

ENSEEIHT – TOULOUSE

Promotion 2004

Email: julien.grelaud@etu.enseeiht.fr



IRD - Brésil

Institut de Recherche pour le Développement CP 7091 – Lago Sul 71619-970 Brasilia (DF) – BRESIL

Site Web: <a href="http://www.ird.fr/">http://www.ird.fr/</a>

### RAPPORT DE STAGE DE FIN D'ETUDES

Dynamique et caractérisation des sédiments et matières en suspension dans les zones d'inondation du cours moyen de l'Amazone



La plaine d'inondation de Curuai près de Santarém en Amazonie brésilienne

Maître de stage: Laurence Maurice Bourgoin, UR154 (UMR 5563, LMTG, UPS, Toulouse, France) Tél: +55 61 307 1082 – Email: maurice@lmtg.obs-mip.fr

**Juillet 2004** 

### Table des matières

Introduction et contexte global	3
1. Le bassin amazonien	4
1.1. Géomorphologie	4
1.2. Climatologie	4
1.3. Hydrologie	5
1.4. Sédimentolologie	6
1.5. Les "várzeas" ou plaines d'inondation	6
1.6. La plaine d'inondation de Curuaï	
2. Objectifs et déroulement du stage	
3. Etude de la dynamique sédimentaire d'une plaine d'inondation	
3.1. Le suivi décadaire des MES	
3.1.1. Suivi décadaire des matières en suspension à Obidos	11
3.1.2. Suivi décadaire des MES dans les lacs d'inondation3.1.3. Suivi décadaire des MES dans les canaux reliant le fleuve à la plaine d'inondation	12 13
•	
3.2. Modélisation de la dynamique hydrologique de la plaine d'inondation	
3.2.2. Détermination du volume d'eau stocké	15
3.2.3. Calcul des débits sortant	16
3.2.4. Estimation des pluies sur la plaine d'inondation	
3.2.6. Estimation de l'infiltration	17
3.2.7. Résultats	17
3.3. Modélisation de la dynamique sédimentaire de la plaine d'inondation	19
3.3.1. Calcul des flux sédimentaires dans la plaine d'inondation	
3.3.2. Bilan du stockage sédimentaire dans une plaine d'inondation – Période étudiée: 2001/2003	
4. Caractérisation des sédiments et matières en suspension de la plaine d'inondation d Curuai	te 23
4.1. Détermination des concentrations en matières en suspension	
-	
4.2. Caractérisation des argiles	<b>24</b>
4.2.2. Résultats de l'analyse des échantillons par diffraction des rayons X	25
4.3. Caractérisation granulométrique	27
4.3.1. La granulométrie laser	27
4.3.2. Résultats de l'analyse des échantillons au granulomètre laser	
5. Conclusion et perspectives	30
6. Remerciements	30
7. Bibliographie	31
Annexe 1 - Données hydrologiques de la várzea do lago grande de Curuai	32
Annexe 2 - Dynamique sédimentaire	34
Annexe 3 – Caractérisation sédimentaire	36
Annexe 4 - Classification des minéraux présents dans les échantillons	39
Annexe 5 – Photos	41

### RAPPORT DE STAGE DE FIN D'ETUDES

Dynamique et caractérisation des sédiments et matières en suspension dans les zones d'inondation du cours moyen de l'amazone

**Mots clés** : Amazone, Sédiments, Matières en suspension (MES), Plaine d'inondation, Granulométrie, Rayons X

#### **Introduction et contexte global**

L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) est un établissement à caractère public, sous la double tutelle des ministères de la Recherche et de la Coopération. Son objectif est de développer des projets scientifiques centrés sur les relations entre l'homme et son environnement dans la zone intertropicale. Il dispose d'implantations en métropole, dans les DOM-TOM et dans 26 pays de la zone intertropicale. De nombreux projets de recherche IRD sont actuellement en cours de réalisation en Amérique latine et orientent leurs études dans des domaines très divers (sociologie, santé, agronomie, environnement, économie, etc.).

Le programme de recherche HyBAm auquel mon sujet de recherche est rattaché, a pour objectif l'étude hydrologique et géodynamique actuelle du bassin amazonien. L'Unité de Recherche associé à ce programme (UR 154) travaille en collaboration avec de nombreuses institutions en Bolivie, au Pérou, en Equateur et au Brésil dans le cadre de conventions bilatérales avec la France. A Brasilia, les institutions partenaires sont:

- Le Département des Informations Hydrologiques de l'Agence Nationale de l'Eau (ANA).
- L'Institut de GéoSciences de l'Université de Brasilia (IG-UnB): partenaire du projet depuis 1997, dans le domaine de la géochimie.
- Le Département d'Ingénierie Civile de l'Université de Brasília (ENC-UnB): partenaire depuis 1998 pour la modélisation hydrologique associée au système d'information géographique (SIG).

De nombreux articles et rapports, ouvrages ou mémoires de thèses ont été publiés à ce jour dans le cadre du programme de recherche HyBAm. Ils traitent en particulier des contrôles géodynamique et climatique sur les transferts d'eau et de matière par les fleuves, de l'impact de l'activité anthropique sur le milieu amazonien ou encore du rôle des zones humides sur la dynamique hydrologique et sédimentaire de l'Amazone et de ses principaux tributaires.

Le site web du programme de recherche : http://www.mpl.ird.fr/hybam/

#### 1. Le bassin amazonien

#### 1.1. Géomorphologie

Le bassin amazonien, situé entre les latitudes 5° nord et 20° sud, occupe une superficie de 5,95 millions de km², répartie majoritairement au Brésil (63%), au Pérou (16%) et en Bolivie (12%). Ce bassin versant comporte quatre unités géomorphologiques :

- Le versant oriental andin, caractérisé par un relief montagneux dont les pentes sont souvent supérieures à 30°,
- Les deux boucliers brésilien et guyanais, constitués de roches précambriennes, caractérisés par des plateaux et des pentes assez faibles,
- La plaine amazonienne, comportant une importante couche sédimentaire piégée depuis le Cénozoï que.

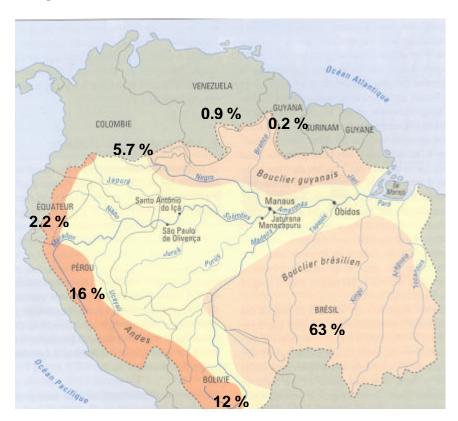


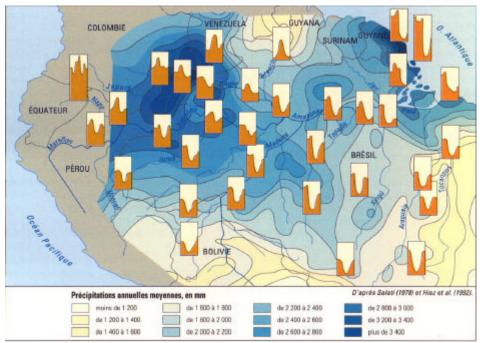
Figure 1.1. Unités géomorphologiques du bassin amazonien.

Le versant oriental des Andes est caractérisé par de très fortes pentes et une pluviométrie élevée, provoquant une importante érosion et drainant une grande quantité de matières en suspension. La diminution brutale de la pente lié à la présence d'une zone de subsidence dans l'avant-pays, à l'exutoire du piémont andin, provoque une importante sédimentation. Les boucliers brésiliens et guyanais présentent à l'inverse de faibles pentes et des roches très anciennes, impliquant un très faible taux d'érosion et donc de production sédimentaire.

#### 1.2. Climatologie

Le bassin amazonien reçoit en moyenne 2650 mm de pluie par an. Les minima observés sur le bassin sont de 300 mm par an dans certaines vallées andines du Pérou et de la Bolivie, alors que les maxima,

observés dans les régions équatoriales humides, peuvent atteindre dans des cas extrêmes jusqu'à 6000 mm par an.



**Figure 1.2.** Carte des précipitations annuelles moyennes sur le bassin amazonien (Molinier et al.,1997)

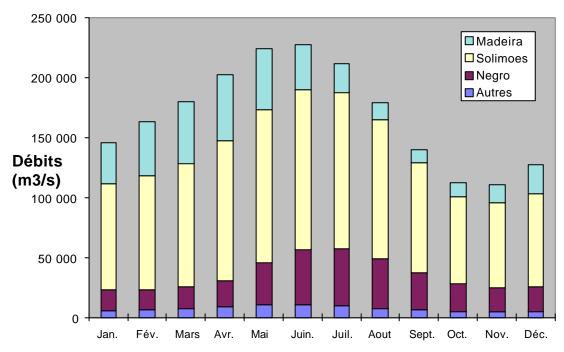
Une importante hétérogénéité saisonnière existe entre le nord et le sud du bassin. Au nord de l'équateur, dans le bassin du Rio Negro, le maximum saisonnier est observé de mai à juillet, alors qu'au sud, le maximum de pluviométrie est enregistré de décembre à mars.

