

HYDROLOGIE DU BASSIN AMAZONIEN - HYBAM

Convention CNPq/IRD

IRD/UR069/UMR154 – Jean-loup Guyot

ANA-ANEEL – Eurides de Oliveira

IRD : Marie Paule Bonnet, Jacques Callède, Gérard Cochonneau, Pascal Fraizy, Pascal Kosuth, Benoît Leguennec, Jean-Michel Martinez, Laurence Maurice Bourgoin, Michel Molinier, Frédérique Seyler, Patrick Seyler, Francis Sondag, Patricia Moreira Turcq, Jérôme Viers

ANA-ANEEL : Naziano Filizola, Valdemar Guimarães, Eurides de Oliveira, Mauro Rodrigues

Autres Partenaires : Geraldo Boaventura, Nabil Eid (UnB), Rui Vieira, Suzana Vinzon (UFRJ), Marcelo Bernardes (UFF)

La problématique générale du programme HYBAM, tant au Brésil que dans l'ensemble des pays du Bassin Amazonien, est la quantification des transferts d'eau et de matières par les fleuves amazoniens, depuis les Andes jusqu'à l'Atlantique, ainsi que la compréhension des mécanismes qui contrôlent ces transferts. Le rôle des várzeas, zones d'inondation connexes aux fleuves, sera particulièrement étudié, tant pour l'évaluation du stockage hydrique et sédimentaire, que pour l'analyse des transformations bio-géochimiques ayant lieu dans ces milieux à forte productivité. La géométrie du réseau de drainage amazonien (pente des cours d'eau, méandres, extension et localisation des inondations) sera analysée en regard de l'histoire géologique (mouvements verticaux actuels) et climatique (variation du niveau marin) récente. Les effets de l'impact de l'homme, qu'il s'agisse du changement climatique global ou des conséquences de la déforestation, seront recherchés sur les cycles hydrologiques, sédimentaires et géochimiques actuels. Enfin, les techniques spatiales seront largement utilisées, aussi bien pour la connaissance du fonctionnement hydrologique (variation saisonnière des niveaux d'eau, extension des inondations), que pour l'évaluation des flux sédimentaires transitant par les fleuves et dans les várzeas.

Au Brésil, les principaux objectifs du programme de recherche HYBAM se déclinent selon plusieurs axes thématiques spécifiques, dont les buts sont :

- i. améliorer les techniques de l'hydrométrie et de l'échantillonnage classique pour les adapter à la dimension des fleuves amazoniens, afin de créer une banque fiable de données permettant de :
- ii. quantifier précisément les flux hydriques, sédimentaires et géochimiques, étudier leur dynamique saisonnière et inter annuelle, afin de :
- iii. évaluer l'impact de la variabilité climatique (forçage climatique type ENSO) sur ces flux dans les principaux fleuves amazoniens,
- iv. évaluer l'impact de l'activité anthropique (déforestation, contamination...) sur ces flux,
- v. établir des bilans de matière (dissous et particulaire) dans la plaine amazonienne, afin d'apprécier le rôle des zones d'inondation (várzeas) sur ces transferts (processus d'érosion ou de sédimentation ?, transformations bio-géochimiques ?),
- vi. caractériser finement la géométrie du réseau de drainage (pente et sections des fleuves navigables) par des campagnes de terrain (profils en travers ADCP, profils en long DGPS) couplées aux techniques spatiales (altimétrie radar), ainsi que la variabilité saisonnière des inondations (imagerie spatiale), afin d'être en mesure de :
- vii. développer un modèle hydrodynamique de l'ensemble des fleuves amazoniens tenant compte du rôle des zones inondées. Ce modèle permettra de prévoir en tout point du réseau de drainage et à tout moment : la hauteur d'eau, le débit et le flux de sédiments transportés.

