validité des résultats du modèle hydrologique, ou tout au moins de montrer comment l'hydrologie peut affecter le fonctionnement biogéochimique de la várzea.

1-b Influence du bassin versant

Les eaux de la várzea possèdent des signatures chimiques caractéristiques des précipitations, de faibles teneurs en Na-Cl ainsi que des conductivités inférieures à 100 $\mu S.cm^{-1}$ (fig.7). On observe toutefois des différences chimiques, plus ou moins importantes en fonction du temps au sein de la várzea, notamment entre les eaux de l'igarape et celles du lac. La campagne de janvier 2009 est par exemple marquée par des teneurs en Na-Cl plus faibles dans l'igarape et plus fortes dans le lac. Cependant, cette différence s'amenuise lors des campagnes suivantes (mars et avril 2009). Les teneurs en Na-Cl, qui formaient deux groupes bien distincts lors de la campagne de janvier 2009, ne semblent montrer plus qu'un seul groupe de valeurs lors des campagnes suivantes (fig.8). Un phénomène de dilution des eaux du lac par celles de l'igarape pourrait en être à l'origine. Il est cependant difficile, avec les seules données de Na-Cl, de déterminer l'origine exacte de cette dilution et ainsi de dissocier la dilution des eaux du lac par les eaux de l'igarape de celle par une autre source telle que le fleuve par exemple. De plus, aucune donnée locale des teneurs en Na-Cl dans le Solimões n'est disponible actuellement. Cependant, l'évolution temporelle de la distribution des conductivités dans la várzea semblerait confirmer qu'une dilution progressive par les eaux du bassin versant a lieu (fig.7). Le modèle calcule un apport du bassin de l'ordre de 28% à cette époque de l'année, l'évolution de la conductivité et du Na-Cl pourraient donc confirmer nos résultats. Cependant, seule la modélisation du transport de traceurs (tel que le chlore) permettra de mieux ajuster la contribution de chaque source d'eau.

1-c Influence du fleuve

On peut remarquer, au cours de la campagne de mars 2009, des taux de saturation en oxygène dissous relativement faibles (autour de 25%) au nord de la várzea (fig.12).



Figures 12 : distribution des taux de saturation en oxygène dissous (a) et du pH (b) en mars 2009

Ceux-ci pourraient être liés à une faible production primaire locale. Cependant, cette zone ne montre pas de corrélation significative entre les taux de saturation en oxygène dissous et les teneurs en chlorophylle. Il semblerait cependant qu'il y ait une corrélation entre les teneurs en MES et les taux de saturation en oxygène dissous dans le lac (stations S19 et S15, table 4). Une des interprétations possibles est une concentration plus élevée de bactéries consommatrices en oxygène dissous associées aux MES apportées par le fleuve en débordement. Ces résultats sont corroborés par des pH plus acides (fig.12).

station	LF09	S17A	S15	S19	LF10	S09B
MES	25.5	23.0	28.0	42.0	17.5	6.8
LF03	S20	S01	S02	LF07	paranà	
12.2	12.8	11.5	9.8	14.0	24.8	

Table 4 : teneurs en MES aux différentes stations dans le lac pour la campagne de mars 2009.

2 - Les teneurs en chlorophylle

Les variations des teneurs en chlorophylle semblent évoluer de manière indépendante de celles des autres paramètres mesurés in situ ainsi que des teneurs en ions majeurs et en nutriments pour les campagnes de 2009. Nos mesures montrent une inégale répartition de la biomasse alguale dans l'espace et dans le temps. Les teneurs en chlorophylle mesurées lors des campagnes de mars et d'avril 2009 sont si faibles qu'il est difficile de les corréler aux autres paramètres. Pour les campagnes de 2009, les teneurs en chlorophylle n'obéissent pas à la stratification de l'oxygène. Cependant, lors de la campagne de mars 2008, on a pu voir une corrélation avec les teneurs en oxygène dissous. En outre, le cycle diurne d'avril 2009 met en évidence une corrélation entre la production primaire et les teneurs en oxygène dissous. Une diminution significative de la concentration en surface de l'oxygène dissous au moment de la tombée de la nuit a eu lieu. En parallèle,