#### 1.3. Hydrologie

En terme de débit, l'Amazone est le fleuve le plus important au monde, avec un module inter-annuel de 209 000 m³/s (Molinier et al., 1995). Au niveau de la frontière entre le Pérou et le Brésil, son débit moyen est déjà de 46 000 m³/s. Une de ses singularités est qu'il ne lui reste alors que 60 mètres de dénivelé sur 3100 km à parcourir jusqu'à son embouchure, expliquant ainsi que l'effet de l'onde de marée se mesure sur une très longue distance en amont (jusqu'à 900 km).

Les apports hydriques des affluents de l'amazone dans la partie sud du bassin (rive droite) et la partie nord (rive gauche) sont respectivement de 46% et 54%. La variabilité climatique est sensiblement différente au sud et au nord du bassin. En effet, les pluies sont moins importantes au sud, et le maximum de pluviométrie se situe entre les mois de janvier et mars. Dans le nord du bassin, où les pluies sont très abondantes, le maximum de pluviométrie est observé du mois de mai au mois de juillet. Les crues des affluents de l'Amazone sont étroitement liées à l'hétérogénéité spatiale de ces régimes pluviométriques. Ainsi, pour les affluents de rive droite, le pic de crue se situe avant le mois de juin, alors que les affluents de rive gauche entrent en période de crue systématiquement après ce même mois de juin.

Les apports hydriques du bassin amazonien (figure 1.3.) proviennent principalement du Rio Negro, du Rio Madeira, et du Rio Solimões (qui forme l'Amazone après sa rencontre avec le Rio Negro). La crue du Rio Negro, un affluent de rive gauche, se situe vers le mois de juin alors que le Rio Madeira, affluent de rive droite et tributaire andin, a une crue bien plus précoce enregistrée vers le début du mois d'avril. Les débits de pointe du Rio Solimões sont quant à eux observés généralement au mois de mai. En conséquence, la crue de l'Amazone, en aval de sa confluence avec le Madeira, se produit en général entre mai et juin.

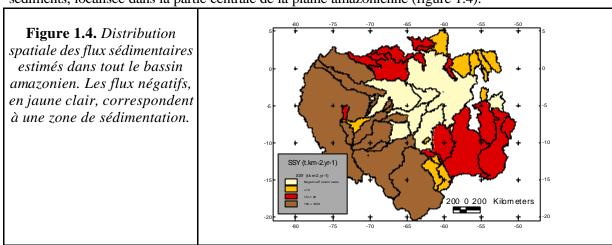


**Figure 1.3.** Décomposition de l'hydrogramme de crue de l'Amazone à Obidos (Guyot et al., 1999)

Cette décomposition de l'hydrogramme de crue de l'Amazone est déterminante pour comprendre les variations de transport solide dans le fleuve et dans la plaine d'inondation de Curuaï , notre zone d'étude (cf. chapitre 3.).

#### 1.4. Sédimentolologie

Le flux total de matières en suspension (MES) exporté par l'Amazone à la zone estuarienne a été estimé entre 600 à 800.10<sup>6</sup> tonnes/an à partir d'un réseau décadaire de mesures mis en place dans le cadre du programme HyBAm et du réseau brésilien (Filizola, 2003). Ces travaux ont permis de mettre en évidence les zones de production sédimentaire, située dans le versant oriental de la cordillère (tributaires andins des Rios Solimões et Madeira), une zone de transfert et une zone de dépôt de ces sédiments, localisée dans la partie centrale de la plaine amazonienne (figure 1.4).



#### 1.5. Les "várzeas" ou plaines d'inondation

Les plaines d'inondation (ou zones humides) sont constituées d'étendues d'eau ou forêts inondables de formes et de tailles très diverses, connectées en permanence ou temporairement au fleuve par des

canaux ("igarapés" en portugais). La superficie de ces zones est estimée dans le bassin amazonien à 300 000 km², soit 5% de la superficie totale du bassin versant (Junk, 1993). Ont été recensés approximativement, 6500 lacs de formes et dimensions variées (Melack 1984; Sippel *et al.*, 1992).

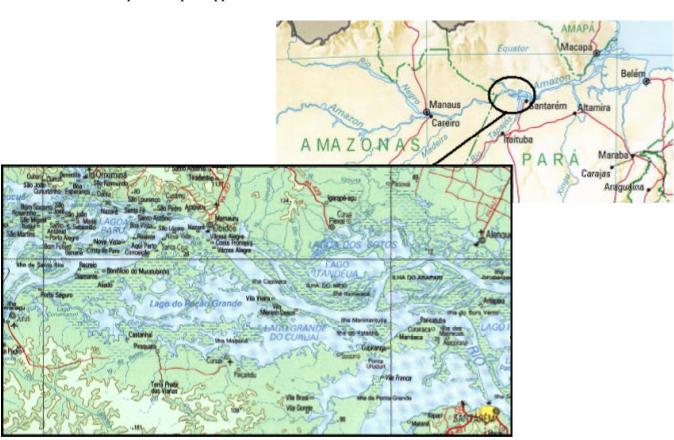
Ces zones humides sont caractérisées par leur régime hydrologique fortement dépendant du fleuve auquel elles sont connectées. Les niveaux d'eau dans les lacs d'inondation suivent le rythme saisonnier du chenal principal, conditionnant ainsi l'hydrologie, la dynamique sédimentaire, la géochimie et la biologie de ces écosystèmes.

Il a été estimé que 30% du débit moyen de l'Amazone transite par ces plaines d'inondation, ce qui explique l'hydrogramme de crue fortement amorti du fleuve.

Les eaux des plaines et forêts inondées étant bien moins agitées que l'eau du fleuve et beaucoup moins profondes, une importante sédimentation a lieu dans ces lacs. On estime que plus des trois quarts des sédiments solides de l'amazone transitent par les plaines d'inondation (Mertes *et al.*, 1996; Dunne *et al.*, 1998).

#### 1.6. La plaine d'inondation de Curuaï

La plaine d'inondation de Curuaï, site pilote de notre étude, constitue une zone particulièrement intéressante. Le centre étant situé à 900 km de l'Océan, à l'ouest de Santarém dans l'état de Pará au Brésil (voir carte), elle est caractéristique des plaines d'inondation du cours moyen de l'Amazone, car une partie de ses lacs reste en permanence connectée avec le fleuve par l'intermédiaire de canaux. Ainsi, il est particulièrement intéressant d'en établir les bilans de transfert de sédiments et de relativiser leur importance par rapport à ceux du fleuve.



**Figure 1.6.**. Carte de la plaine d'inondation (« várzea ») de Curuaï <sup>1</sup>

\_

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> **Source**: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Site web: <a href="http://www.ibge.gov.br/">http://www.ibge.gov.br/</a>

#### 2. Objectifs et déroulement du stage

L'objectif principal de mon stage a consisté à étudier la dynamique sédimentaire d'une zone d'inondation du cours moyen de l'Amazone en amont de la zone estuarienne. Ce stage de fin d'études m'a permis de me familiariser avec les différents travaux et problèmes auxquels peut être confronté l'ingénieur ou le chercheur. Les aspects pratiques ont été abordés largement, avec la participation à une campagne de terrain en mars 2004 et la caractérisation des MES en laboratoire, via l'utilisation d'un diffractomètre à rayons X et d'un granulomètre laser. L'amélioration d'un modèle réservoir et le calcul des flux solides à partir de ce dernier a permis d'aborder des problèmes plus théoriques, notamment en ce qui concerne le calage des paramètres hydrologiques (infiltration, influence des pluies, etc.) et le calcul des flux sédimentaires associés à la dynamique hydrologique du fleuve et des lacs d'inondation.

Les objectifs spécifiques sont présentés ci-après :

• Organisation des données du réseau décadaire de la banque HyBAm,

L'organisation des données du réseau décadaire de MES mesurées en 14 stations de la "varzea" de Curuai dont une située sur le fleuve à Obidos, a constitué une première étape, permettant d'acquérir un aperçu global des données répertoriées à ce jour dans la banque de données HyBAm. L'interprétation de l'évolution des MES mesurées sur le fleuve étant liée à la dynamique hydrologique du bassin amazonien en amont de l'estuaire, une connaissance de son fonctionnement a donc été acquise pendant cette période.