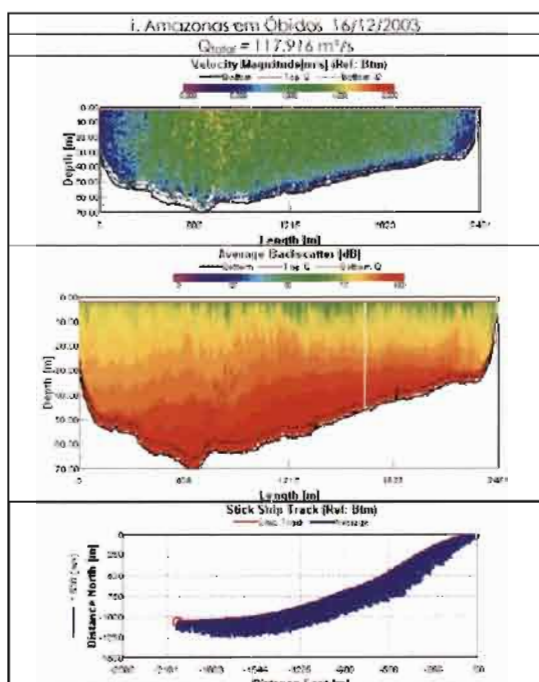


Les techniques hydrométriques, l'échantillonnage et la banque de données

L'ensemble des données hydrologiques de base au Brésil provient du réseau des stations de l'ANA. Après les études pionnières de Oltman (1968), puis de Jacon (1987), l'acquisition d'un courantomètre à effet Doppler (ADCP) par le projet HYBAM, a permis d'améliorer singulièrement l'étalonnage des principales stations hydrologiques, dont la fameuse station de Óbidos, la plus grande station hydrologique terrestre. A cette station, malgré une section jaugée considérable (2500 m de large pour 70 m de profondeur), les vitesses observées en crue dépassent fréquemment 2 m/s. L'ADCP, en offrant la possibilité d'effectuer des jaugeages dans les grands fleuves amazoniens en quelques dizaines de minutes, a permis également d'étudier l'impact de la marée océanique sur les débits de l'Amazone à l'aval de la station de Óbidos. Enfin, les études de la variabilité saisonnière du champ des vitesses dans une section, comme des phénomènes de mélange aux confluences, ont pu être réalisées grâce à l'emploi de l'ADCP.



Equipement ADCP pour jaugeage par effet Doppler, Rio Negro.



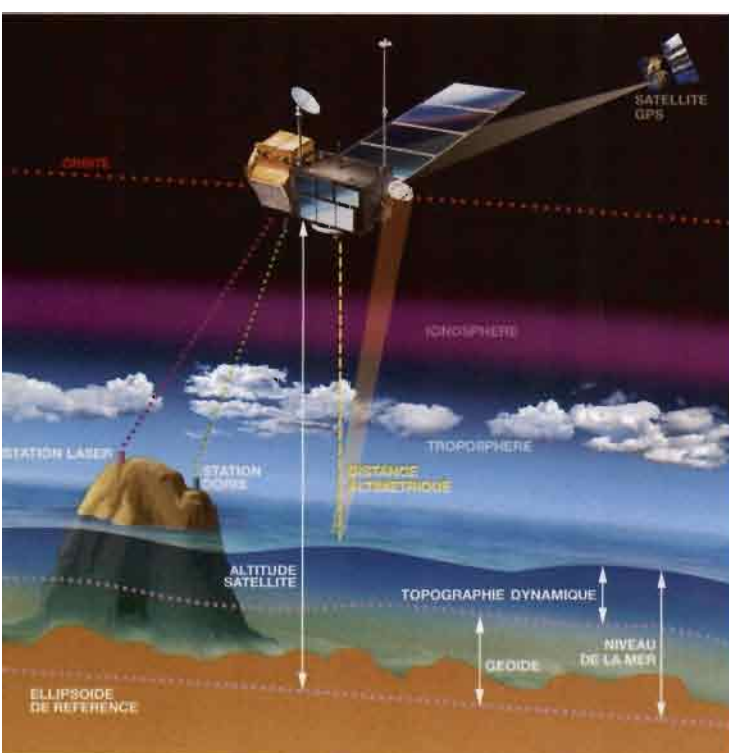
Profil des vitesses

Profil des intensités (rétrodiffusion fonction des teneurs en MES)