la concentration en chlorophylle a diminué en surface entre le jour et la nuit. Ces variations diurnes compliquent l'interprétation des hétérogénéités spatiales des paramètres mesurés. Une analyse plus approndie devrait être conduite ultérieurement afin de vérifier que ces hétérogénéités ne découlent pas seulement d'heures de prélèvement différentes. Cependant ces variations diurnes n'influencent pas l'analyse des variations à plus grande échelle de temps.

La teneur globale en chlorophylle en surface (fig.6) et en profondeur dans le lac ainsi que dans l'igarape (fig.13) a considérablement chuté du 30 janvier au 20 avril 2009.

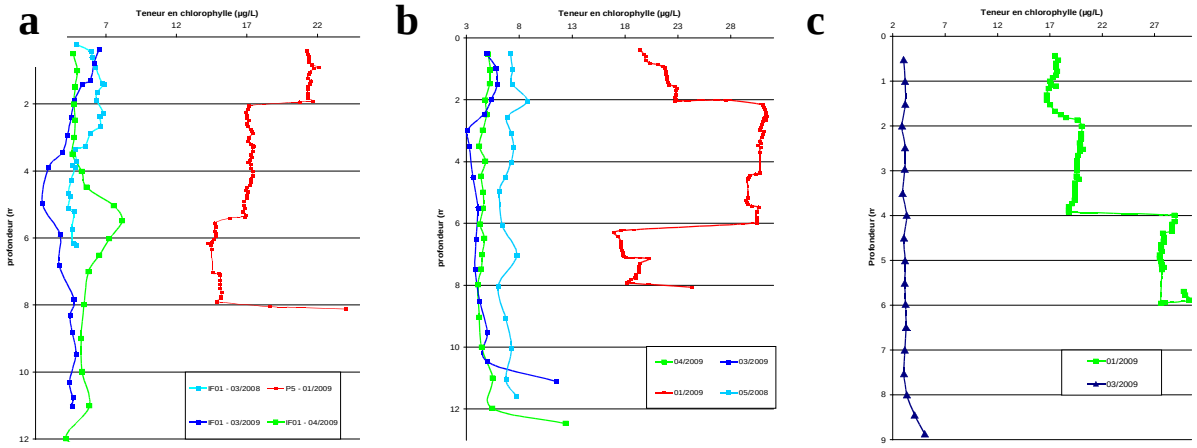


Figure 13 : Teneurs en chlorophylle aux stations IF01 (a), IF07 (b) et S17a (c).

Notons que la sonde ne fournit que des teneurs relatives en chlorophylle, il nécessaire de les comparer pour les valider aux concentrations déterminées au laboratoire. Cependant, il est difficile d'obtenir un facteur de corrélation satisfaisant pour toutes les campagnes, entre les données in-situ et celles mesurées au laboratoire (fig.14).