• Campagne de mesures sur la várzea avec collecte d'échantillons d'eau, en différents points de mesure,

L'essentiel de mon travail lors de la campagne de mesures de mars 2004 sur la plaine d'inondation de Curuai, la zone pilote du projet de recherche HyBAm, a consisté à recueillir les échantillons d'eau aux différents points de mesures sélectionnés et répertoriés, à les filtrer sur le bateau pour en mesurer les concentrations en MES et à accompagner les mesures de débit réalisées à l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) dans le fleuve et les igarapés.

• Détermination des concentrations en matières en suspension pour les échantillons de la campagne et du réseau décadaire,

L'un des premiers objectifs du stage à la suite de la campagne de mesures était de déterminer les concentrations en MES des échantillons prélevés et recueillis auprès des observateurs du réseau. Les filtrations ont été effectuées sur des filtres à 0.45 µm avec une rampe de filtration disposant de 6 filtres d'une capacité de 250 ml. Le séchage en étuve et la pesée des filtres ont été réalisés au laboratoire de géochimie de Brasilia. Les résultats ont permis de compléter la banque de données.

• Estimation des flux sédimentaires dans la várzea à partir des données de matières en suspension décadaires,

L'estimation des flux sédimentaires a été calculée à partir des données du réseau décadaire de MES dans la zone d'étude. Les calculs sont effectués en se basant sur les débits obtenus par un modèle réservoir élaboré par Jean-Michel Martinez. Ce modèle a été amélioré, en y incluant notamment un terme d'infiltration, en améliorant la prise en compte de l'évaporation, en diminuant l'effet dispersif des pluies sur les débits sortant et en tenant compte de la différence de pluviométrie entre zones inondables et zones sous forêt non inondables.

• Caractérisation des sédiments par analyse aux rayons X (diffractomètre) à l'Université de Brasilia (UnB),

Des échantillons du fleuve, des canaux et des lacs ont été sélectionnés pour une étude au diffractomètre à rayons X. Cette étude à permis de mettre en évidence les principaux minéraux présents dans les suspensions du fleuve et des lacs de la plaine d'inondation.

• Analyse de la granulométrie à l'Université Fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ)

Tous les échantillons de la campagne de mars 2004 (échantillons de surface et échantillons de fond), ainsi que des échantillons de la campagne de mesures de décembre 2003 (soit plus de 60 échantillons au total) ont été analysés au granulomètre laser, avec et sans défloculation aux ultrasons. Les courbes granulométriques obtenues ont ensuite été interprétées.

Le tableau ci-après reprend les différents objectifs spécifiques du stage, ainsi que les méthodes employées pour chacun d'entre eux.

Ob	jectifs	Produits mesurés	Méthodologie
Détermination des concentrations en MES	Eiltration des échantillons	échantillons de campagnes	Rampe de filtration (filtres à 45 μm)
	Détermination des MES	MES sur filtre	Séchage et pesée a l'UnB
Caractérisation fine des MES	Analyse granulométrique	échantillons de campagnes	Granulomètre Laser (UFRJ-COPPE)
	Analyse des argiles	échantillons de campagnes	Centrifugieuse ; 45 min à 1500 t/min (UnB · Brasilia)
		MES sur lame	Diffractomètre à rayons X (UnB - Brasilia)
Dynamique sédimentaire	Calculs des débits liquides	Débits sortant	Amélioration du modèle hydraulique
	Calcul des flux sédimentaires	Flux solides sortant	Elaboration du modèle sédimentaire

Tableau 2.1. objectifs spécifiques et méthodologie employée lors du stage

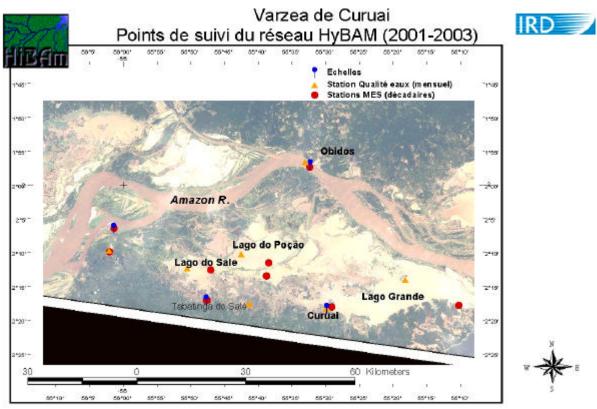
### 3. Étude de la dynamique sédimentaire d'une plaine d'inondation

Cette étude de la dynamique sédimentaire a pour but de caractériser et de déterminer les différents flux et échanges sédimentaires entre une plaine d'inondation et le fleuve Amazone. Pour comprendre le rôle des zones d'inondation dans la dynamique hydrologique et sédimentaire du fleuve Amazone, une zone pilote a été retenue : la "varzea do Lago Grande de Curuai" précédemment exposée.

Après une présentation des données du réseau décadaire de MES, le modèle réservoir est détaillé ainsi que les calculs permettant une évaluation des échanges de matières entre le fleuve et une plaine d'inondation pilote.

#### 3.1. Le suivi décadaire des MES

Lors de chaque campagne HyBAm les échantillons décadaires prélevés par 7 observateurs en 11 points de la várzea sont récoltés (figure 3.1.) ainsi que les échantillons collectés à la station d'Obidos, sur le fleuve. Ce point correspond à la station la plus aval du bassin amazonien non affectée par la marée dynamique. Les prélèvements d'eau de surface sont effectués dans le fleuve (à Obidos, la station de référence), dans les canaux reliant la plaine au fleuve (ou « igarapés ») ainsi que dans les lacs de la zone d'inondation.



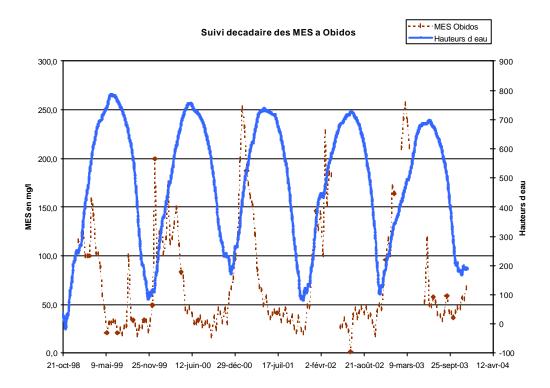
**Figure 3.1.** Carte des points de suivi du réseau décadaire mis en place dans la zone d'inondation de Curuai, Amazonie brésilienne (Maurice-Bourgoin, com. Personnelle)

Pour les échantillons de la campagne de mars 2004, à laquelle j'ai participé, les filtrations sur des membranes de 0.45 im ont été directement réalisées sur le bateau. J'ai ensuite effectué le séchage en étuve et la pesée des filtres au laboratoire de géochimie de l'Université de Brasilia.

Les résultats obtenus des données décadaires de MES sont régulièrement répertoriés dans la banque de données HyBAm.

#### 3.1.1. Suivi décadaire des matières en suspension à Obidos

La courbe suivante montre les concentrations en MES de l'Amazone à Obidos depuis 1998 jusqu'au début 2004. L'hydrogramme de crue d'Obidos figure également sur le graphique car il permet de mettre en évidence le décalage qui existe entre les variations saisonnières des concentrations en MES et le niveau d'eau du fleuve.

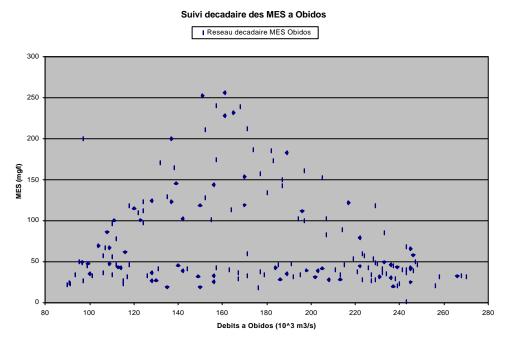


**Figure 3.2.** Variation temporelle des concentrations en MES mesurées à la surface du fleuve Amazone (oct. 98 – mars 04) et des hauteurs d'eau correspondantes.

Lors d'un cycle hydrologique, on observe en montée de crue (de début novembre à fin février) une forte augmentation des concentrations en MES à Obidos. Cette augmentation est liée à la montée de crue du Rio Madeira dont les eaux sont très chargées en MES (de l'ordre de 400 mg/l) arrachées de la cordillère des Andes.

Lors de la seconde phase de montée de crue (de début mars à fin mai), on observe une chute des concentrations provoquée par la crue du Rio Negro, dont les eaux noires et acides sont particulièrement peu chargées en suspensions (quelques milligrammes par litre au maximum).

Au cours de la phase d'étiage de l'Amazone, les concentrations restent relativement faibles (de l'ordre de 50 mg/l). Cette période correspond à la phase de vidange des plaines d'inondation du cours moyen de l'Amazone. Le processus de sédimentation est en effet important dans ces zones humides,.