Intensité et direction des vecteurs vitesses le long de la trajectoire du bateau

Résultats des jaugeages ADCP – Rio Amazonas à Óbidos

Les données de l'altimétrie spatiale sont venues compléter les observations des stations hydrologiques, en créant des informations nouvelles de hauteur d'eau sur des « stations fictives ». Après une première phase de calibration avec les données TOPEX-POSEIDON, la technique a été améliorée, puis adaptée à d'autres capteurs radar, comme ERS et ENVISAT. Les très bons résultats obtenus ouvrent la voie, par le projet CASH, à l'évaluation prochaine des débits des grands fleuves amazoniens à partir des mesures spatiales.



Le satellite TOPEX/POSEIDON mesure le niveau d'eau des océans et des grands fleuves et lacs de l'Amazonie

Pour l'évaluation des flux sédimentaires et géochimiques, un échantillonnage régulier (décadaire pour les MES et mensuel pour la chimie) a été mis en place sur 15 stations hydrologiques, dont 9 au Brésil. Ce dispositif a été validé en 2003 comme un Observatoire de Recherche pour l'Environnement (ORE) par le Ministère français de la Recherche. L'échantillonnage de tels fleuves, pour être représentatif, a été réalisé en routine sur trois verticales, avec des prélèvements ponctuels de grand volume à différentes profondeurs. Les résultats obtenus sur l'ensemble de la section ont ensuite été corrélés aux échantillons réalisés en surface par les observateurs. L'utilisation du signal de rétro-diffusion

de l'ADCP pour l'exploration de la distribution des MES dans la section a été explorée, avec des résultats variables selon les fleuves et les saisons.



Vue de l'échantillonneur CLD-2 pour le prélèvement d'eau et de matières en suspension.

Les données spatiales (satellites MODIS et MERIS) ont également été utilisées avec succès pour l'estimation des MES de surface des grands fleuves et des lacs de l'Amazonie, avec des pas de temps journaliers. Cette méthode permet de multiplier les mesures en tout point du réseau de drainage, et surtout dans les zones d'inondations, ouvrant de nouvelles perspectives pour une modélisation réaliste des flux sédimentaires dans le bassin de l'Amazonie.

L'ensemble des informations et données obtenues par le programme HYBAM est géré dans la banque de données WHYBAM, accessible « en ligne » sur le site : www.mpl.ird.fr/hybam.

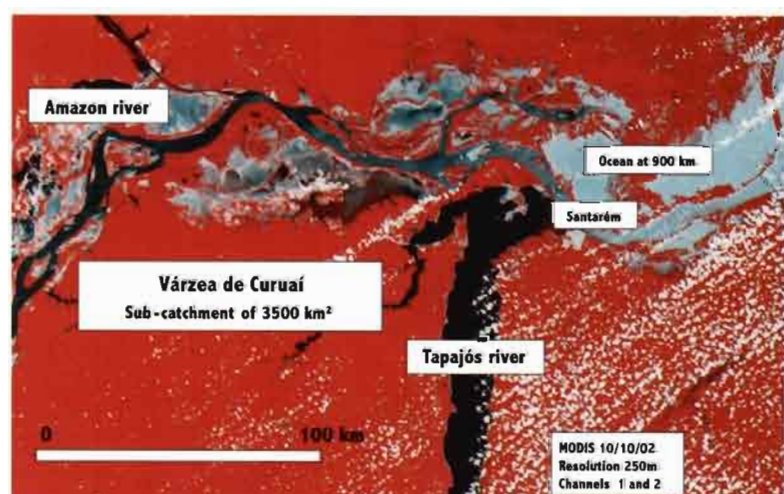


Image MODIS de l'Amazonie centrale avec discrimination des différents types d'eau [Martinez et al., 2004]

La quantification des flux hydriques, sédimentaires et géochimiques

Grâce aux progrès de l'hydrométrie et à la fiabilité des nouveaux étalonnages, des séries temporelles de débit ont été générées, permettant une meilleure analyse des régimes hydrologiques en Amazonie brésilienne.