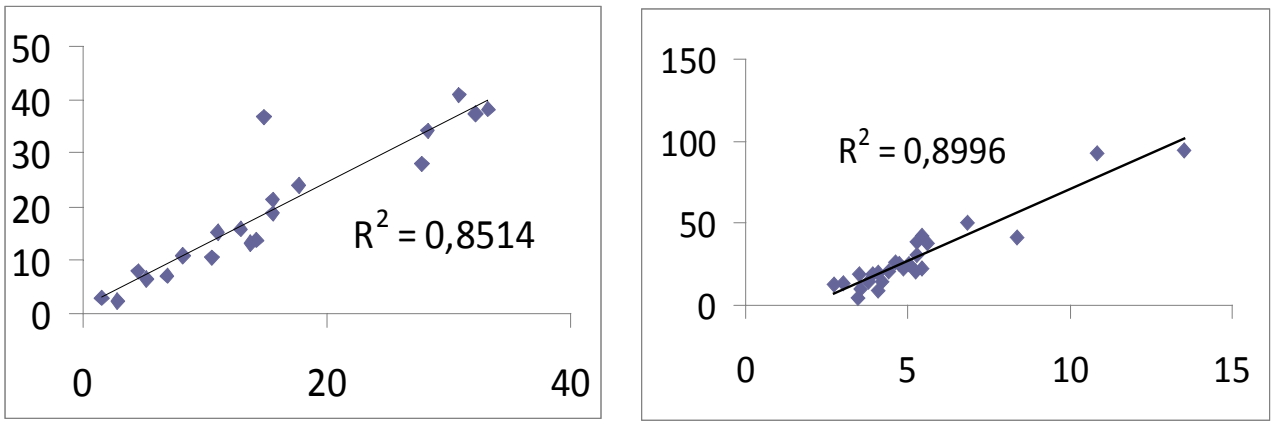
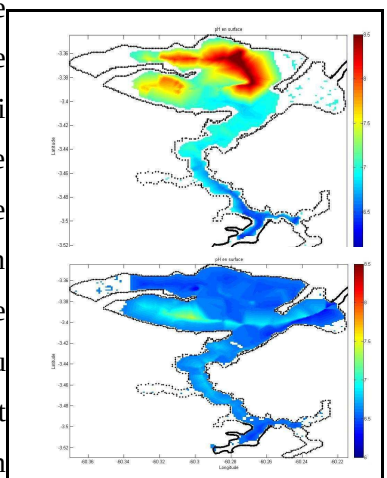


Figure 14 : teneurs en chlorophylle mesurées in-situ et au laboratoire, campagnes de février 2008 (a) et mars 2009 (b).

Une partie des échantillons analysés en laboratoire conduisent à des valeurs peu réalistes de la chlorophylle et il est probable, du fait de la fragilité de la chlorophylle, que des problèmes de conservation soient à l'origine des différences observées. Il serait donc plus judicieux, pour les campagnes à venir, d'effectuer une analyse in-situ des échantillons.

Transfert de la biomasse vers le fleuve

Au cours des trois campagnes réalisées, les teneurs en chlorophylle ont diminué tandis que les teneurs en O_2 ont diminués et que le pH à évoluer vers des valeurs plus faibles (fig.15). Cette évolution montre une diminution de l'influence de la productivité primaire sur la qualité des eaux du lac. Plusieurs facteurs de contrôle de la production primaire peuvent avoir varier au cours de la montée des eaux. Tout d'abord la profondeur, qui augmente significativement entre les trois campagnes. Plus la profondeur est grande, moins les algues (qui sont transportées passivement par les courants) séjournent dans la zone éclairée de la colonne d'eau (ou zone euphotique). 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, bassin versant, principalement) et du recyclage de la matière organique via les bactéries. Nos données indiquent que les teneurs en ammonium et phosphore sont extrêmement faibles en moyenne quelle que soit la campagne. La production primaire n'est donc possible qu'avec un recyclage rapide de la matière organique. Nos données montrent également qu'il existe une légère stratification (des concentrations plus élevées au fond). 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. En effet, nous avons montrer que la várzea est stratifiée, les échanges entre les couches supérieures et inférieures sont essentiellement contrôlés dans les lacs par la dispersion induite par les vagues en surface; plus le milieu est profond, plus les couches du fond, riches en éléments nutritifs sont isolées de la zone superficielle de la colonne d'eau (Bonnet et al, 2000). Cependant, des données complémentaires en particulier sur les concentrations en azote et phosphore dans les sources (fleuve et bassin versant) sont nécessaires pour vérifier notre hypothèse.



Figures 15 : distribution des pH, janvier (a) et avril 2009 (b).