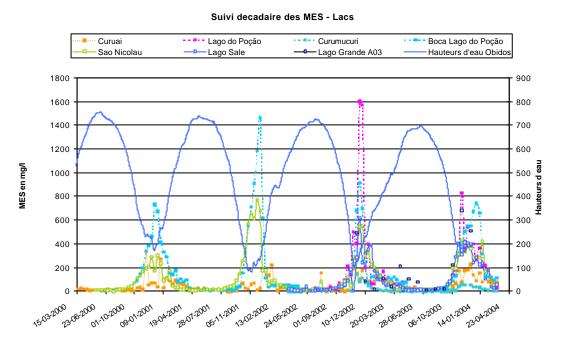


**Figure 3.3.** Distribution des concentrations en MES mesurées à la station d'Obidos (fleuve Amazone) en fonction des débits correspondants (2000 à 2003).

Par ailleurs, on observe un phénomène d'hystérésis, avec deux concentrations en MES possibles pour un débit donné (Fig. 3.3.) dépendant de la phase du cycle hydrologique (montée de crue ou décrue).

#### 3.1.2. Suivi décadaire des MES dans les lacs d'inondation

La figure suivante montre les concentrations en MES depuis mars 2000 jusqu'au début de l'année 2004 dans les différents lacs de la plaine d'inondation de Curuai.



**Figure 3.4.** Variation temporelle des concentrations en MES mesurées dans les eaux de surface des lacs d'inondation de la varzea de Curuai (mars 2000 – mars 2004). Données HyBAm©IRD.

Dans les lacs d'une zone humide, les hauteurs d'eau sont directement liées à la dynamique hydrologique du fleuve. Lors de la période d'étiage, le niveau d'eau dans les lacs est très bas, de l'ordre de 1 à 4 mètres seulement. Il se produit alors une remise en suspension des sédiments de fond sous l'action du vent et les concentrations enregistrées sont très élevées en certains points pendant cette période. Le reste du temps, les matières en suspension ont tendance à se déposer et les concentrations sont relativement faibles.

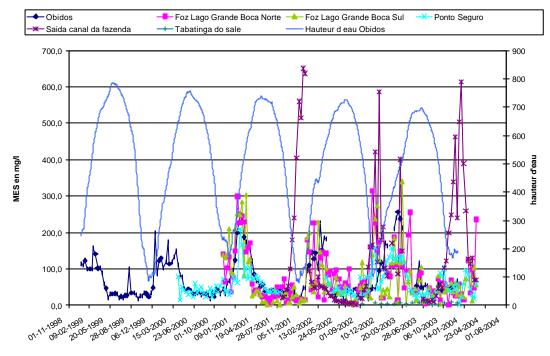
Cependant, il faut noter que les concentrations dépendent fortement de la localisation géographique du lac et de sa dépendance avec le fleuve. Les lacs alimentés par le s eaux de drainage de bassins forestiers sont généralement très pauvres en MES (eaux noires), alors que les lacs alimentées par le fleuve sont en principe riches en matières solides. L'étude granulométrique (cf. Chapitre 4.) montre également que les sédiments de fond des lacs alimentés par les forêts primaires sont en général plus grossiers que les sédiments de fond des lacs connectés au fleuve, et plus profonds, ce qui implique une faible remise en suspension par le vent.

## 3.1.3. Suivi décadaire des MES dans les canaux reliant le fleuve à la plaine d'inondation

La figure suivante montre les concentrations en MES depuis mars 2000 jusqu'au début 2004 dans les différents canaux reliant le fleuve à la plaine d'inondation.

Les canaux partent du fleuve et rejoignent la plaine d'inondation. Ils peuvent être permanents ou temporaires lors du cycle hydrologique. Les concentrations en MES dans ces canaux sont tributaires à la fois des apports solides du fleuve et de la dynamique sédimentaire des lacs. En règle générale, lors de la montée de crue du fleuve, la plaine est alimentée en charges solides par les canaux dont les concentrations sont alors proches de celles observées dans le fleuve. Lors de la décrue, les lacs se vident, et les concentrations enregistrées sont relativement faibles, en raison du processus de sédimentation qui a lieu dans les lacs.

#### Suivi decadaire des MES Igarape



**Figure 3.5.** Variations temporelles des concentrations en MES mesurées dans les canaux connectés au fleuve de façon permanente (Foz Lago Grande Boca Nord et Sud; Ponto Seguro), connectés à un bassin forestier (Tabatinga do Salé) ou entre 2 lacs de la "varzea" (Canal da fazenda). *Données HyBAm*©*IRD*.

Toutefois, cette interprétation a ses limites, car la dynamique hydrologique des zones humides peut varier fortement d'un jour à l'autre et même en quelques heures dans les zones où les effets de la marée se font sentir. Le courant dans les canaux de taille importante (en particulier lors de la période des basses eaux) change de sens toutes les six heures en raison de l'onde de marée (encore perceptible à plus de 900 km de l'embouchure) et les MES mesurées peuvent alors provenir des lacs ou du fleuve. Cela explique en partie la dispersion des valeurs des concentrations et la difficulté à interpréter en détail le suivi du réseau décadaire de MES dans les canaux de connexion au fleuve.

#### 3.2. Modélisation de la dynamique hydrologique de la plaine d'inondation

Cette partie a pour but de présenter la méthode utilisée pour déterminer les échanges liquides puis solides entre le fleuve et la plaine d'inondation de Curuai. Après validation du modèle réservoir à partir des données de terrain, le bilan des flux solides échangés entre le fleuve et la plaine d'inondation permet d'estimer le tonnage de sédiments piégés dans la plaine d'inondation de Curuai.

#### 3.2.1. La cartographie par image radar

La méthode utilisée pour déterminer le volume d'eau stocké chaque jour dans la plaine d'inondation est basée sur l'étude des cartes obtenues par images radar. La série d'images radar de la zone humide provient du satellite J-ERS équipé d'un capteur SAR, et a été acquise dans la période allant de 1992 à 1998. L'avantage des images radars est qu'elles permettent de détecter facilement les zones inondées, aussi bien lorsqu'il s'agit d'une surface d'eau libre que lorsqu'il s'agit d'eau sous végétation.

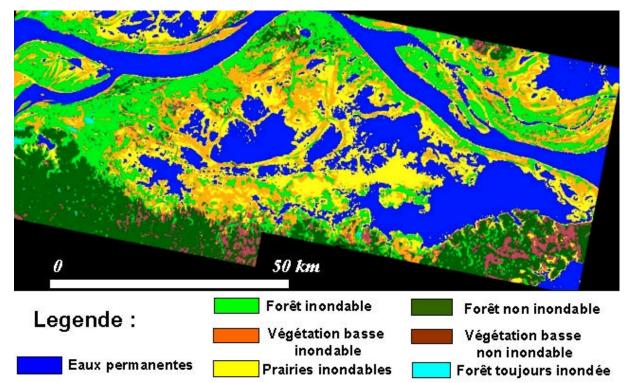
Au total, 21 images sont disponibles dans la zone humide, depuis l'étiage jusqu'au maximum d'inondation. La quantification des variations temporelles par pixels a permis de faire la distinction entre trois zones dans la plaine d'inondation (Martinez et al., soumis) :

- Les zones jamais inondées, correspondant aux pixels dont les variations temporelles sont faibles.
- Les zones inondables, correspondant aux pixels dont les variations temporelles sont importantes,
- Les zones toujours inondées, correspondant aux pixels qui ne varient pas ou peu au cours du temps (l'intensité de la rétrodiffusion du signal est caractéristique car plus élevée que pour une zone jamais inondée).

Un des points forts de l'imagerie par satellite est également de pouvoir déterminer et situer les différents types de végétation observée dans la zone étudiée. Trois types de couverture végétale ont été répertoriés :

- Les forêts,
- La végétation basse,
- Les prairies,

Ainsi, dans la plaine d'inondation, 7 zones distinctes sont répertoriées. A chaque zone correspond une couverture végétale et une possibilité d'inondation ou non.



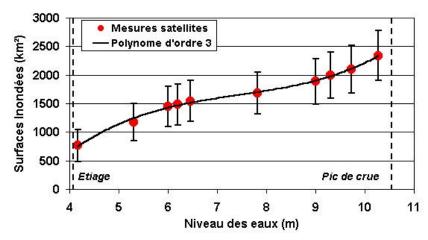
**Figure 3.6.** Carte de la végétation et des zones inondables dans la plaine d'inondation de Curuai (Martinez et Le Toan., 2004)

Il s'agit ensuite d'identifier, en étudiant chacune des images pixel par pixel, le moment où à lieu l'inondation dans les zones inondables, pour ainsi retrouver et reconstituer la dynamique hydrologique de la plaine d'inondation (Martinez et Le Toan, 2004).