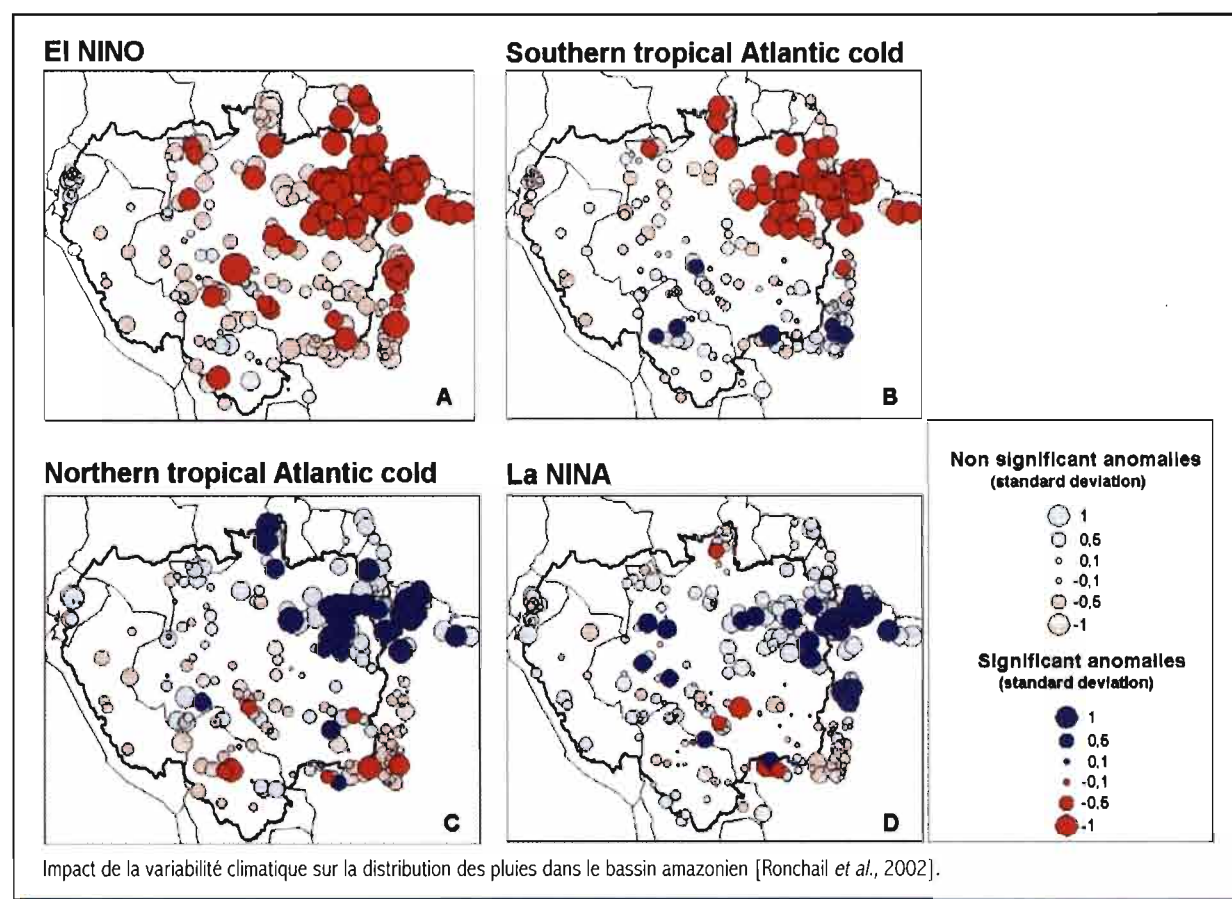
De la même manière, après les travaux pionniers de Gibbs (1967), Meade *et al.* (1985) et Bordas *et al.* (1988), les flux sédimentaires ont pu être précisés, en utilisant les données du réseau de l'ANA, ainsi que les données des stations de l'observatoire HYBAM. Ces deux sources de données convergent vers une valeur d'exportation moyenne annuelle de l'ordre de $800 \cdot 10^6$ t/an. Par ailleurs, l'étude de la propagation des dunes au fond de l'Amazonie montre que le transport de fond serait de l'ordre de $5 \cdot 10^6$ t/an, soit moins de 1% du flux de MES.