Par ailleurs, le modèle ainsi que l'évolution des conductivités et des teneurs en Na-Cl sembleraient indiquer un phénomène de dilution des eaux du lac par celles du bassin versant de janvier à avril 2009. En outre, un débordement du Solimões, marqué par des taux de saturation en oxygène dissous plus faibles au nord, semblerait se produire actuellement. En effet, la venue de bactéries consommatrices en oxygène associées aux MES aurait pour conséquence une diminution du taux de saturation en oxygène dissous ainsi que des pH plus acides (fig.12 & 15). Des débits importants sortants de la várzea ont été mesurés pendant cette période de l'année (mars et avril 2009) (table 5). La várzea constitue donc actuellement une source pour le fleuve de matière organique labile qui participera aux émissions de GES.

Date	31/08/2006	22/11/2006	05/12/2006	16/01/2007	10/11/2007	03/01/2008	09/02/2008	08/03/2008	17/03/2008	02/02/2009	24/03/2009	23/04/2009	24/04/2009
Débits (m3/s)	-285,694	-36,456	102,57	107,75	40,839	63,645	116,062	61,108	56,029	263,203	-479,687	-843,831	-686,496
déviation standard	28,135	1,966	4,442	3,977	10,031	2,197	3,101	0,98	0,726	4,469	14,412	26,986	25,944

Table 5 : mesures de débits réalisés dans le paranà d'alimentation.

Conclusion

Les résultats de notre étude montrent une intéraction importante de la várzea avec le fleuve ainsi qu'avec le bassin versant. Les proportions de ces deux sources varient beaucoup suivant les années hydrologiques, d'où la nécessité d'étudier le fonctionnement hydrologique sur plusieurs années pour avoir une compréhension plus complète du fonctionnement de la várzea en particulier concernant l'influence de phénomènes climatiques telles que El niño. L'année 2008-2009 pourra servir de cas "extrême" pour la modélisation hydrologique et biogéochimique de la várzea de Janauaca. Dans cette étude nous avons rencontré quelques difficultés pour interpréter l'évolution spatio-temporelle de la chlorophylle. Une partie est liée à la difficulté d'interpoler des données de terrain acquises à différentes périodes de la journée, voir à un jour ou deux de décalages dans le temps (durée d'une mission) sachant la variabilité journalière et inter-journalière de la chlorophylle. Bien que cette difficulté ne nous empêche pas d'analyser la variation saisonnière, la modélisation couplée hydrodynamique/biogéochimique proposée permettra d'obtenir une meilleure compréhension du fonctionnement du système. Les données acquises et les premiers éléments d'interprétation fournis dans ce travail constitueront un apport important pour ce travail de modélisation.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement ma maitre de stage Marie-Paule Bonnet pour m'avoir donner la chance d'effectuer mon stage au Brésil. Je remercie ma binôme Béatriz Lamback, étudiante en hydrochimie à l'Université de Perpignan, dont le travail a eu pour objectifs d'effectuer les analyses en laboratoire (chromatographie, spectrométrie,...) ainsi que de participer à l'analyse de la répartition spatialo-temporelle des paramètres physico-chimiques. Enfin, je remercie tous les collègues de l'IRD et du LAGEQ, ainsi que l'équipage du bateau, qui m'ont aidé dans le cadre de cette étude et qui ont su m'ouvrir l'esprit.

Bibliographie

Bonnet, M.P. & al., 2008. Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaı´).

Cauhope, M., 2004. Hauteur d'eau d'une plaine d'inondation amazonienne par altimétrie spatiale. DEA Thesis, Universite´Paul Sabatier, Toulouse, pp. 30.

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 Resour. Res. 31 (2), 329–345.

Melack, J.M., Forsberg, B.R., 2001. Biogeochemistry of Amazon floodplain lakes and associated wetlands. In: McClain, M.E., Victoria, R.L., Richey, J.E. (Eds.), The Biogeochemistry of the Amazon Basin and its Role in a Changing World. Oxford University Press, Oxford, pp. 235–276.

Richey, J.E. & al., 1988. Biogenic gases and the oxidation and reduction of carbon in Amazon River and floodplain waters. Limnol. Oceanogr. 33 (4), 551–561.

Richey, J.E. & al., 1990. Biochemistry of carbon in the Amazon river. Limnol. Oceanogr. 35 (2), 352–371.