#### 3.2.2. Détermination du volume d'eau stocké

Pour déterminer le volume d'eau stocké dans la plaine d'inondation, ont été utilisées les cartes des superficies inondées obtenues pour différentes hauteurs d'eau, depuis l'étiage jusqu'au maximum de l'inondation. La superficie du bassin versant a également été estimée, de sorte à pouvoir en déduire la superficie des surfaces non inondées.

Il est alors possible d'obtenir la variation des surfaces inondées en fonction du niveau de l'inondation (Martinez et al., 2003) (Fig. 3.7.).



**Figure 3.7.** Courbe de la surface inondée en fonction du niveau des eaux à Curuai (Martinez et al, 2003)

Les points obtenus par mesures satellites montrent qu'une courbe continue, polynomiale d'ordre 3, modélise correctement le processus d'inondation dans la plaine. On obtient alors le volume stocké à partir de l'étiage en intégrant la courbe depuis l'étiage (polynôme d'ordre 4) :

$$\Delta V = \int_{h_{etiage}}^{h'} S(h)dh = \int_{h_{etiage}}^{h'} (ah^3 + bh^2 + ch + d)dh$$
 (1)

avec:

- $\Delta V$  volume d'eau stocké depuis l'étiage
- S(h) est la fonction polynomiale d'ordre 3 modélisant la surface inondée en fonction de la hauteur d'eau à Curuai,
- h' la hauteur d'eau à Curuai
- $h_{etiage}$  la hauteur d'eau à Curuai, lors de l'étiage

#### 3.2.3. Calcul des débits sortant

Les volumes d'eau échangés entre le fleuve et la plaine d'inondation sont calculés au pas de temps journalier par un modèle réservoir simple prenant en compte la pluie, l'évaporation et l'infiltration (Martinez et al., 2003):

$$\Delta Q = \Delta V - EV + P - I \tag{2}$$

avec:

- $\Delta Q$  volume d'eau journalier échangé entre le fleuve et la plaine d'inondation (positif si l'échange a lieu du fleuve vers la zone humide),
- $\Delta V$  volume journalier d'eau stockée dans la plaine, calculé par intégration de S(h) (voir formule (1)).
- EV le volume journalier d'eau perdu par évaporation dans la plaine d'inondation,
- P le volume journalier d'eau stockée dans les lacs en provenance des pluies,
- I le volume journalier d'eau infiltrée dans les sols,

Cette méthode simple, basée sur les études des images satellites de la plaine d'inondation, a l'avantage de ne pas faire d'hypothèse sur la topologie de la zone d'étude. Il serait parfaitement envisageable en effet d'appliquer cette méthode à une autre plaine d'inondation, de taille et de forme différente, à partir des images radars de la zone étudiée.

Cependant, l'estimation des pluies et de l'infiltration devrait être modélisée à partir de mesures *in situ*. Les stations de Curuai et de Juruti (les deux stations pluviométriques proches de la plaine d'inondation), ne peuvent à elles seules être totalement représentatives des pluies sur l'ensemble du bassin versant ayant une superficie de 3610 km². L'infiltration pose également un problème, car elle dépend du type de sol ainsi que de l'humidité initiale. La suite du rapport indique comment ces paramètres ont été pris en compte dans le modèle hydraulique.

#### 3.2.4. Estimation des pluies sur la plaine d'inondation

En raison de la grande hétérogénéité de la pluviométrie observée sur la plaine d'inondation de Curuai (jusqu'à 26% sur les moyennes annuelles), deux zones géographiques du bassin versant ont été prises en compte. Dans la partie sud du bassin, d'une superficie de 1270 km² et constituée de forêts jamais inondées, la pluviométrie est supposée identique à celle de Curuai, située au sud du plus grand lac et au pied d'une zone de relief. L'autre moitié de cette zone d'inondation, au nord, constituée de plaines inondables, de prairies et de lacs, est caractérisée par un pluviogramme supposé proche de celui de la station de Juruti, située à l'est de la varzea et non affectée par l'effet orographique observé dans la partie sud du bassin. Ainsi, les données des deux pluviomètres (2566 mm/an à Curuai et 2028 mm/an à Juruti en moyenne sur les 12 dernières années) ont été utilisées pour l'estimation des pluies dans ce bassin versant. Par manque des données pluviométriques journalières à Obidos, il ne nous a pas été possible d'appliquer la méthode de Thiessen.

La méthode employée dans le modèle pour estimer les pluies journalières (sur l'une ou l'autre des zones explicitée ci-dessus) est une moyenne mobile à 10 jours. Pour une date donnée, la valeur de la pluie est une moyenne sur dix jours, centrée sur le numéro du jour du calcul. Les pluies moyennes mensuelles et annuelles utilisées sont donc identiques à celles observées à Curuai pour les zones non inondables et à Juruti pour les lacs, les prairies ou les plaines inondables. Cette méthode permet de lisser les valeurs de débits sortants, notamment après de fortes pluies.

#### 3.2.5. Estimation de l'évaporation

L'évaporation a été modélisée à partir des données mensuelles recueillies lors du projet « RADAMBRASIL » (RADAMBRASIL, 1976) pour la région d'Obidos. La moyenne annuelle atteint 1610 mm.

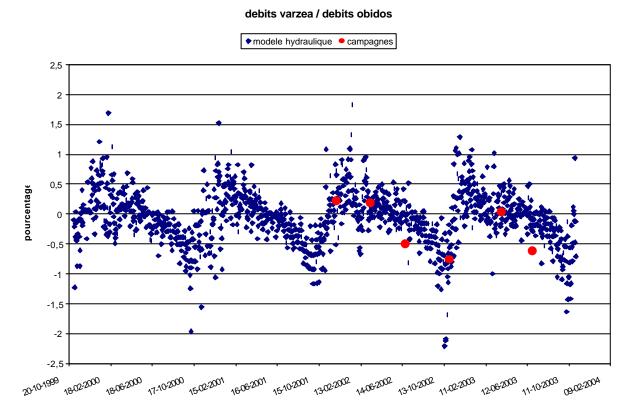
#### 3.2.6. Estimation de l'infiltration

Faute de données, l'infiltration n'a pas été prise en compte directement comme l'indique la formule (2). A chaque jour J de calcul, après évaluation du volume d'eau apporté au bassin versant par les pluies retranché du volume d'eau évaporé, un coefficient d'infiltration instantané égal à 0.4 a été appliqué. De plus, un effet de retard a été introduit permettant de prendre en compte la saturation des sols dans le processus d'infiltration, en appliquant un coefficient égal à 0.2 aux pluies précédant d'une journée le jour J et un coefficient de 0.1 aux pluies tombées au jour J-2. Ainsi, 30 % de l'eau de pluie est considérée comme infiltrée dans les sols et la nappe du bassin versant modélisé. Cette eau n'est donc pas prise en compte dans le calcul des bilans.

#### 3.2.7. Résultats

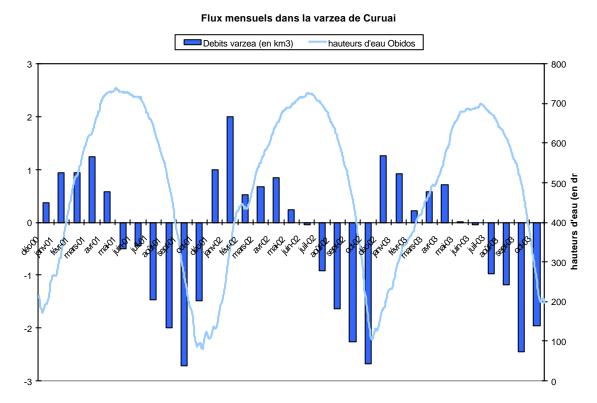
Les calculs ont été réalisés sur 3 années hydrologiques consécutives, de novembre 2000 à octobre 2003. Les données d'entrée du modèle étant les hauteurs d'eau mesurées à Curuai, les pluies, l'infiltration et l'évaporation. La variable de sortie est la quantité d'eau échangée avec le fleuve exprimée en débit liquide.

Les débits calculés par le modèle sont rapportés aux débits de l'Amazone à Obidos. Les débits calculés entrant ou sortant de la "várzea", exprimés en pourcentage des débits du fleuve sont ici comparés avec les valeurs mesurées lors des campagnes de terrain HyBam. Pour chacune de ces campagnes, les débits ont été mesurés à l'aide d'un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) pour chacun des canaux reliant le fleuve à la plaine d'inondation, et ceci à plusieurs moments de la journée, de sorte que la somme totale des débits prend en compte l'effet éventuel de la marée (cf. Maurice-Bourgoin *et al.*, 2001, 2002 et 2003 - rapports de campagne HyBAm-Brésil).



**Figure 3.8.** Débits journaliers entrants (positifs) ou sortants (négatifs) de la "várzea" calculés (en bleu) comparés aux débits mesurés (en rouge) lors des campagnes de mesures HyBAm) et exprimés en pourcentage des débits du fleuve à Obidos.