Concernant la géochimie des eaux, les flux de métaux traces transportés par les fleuves amazoniens ont pu être quantifiés avec précision, mettant ainsi en évidence une variabilité saisonnière complexe selon les éléments considérés, certains d'entre eux provenant des hauts-bassins andins, d'autres des zones d'inondation. De nombreuses recherches

ont porté sur la nature et l'origine de la matière organique dans les fleuves amazoniens, mais aussi sur le rôle de cette matière organique sur les flux de métaux. Le rôle des zones de mélange aux confluences des grands fleuves, sur les flux géochimiques a été également étudié, tout comme les différences observées sur les flux géochimiques suivant les différentes tranches de profondeur.

L'impact de la variabilité climatique sur ces flux

La variabilité climatique globale (de type ENSO ou non) affecte le régime des précipitations dans le bassin amazonien, de manière différente selon les régions. En utilisant les séries de débit du programme HYBAM, l'analyse a ensuite porté sur l'impact de cette variabilité climatique sur les débits des grands fleuves, montrant généralement un déficit hydrique en période de type « El Niño » et un excédant en époque « La Niña ». Des liens avec les conditions de surface de l'Atlantique tropical et extratropical ont également été mis en évidence. Enfin, la reconstitution d'une série historique centennale des débits à Óbidos a montré une rupture du comportement hydrologique dans les années 1970.



L'impact de l'activité anthropique sur ces flux

Hormis le rôle de l'homme dans le changement climatique actuel, l'étude des impacts de l'activité anthropique s'est principalement focalisée sur les problèmes de déforestation et de contamination des eaux et des sédiments par les éléments traces métalliques, notamment par le mercure. Enfin, la dispersion de la contamination en mercure dans les zones d'inondation a été suivie sur la várzea de Curuaí.

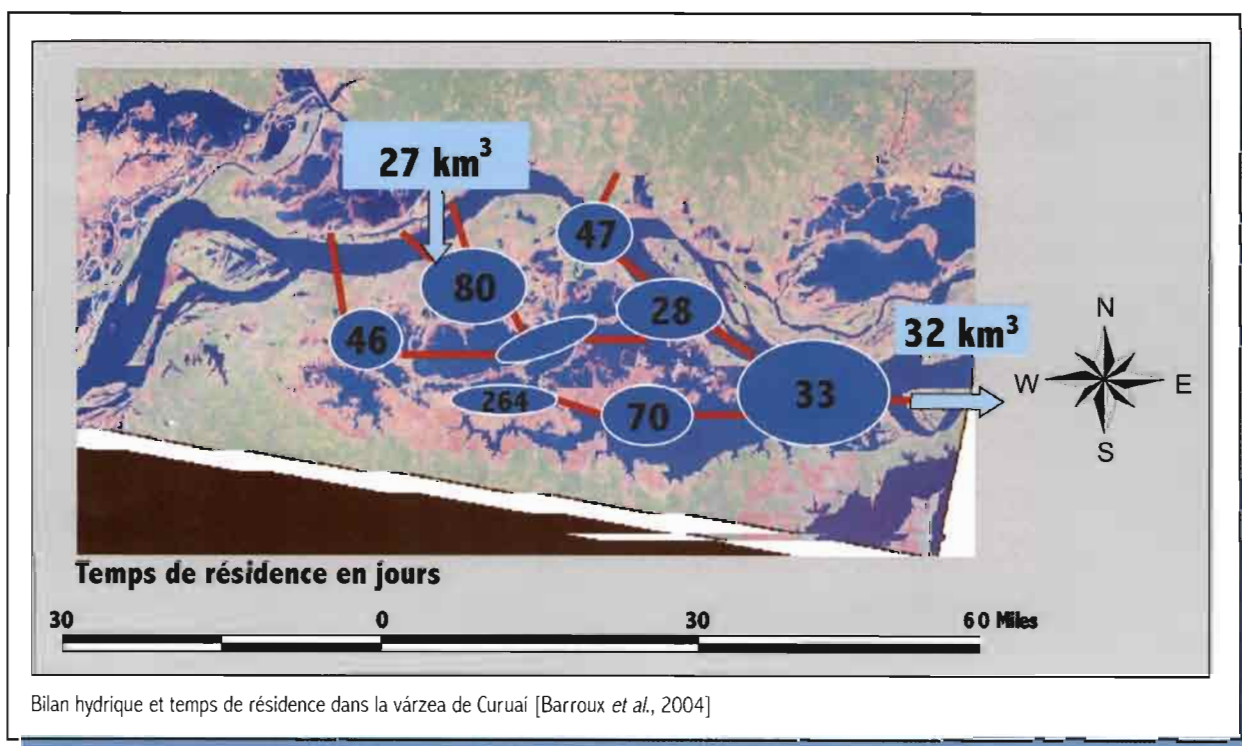
Le rôle des várzeas sur les transferts hydriques, sédimentaires et géochimiques

Les zones d'inondation en Amazonie brésilienne – les várzeas, jouent un rôle déterminant, tant pour l'hydrologie (amortissement des crues et des étiages, piège sédimentaire), que pour la biologie (zones à forte production primaire, riche en nutriments) et l'économie locale (pêche et agriculture). Paradoxalement, malgré de nombreuses études qualitatives, il manquait des données quantitatives sur le fonctionnement hydrologique, sédimentaire et géochimique de ces lacs connectés aux fleuves amazoniens. Afin d'y remédier, le programme HYBAM a installé un réseau de mesure et d'échantillonnage sur la várzea de « Lago Grande de



Várzea de Curuaí

Curuaí », située à proximité de la station hydrologique de Óbidos. Les données obtenues tant sur les chenaux d'entrée et de sortie de la várzea que sur les différents lacs, ont permis de comprendre le fonctionnement hydrologique de la várzea, en fonction des niveaux du Rio Amazonas à Óbidos. Les résultats obtenus confirment les premières hypothèses sur le rôle hydrologique des zones d'inondation, ainsi que sur le stockage sédimentaire en Amazonie centrale. Enfin, les isotopes stables de l'eau ont été utilisés pour le traçage des différents apports hydriques dans ce système complexe.



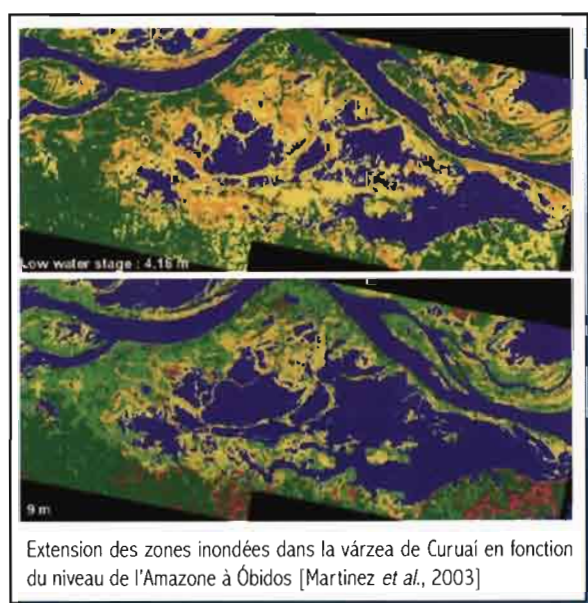
Les études biogéochimiques menées dans la várzea de Curuaí ont également montré l'importance de la végétation et en particulier du phytoplancton sur les flux des éléments traces, et leurs impacts sur la géochimie des fleuves amazoniens. De même, les bilans en carbone organique de la várzea indiquent que cette dernière fonctionne comme un « puits à carbone » en stockant avec le matériel sédimentaire de grandes quantités de matière organique.