Sur un cycle hydrologique on observe une phase de remplissage de la plaine de novembre à fin mai (débits calculés positifs), et une phase de vidange de début juin à novembre (débits calculés négatifs). En raison de la pluie, supérieure à l'infiltration, la quantité d'eau sortante de la zone humide est supérieure à la quantité d'eau entrante.



**Figure 3.9**. Flux d'eau mensuels (en 2001, 2002 et 2003) calculés dans la plaine d'inondation de Curuai et comparés à l'hydrogramme du fleuve Amazone.

Le premier graphique permet de comparer les données de terrain avec les résultats du modèle. Les résultats mensuels (figure 3.9.) sont plus corrects que les résultats journaliers car les coefficients d'infiltration ainsi que l'évaporation ont été obtenues à partir de données mensuelles, et la moyenne mensuelle de la pluie tombant sur le bassin versant est plus correcte que la moyenne journalière. On peut observer que les lacs d'inondation sur le cours moyen de l'Amazone commencent à se vidanger à partir du pic de crue observé sur le fleuve (juin-juillet).

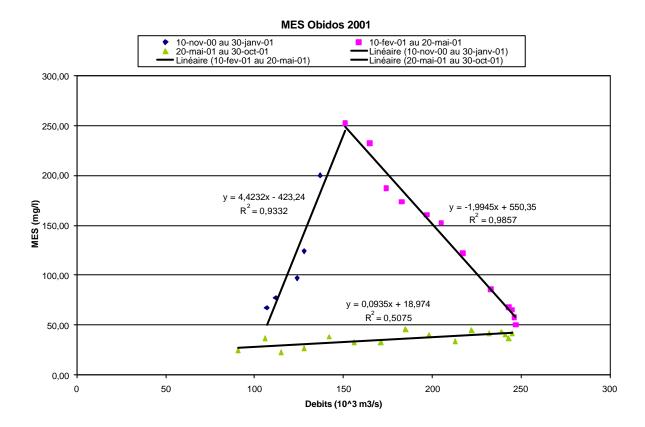
#### 3.3. Modélisation de la dynamique sédimentaire de la plaine d'inondation

Les débits liquides calculés par le modèle réservoir associés aux données du réseau décadaire de mesures des MES dans le fleuve et dans le chenal de sortie de la plaine d'inondation, vont permettre d'estimer à présent les flux sédimentaires échangés entre la plaine d'inondation et le fleuve.

Les débits ont été calculés au pas de temps journalier, de sorte que les flux sédimentaires peuvent être également calculés chaque jour. Cela permet de prendre en compte les évolutions parfois importantes des concentrations en MES qu'il peut y avoir en quelques jours dans les chenaux de connexion de la plaine d'inondation avec le fleuve.

Les données de MES de la banque de données HyBAm étant décadaires, l'idée est de déterminer précisément le comportement de celles-ci au cours d'un cycle hydrologique de sorte à pouvoir interpoler les données au pas de temps journalier.

Comme il a été dit dans la partie présentant les suivies décadaires de MES, les matières solides à Obidos suivent un cycle d'hystérésis. On distingue trois périodes au cours du cycle hydrologique. Pour chacune de ces périodes, les MES vont être directement dépendantes du débit du fleuve. Ainsi, une modélisation simple, linéaire, permet pour chaque période, de calculer les MES journalières à Obidos (Figure 3.10.).

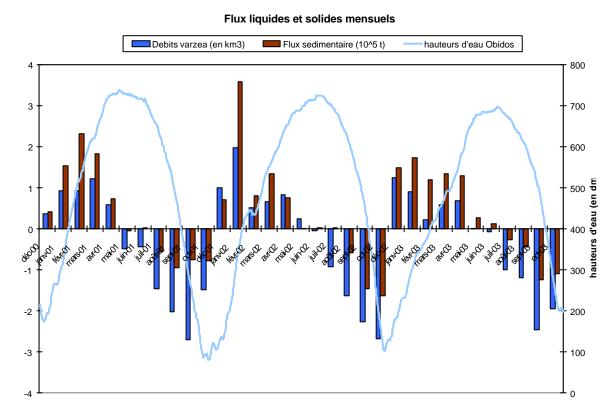


**Figure 3.10.** *Linéarisation des MES à Obidos (année hydrologique 2001)* 

Lors de la période de montée de crue des Rios Madeira et Solimoes (losanges bleus sur la figure 3.10.), dont les eaux sont très chargées en matières solides, les concentrations en MES augmentent régulièrement avec le débit du fleuve. Ensuite se superpose la crue du Rio Negro (avril à juin), dont les eaux noires sont très peu chargées en sédiments, pendant laquelle les MES diminuent régulièrement . Ce comportement s'observe chaque année avec la même chronologie (figure 3.3.).mais dont les pics de crue peuvent être décalés en fonction des pluviométries et les corrélations ont été tracées pour les années pour lesquelles nous disposions des données décadaires de MES, c'est à dire 2000, 2001, 2002 et 2003).

#### 3.3.1. Calcul des flux sédimentaires dans la plaine d'inondation

Les flux sédimentaires ont été calculés à partir des débits liquides obtenus par le modèle réservoir et des concentrations en MES du fleuve ou du chenal de connexion permanente au fleuve, en fonction du sens des échanges d'eau. Lorsque les débits journaliers sont positifs, c'est à dire lorsque l'eau du fleuve entre dans la plaine d'inondation, les valeurs journalières des MES à Obidos (MES du fleuve) ont été utilisées pour calculer les flux solides entrants dans la "várzea". Lorsque les débits journaliers sont négatifs, c'est-à-dire lorsque l'eau circule de la plaine d'inondation vers le fleuve, les concentrations en MES mesurées dans le chenal de la Boca Norte ou de la Boca Sul ont été utilisées. C'est dans ces deux canaux reliant de façon permanente la plaine au fleuve, que se produisent en effet la plupart des échanges liquides et solides entre le fleuve et le système de lacs d'inondation modélisé.



**Figure 3.11.** Modélisation des flux sédimentaires et des flux liquides entre les lacs d'inondation de Curuai et le fleuve Amazone et exprimés en moyenne mensuelle. Les flux positifs indiquent la phase de remplissage des lacs par le fleuve et négatifs, la phase de vidange des lacs vers le fleuve.

Les MES des canaux Boca Norte et Boca Sul ne sont pas directement dépendant des débits du fleuve comme pour les MES à Obidos mais du sens et des vitesses de leur écoulement, nettement influencé par l'effet de la marée. Il n'est donc pas possible de les linéariser pour obtenir des valeurs journalières proches des mesures. Ainsi, à chaque valeur négative du débit calculé par le modèle réservoir, on choisit pour déterminer le flux à cette date, la valeur instantanée décadaire de la concentration en MES à "Boca Norte" ou "Boca Sul" la plus proche de la date en question.

De plus, afin d'évaluer la dispersion des résultats et la sensibilité du modèle aux concentrations en MES de sortie du système, les calculs de flux sortant de la "várzea" ont été réalisés avec différentes valeurs de MES puis comparés dans le tableau suivant :

- avec les valeurs de MES de la "Boca Norte,
- avec les valeurs de MES de la "Boca Sul",
- avec la moyenne des concentrations en MES des deux "Boca",
- en prenant le minimum des concentrations en MES des deux canaux (Boca Norte et Sul) en période de hautes eaux (en raison de la sédimentation qui a lieu pendant cette période, les MES sont généralement faibles) et avec le maximum des concentrations en MES des deux canaux (Boca Norte et Sul) en période de basses eaux (en raison de la remise en suspension des sédiments par le vent pendant cette période, les concentrations sont généralement élevées).

# 3.3.2. Bilan du stockage sédimentaire dans une plaine d'inondation – Période étudiée: 2001/2003

Les résultats obtenus sont répertoriés dans le tableau suivant. Pour les 3 années étudiées, l'estimation des MES entrantes varie relativement peu (de l'ordre de 870 000 tonnes de sédiments entrants). L'estimation des MES sortantes, et donc des MES stockées, est en revanche plus variable en raison des hypothèses de calcul choisies. En 2001 et 2003, les différentes méthodes employées n'affectent pas de manière sensible les résultats (environ 350 000 tonnes stockées en 2001 et 410 000 tonnes en 2003 avec un écart-type < 8% de la moyenne). En 2002, par contre, les résultats sont sensiblement différents selon la méthode employée pour calculer les flux sortants. Cela s'explique par les valeurs exceptionnellement élevées des concentrations en MES mesurées à la «Boca Norte » lors de la période de vidange de la plaine d'inondation (mois d'octobre), impliquant ainsi des flux solides sortant anormalement élevés. Il est probable que le niveau d'eau dans le canal était alors très bas et que les prélèvements aient été réalisés pendant la phase descendante de la marée (d'où les valeurs des concentrations en MES très élevées), et qu'il n'y avait quasiment plus d'échanges entre la plaine et le fleuve dans ce canal. Il apparaît que pour 2002, les meilleures estimations sont celles calculées a partir des concentrations en MES mesurées a la « Boca Sud ».