Un sondage profond a été réalisé en 2004 sur la várzea de Curuaí afin d'en connaître son fonctionnement sur de plus longues échelles de temps. Ce carottage a été accompagné de mesures géophysiques destinées à mieux apprécier la paléo-morphologie de ce milieu sédimentaire.

La caractérisation de la géométrie du réseau de drainage et des inondations

La mise à disposition de nouvelles données spatiales a permis récemment de mesurer avec précision de nombreux paramètres simples, mais fondamentaux pour le développement de modèles numériques, comme :

- la délimitation des bassins versants et l'analyse du relief, par l'emploi de modèles numériques de terrain de plus en plus précis,
- la détermination de l'humidité des sols par imagerie Landsat,
- la pente des grands fleuves amazoniens par altimétrie spatiale, radar ou laser,
- l'extension et le volume des zones inondées en Amazonie centrale, par l'analyse des images visible et radar.



Carottage de la várzea de Curuaí.

Enfin, lors de campagnes de terrain, des profils en long et en travers ont été réalisés, ainsi que l'analyse des structures de fond (dunes) des principaux fleuves.

La modélisation hydrodynamique des fleuves amazoniens

Grâce aux nouvelles données créées par le programme HYBAM sur les grands fleuves amazoniens, comme la pente des cours d'eau, leur géométrie (sinuosité, profils en travers), l'activité de modélisation hydrodynamique a pu réellement être initiée. Enfin, le calage de ce modèle hydrodynamique permet d'estimer la capacité de transport des flux sédimentaires.

La grande quantité de mesures et d'analyses effectuées sur la várzea du « Lago Grande de Curuaí » à partir de 2000, fait de cet écosystème aquatique l'un des milieux les mieux étudiés du bassin de l'Amazone. La quantification des flux entrants et sortants, les bilan d'eau, d'énergie et de matières réalisés dans ce système de lacs, ont permis de construire un modèle de fonctionnement hydrodynamique 2D d'une várzea, modèle applicable aux autres várzeas du bassin, et constituant une pièce importante de la plateforme de

modélisation du bassin amazonien, en cours d'élaboration par le programme HYBAM.

Aujourd'hui, dans la lignée du programme HYBAM au Brésil, trois projets complémentaires sont déployés :

- la poursuite de l'activité de l'ORE et le développement des techniques spatiales en Amazonie (par un nouvel accord IRD-CPRM, couvert par l'ABC, associant, l'ANA, l'UnB et l'Université de Manaus),

- la continuation de l'étude biogéochimique détaillée du rôle des zones d'inondation, en instrumentant une nouvelle várzea connectée au Rio Solimões, et un Igapo en bordure du Rio Negro (accord IRD-CNPq, associant l'UFF et l'UnB),
- le développement d'une plateforme de modélisation du bassin amazonien (accord IRD-CNPq, associant l'UFRI, l'UPS et le CEMAGREF)

La mise en place des stations de référence et l'observatoire ORE HYBAM

La mise en place des stations de l'observatoire HYBAM en 2003, au Brésil comme dans les autres pays du bassin, est une étape clé car il s'agit là du premier dispositif de suivi des flux sédimentaires et géochimiques des fleuves amazoniens, dispositif appelé à durer une dizaine d'années. Les données fournies par cet observatoire (www.ore-hybam.org) permettront d'estimer pour la première fois la variabilité temporelle des flux de matière sur une période longue, et ainsi être en mesure d'apprécier l'impact climatique et/ou anthropique sur ces flux.