Annee	MES entrantes		MES sortantes									
	(en t)		(en t)									
	MES Obidos	MES Boca Norte	IES Boca Norte   MES Boca Sul   Min/Max   Moy BocaS/BocaN									
200	848 848	-498 898	-470 255	-531 331	-484 576	-496 265						
2002	879 221	-766 687	-504 529	-797 344	-635 608	-676 042						
2003	909 459	-508 651	-497 594	-483 713	-503 122	-498 270						
			MES stockee	s								
			(en t)									
	MES Boca Norte	MES Boca Sul	Min/Max	Moy BocaS/BocaN	MOYENNE	ECART TYPE (en %)						
200 <sup>-</sup>	349 951	378 593	317 517	364 272	352 583	7						
2002	112 534	374 692	81 877	243 613	203 179	66						
2003	400 808	411 865	425 746	406 337	411 189	3						

**Tableau 4.1.** Flux sédimentaires échangés entre les lacs d'inondations et l'Amazone, calculés pour les années 2001, 2002 et 2003

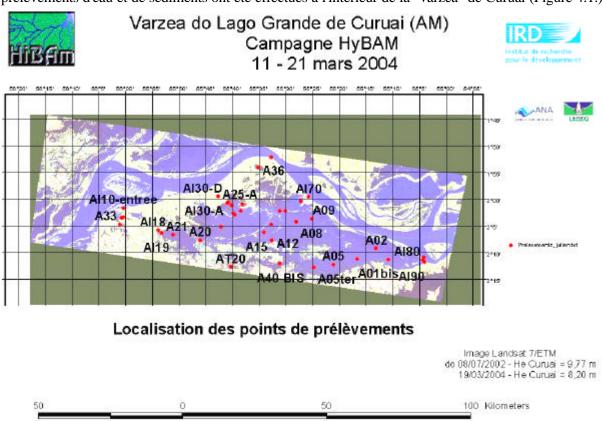
Les premiers résultats obtenus de simulation sur 2001 et 2003 permettent d'estimer la quantité de MES stockées dans la plaine d'inondation de Curuai entre **352 000** et **411 000** tonnes par an, ce qui. Ces résultats concordent parfaitement avec le chiffre de 400 000 t/an estimé par un autre modèle (modvarz) pour l'année 98-99 (Kosuth et al, 2002). Cette plaine d'inondation de 3500 km² représente en surface 2% de la superficie totale des zones inondées du cours moyen du Solimões, Negro et Amazone (220 000 km²) et le stockage moyen de matériel particulaire entrant du fleuve correspond seulement à 0,5% du flux total annuel de MES transporté par l'Amazone.

# 4. Caractérisation des sédiments et matières en suspension de la plaine d'inondation de Curuai

Cette partie présente les résultats des analyses effectuées en vue de caractériser qualitativement et quantitativement les matières en suspension et les sédiments collectés lors de la campagne HyBAm de mars 2004, réalisée donc en phase de remplissage de cette plaine d'inondation par le fleuve Amazone. La première étape de l'étude a consisté à déterminer les valeurs des concentrations en MES des différents échantillons. L'analyse des échantillons au granulomètre laser a permis d'estimer les fractions en argiles, limons et sables fins des échantillons prélevés en mars 2004. L'utilisation du diffractomètre à rayons X a ensuite permis d'identifier les différents types de minéraux présents dans le fleuve, dans les canaux inter-connectés à la plaine ainsi qu'en certains lacs de la zone humide choisis pour leur représentativité.

#### 4.1. Détermination des concentrations en matières en suspension

Lors de chaque campagne HyBAm, des échantillonnages sont effectués en de nombreux points répartis sur la plaine d'inondation. Lors de la campagne de mars 2004, à laquelle j'ai participé, 70 prélèvements d'eau et de sédiments ont été effectués à l'intérieur de la "várzea" de Curuai (Figure 4.1.).

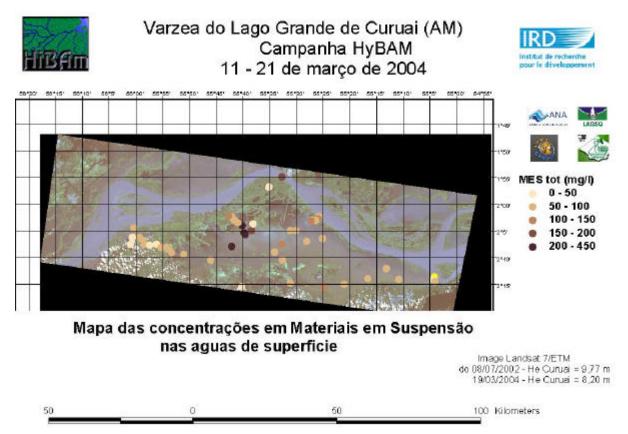


**Figure 4.1.** Carte de localisation des points de prélèvements dans la plaine d'inondation (campagne HyBAm-Brésil, mars 2004)

Par souci de clarté, les 70 points de prélèvements ne sont pas tous répertoriés sur la carte. Dans le canal de connexion Ai10 à l'ouest du bassin, qui s'étend sur 40 km de long, une dizaine de prélèvements ont été effectués dans le souci de savoir si une hétérogénéité spatiale de la granulométrie des matières en suspension le long du canal était observée. De la même façon, six prélèvements ont été effectués dans le canal Ai30 (au nord-ouest du bassin), et trois dans le canal Ai70 (au nord est du bassin). Trois prélèvements ont également été effectués à Obidos, perpendiculairement au courant, à 25%, 50% et 75% de la distance entre les 2 berges du fle uve à cet endroit. Enfin, des prélèvements ont

été effectués toutes les heures (sept prélèvements en tout) dans le canal Ai80 (à l'est du bassin), pour évaluer l'impact de l'onde de marée sur le processus d'échange de MES entre le fleuve et le lac.

Les filtrations des échantillons ont été réalisés sur des filtres pré-pesés à 0.45 îm directement sur le terrain en Amazonie, dans le laboratoire du bateau aménagé pour les campagnes de mesures HyBAm. Le séchage en étuve et la pesée des filtres ont été réalisés au laboratoire de géochimie de l'Université de Brasilia. Les résultats obtenus sont répertoriés sur la figure 4.2.



**Figure 4.2.** Carte des concentrations en matières en suspension des eaux de surface de la plaine d'inondation (Maurice-Bourgoin et al., 2004)

Dans toute la partie sud du bassin versant de la zone humide, les concentrations mesurées restent relativement faibles. Cette partie du bassin est principalement alimentée par les eaux provenant des écoulements de surface des sous-bassins de forêts primaires, riches en matières organiques mais charriant peu de matières en suspension. Les concentrations mesurées dans les lacs connectés au fleuve dans le nord du bassin, via les canaux ou « igarapés », sont relativement élevées, car le fleuve en cette saison transporte d'importantes quantités de MES (période de crue du Rio Madeira). Cependant, il faut noter qu'au mois de mars, certains canaux reliant le fleuve à la plaine ne sont pas encore alimentés en eau par le fleuve, d'où des concentrations faibles mesurées à l'extrême nord du bassin, où les eaux alimentant les lacs dans cette zone proviennent en grande partie des sous-bassins forestiers.

#### 4.2. Caractérisation des argiles

Les échantillons du fleuve, des canaux ainsi que certains échantillons des lacs ont été sélectionnés pour une étude au diffractomètre à rayons X, à l'université de Brasilia (laboratoire de géologie et minéralogie).

#### 4.2.1. Principe de la Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est un procédé aujourd'hui largement utilisé pour l'identification des roches et minéraux. Cette technique s'applique pour tous les éléments présentant les caractéristiques des structures cristallines, c'est-à-dire présentant un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs.

La théorie de la diffraction a été élaboré par W.L. Bragg et G.Wulff . Elle part du principe qu'un rayon lumineux d'une longueur d'onde suffisamment petite est diffracté par les plans réticulaires des structures cristallines. L'angle d'incidence des rayons X ou angle de Bragg est déterminé par la relation de Wulff-Bragg :

$$\sin \boldsymbol{q}_n = \frac{n\boldsymbol{I}}{2d_{(h,k,l)}}$$

avec:

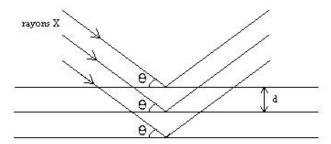
•  $\mathbf{q}_n$ : angle de Bragg,

• **1** : longueur d'onde du faisceau de rayons X,

• *d* : distance entre deux plans réticulaires,

• *n* : ordre d'interférence.

Les interférences entre les différents ordres de diffraction n permettent une énergie suffisante des rayons diffractés pour être détectés.