Les débuts de l'hydrologie spatiale

L'hydrologie spatiale est une discipline nouvelle, appliquant les techniques de l'espace aux mesures de l'hydrologie continentale. Les premières applications de l'hydrologie spatiale, pour d'évidents problèmes de taille d'objets, ont concernés les fleuves et les bassins de l'Amazonie brésilienne, dès 2000. Aujourd'hui, les techniques spatiales sont utilisées en routine par le programme HYBAM, qu'il s'agisse de la prévision des débits par altimétrie spatiale (projet CASH), du suivi des inondations, de l'analyse du relief, ou encore de l'estimation des flux sédimentaire dans les fleuves et les lacs de l'Amazonie.

POUR EN SAVOIR PLUS

Bonnet M.P., Barroux G., Seyler P., Pecly O., Moreira-Turcq P., Lagane C., Cochonneau G., Viers J., Seyler F., Guyot J.L., 2005. Seasonal links between the Amazon corridor and its floodplain - The case of the várzea of Curuaí (near Obidos). *Dynamics and Biogeochemistry of River Corridors and Wetlands*, IAHS Publ. 294.

Callède J., Guyot J.L., Ronchail J., Molinier M., de Oliveira E. 2002. L'Amazone à Obidos (Brésil). Etude statistique des débits et bilan hydrologique. *Hydrological Sciences Journal*, 47(2) : 321-333.

Filizola N., Guyot J.L. 2004. The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determinations in the River Amazon. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1) 143-153.

Guyot J.L., Filizola N., Laraque A. 2005. Régime et bilan du flux sédimentaire de l'Amazone à Óbidos (Pará, Brésil), de 1995 à 2003. *Sediment budgets*, IAHS Publ. 291, p. 347-356.

Martinez J.M., Maurice-Bourgoin L., Moreira-Turcq P., Guyot J.L. 2004. Use of MODIS and MERIS data for the monitoring of the water quality of the Amazonian rivers and floodplain lakes. III LBA Scientific Conference : Terra / Aqua MODIS data and products for LBA Science : current results and opportunities for data integration and synthesis, Brasília, July 2004.

Maurice-Bourgoin L., Martinez J.M., Grelaud J., Boaventura G., Filizola N. 2005. The role of floodplains in the hydrology and sediment dynamics of the Amazon River, Brazil. *Sediment budgets*, IAHS Publ. 291, p. 310-322.

Moreira-Turcq P., Jouanneau J.M., Turcq B., Seyler P., Weber O., Guyot J.L. 2004. Carbon sedimentation at Lago Grande de Curuaí, a floodplain lake in the low Amazon region: insights into sedimentation rates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 214(1-2) : 27-40.

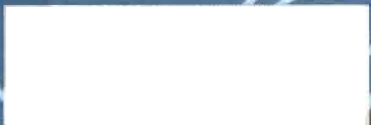
Ronchail J., Cochonneau G., Molinier M., Guyot J.L., Goretti de Miranda Chaves A., Guimaraes V., de Oliveira E. 2002. Rainfall variability in the Amazon Basin and SSTs in the tropical Pacific and Atlantic. *International Journal of Climatology*, 22 : 1663-1686.

Seyler F., Calmant S., Braun A., Filizola N., Bonnet M.P., de Oliveira A.M. 2004. Hydraulic slope of the Negro and Solimões rivers from satellite altimetry : relationship with the distribution of erosion / sedimentation areas - Poster. III LBA Scientific Conference : Surface hydrology and water chemistry, Brasília, July 2004.

Seyler P., Boaventura G. 2001 Trace Elements in the Mainstem Amazon River. Chapter 16, *The Biogeochemistry of the Amazon basin and its Role in a Changing World*, McClain M., Victoria R.L. & Richey J.E. (eds.), Oxford Univ. Press 534p.



Recherches de
l'IRD
au **Brésil**
depuis 1998



IRD

Institut de recherche
pour le développement



Conception graphique
Fernando Brandão

Impression et reliure
Charbel Gráfica e Editora