**Figure 4.3**: Schéma de diffraction des rayons X par une famille de plans réticulaires

L'appareil effectuant les mesures est un goniomètre, avec source de rayons X. Il est muni d'un détecteur et d'un film photographique permettant de mesurer l'intensité des rayons diffractés.

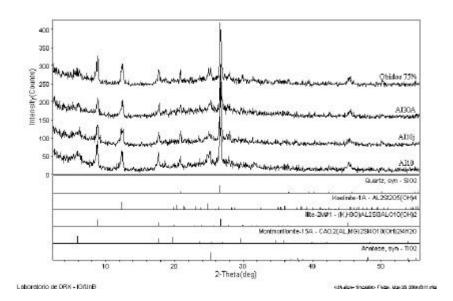
#### 4.2.2. Résultats de l'analyse des échantillons par diffraction des rayons X

Les résultats sont présentés sous forme de graphiques et de courbes représentant l'intensité du signal mesuré par le diffractomètre en fonction de l'angle de Bragg, ceci pour chaque échantillon analysé. Pour chacun des pics d'intensité mesurés par le diffractomètre, l'élément correspondant à l'angle de diffraction (avec sa formule chimique) est répertorié en bas du graphique.

Les résultats des analyses par diffractométrie ont montré que les minéraux présents sont quasiment identiques pour l'ensemble des échantillons. Par contre, les proportions varient significativement d'un échantillons à l'autre, suivant l'endroit ou a été effectué le prélèvement. Les minéraux majoritairement présents sont le quartz, la kaolinite, l'illite, l'anastase et la montmorillonite. Les caractéristiques majeurs de ces éléments (formule, classe, minéraux associés, etc.) sont détaillés en annexe. D'une étude réalisée sur les signatures en minéraux argileux des principaux tributaires de l'Amazone, (Soares et al., in prep.) il apparaît clairement que le Madeira est fortement enrichi en illite, le Solimões en smectite (montmorillonite) et les tributaires d'eaux claires et noires (R. Negro) en kaolinite.

Dans le système étudié, on distingue 3 grandes classes d'échantillons en fonction de leur enrichissement en minéraux :

• La première classe correspond aux échantillons dont le quartz est largement majoritaire.

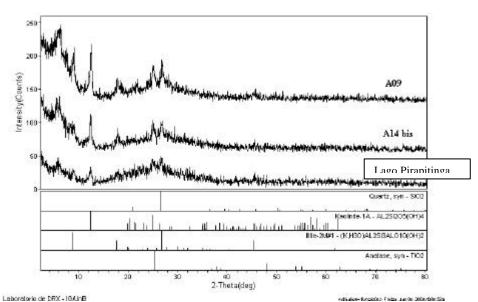


**Figure 4.4.** Caractérisation des argiles dans le fleuve à Obidos, à l'entrée du canal Ai30 (point de mesures Ai30A), à l'entrée et la sortie du canal Ai10 (points de mesures Ai10 et Ai10j)

Après le quartz, la kaolinite est présente dans des proportions plus importantes que l'illite ou la montmorillonite. De l'anatase est également détectée en très faible proportion.

Cette classe comprend les échantillons du fleuve à Obidos ainsi que ceux des canaux reliant le fleuve aux lacs de la plaine d'inondation et intègre donc les différents minéraux apportés par les tributaires andins, des boucliers et d'eau noire.

• La seconde classe correspond aux échantillons fortement enrichis en kaolinite.

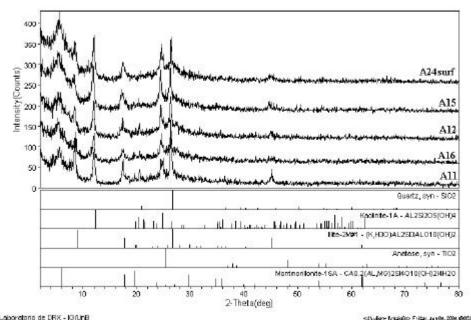


**Figure 4.5.** Caractérisation des argiles dans les lacs isolés de la várzea de Curuai (c.f. figure 4.1. : points de mesures A09, A14bis et nord du Lago do Poção)

La proportion de quartz est moindre dans ces échantillons que dans ceux de la première classe. On observe également mais en très faibles proportions de l'illite et de la montmorillonite.

Les échantillons de cette classe proviennent des lacs isolés temporairement du fleuve (en étiage), et alimentés localement par les sous-bassins forestiers. Leur richesse en kaolinite témoigne de ces apports locaux. En effet, les sédiments déposés dans le lit d'un igarape d'eau noire ont révélé l'abondance de ce type d'argiles dans les sous-bassins forestiers de la région.

• La troisième classe comprend les échantillons dans lesquels aucun élément ne prédomine et qui correspondent a des zones alimentées a la fois par le fleuve et par les sous-bassins forestiers.



**Figure 4.6.** Caractérisation des argiles dans des lacs de la vàrzea de Curuai (cf. figure 4.1. : points de mesures A24, A15, A16 et A11)

#### 4.3. Caractérisation granulométrique

Tous les échantillons de la campagne de mars 2004 (échantillons de surface et échantillons de fond), ainsi que des échantillons de la campagne de mesures de décembre 2003 (soit plus de 60 échantillons au total) ont été analysés au granulomètre laser à l'Université de Rio de Janeiro (UFRJ). Chaque échantillon a été analysé avec et sans passage aux ultrasons, pour pouvoir comparer les courbes granulométriques avant et après défloculation des particules organiques colloï dales contenues dans les échantillons. Cependant, le fonctionnement des ultra-sons n'était pas régulier et nous avons préféré ne présenter que le résultats bruts sans défloculation, qui ne présentent pas de différences majeures pour les échantillons de lacs d'eau blanche mais ces résultats sous-estiment la fraction fine notamment pour les eaux noires.

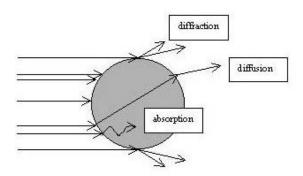
#### 4.3.1. La granulométrie laser

La granulométrie laser est une technique communément utilisée pour identifier la taille des particules d'un produit ayant des grains de petites tailles (de  $0.02\mu m$  à  $2000\mu m$ ). Elle est donc particulièrement adaptée pour déterminer la granulométrie des matières en suspension présentes dans des échantillons d'eau de surface d'un fleuve, d'une rivière ou d'un lac.

La théorie sur laquelle se base la granulométrie laser est la théorie de Me. Cette théorie prend en compte les phénomènes de diffraction, de diffusion et d'absorption des rayons lumineux.

Pour des particules de diamètre très inférieur à la longueur d'onde, la théorie ondulatoire de la lumière n'est plus efficace et les théories de l'optique physique sont alors nécessaires.

Lorsque les diamètres sont proches de la longueur d'onde, la théorie de Mie permet de compléter la théorie ondulatoire de la lumière. Lorsque le rayon va rencontrer une particule dont l'indice de réfraction est différent de celui du milieu étudié, il est absorbé par la particule en se réfractant. Une partie des rayons absorbés est ensuite diffusé dans le milieu en se réfractant à nouveau.



**Figure 4.7.** Diffraction et diffusion des rayons lumineux par une particule

L'appareil utilisé est un granulomètre Mastersizer Micro (Malvern Instruments) permettant d'effectuer des mesures sur des échantillons de 300 à 600 ml dont la taille des particules en suspension est comprise entre 0.3 im et 300 im (Malvern Instruments, 2000).

#### 4.3.2. Résultats de l'analyse des échantillons au granulomètre laser

Les résultats de l'analyse au granulomètre se présentent sous la forme de courbes granulométriques indiquant le pourcentage des particules passées pour un diamètre donné. Ces courbes, répertoriées en annexe, permettent de déterminer pour chaque échantillon les fractions en argiles, limons et sables. Les résultats présentés (tableau 4.8.) ont été obtenus sans passage aux ultra-sons.

Point de mesure		Date	Localisation	% argiles	% limons		% sables	
				d<0,002	0,002 <d<0,06< th=""><th>0,06<d<0,2< th=""><th>0,2<d<0,6< th=""><th>total sables</th></d<0,6<></th></d<0,2<></th></d<0,06<>	0,06 <d<0,2< th=""><th>0,2<d<0,6< th=""><th>total sables</th></d<0,6<></th></d<0,2<>	0,2 <d<0,6< th=""><th>total sables</th></d<0,6<>	total sables
Amazone a Obidos	surface	mars-04	Obidos	23,8	76,2	0,0	0,0	0,0
Ai10b	surface	mars-04	Igarape do Sale	22,8	77,2	0,0	0,0	0,0
Ai10c	surface	mars-04	Igarape do Sale	22,0	78,0	0,0	0,0	0,0
Ai10d	surface	mars-04	Igarape do Sale	25,0	75,0	0,0	0,0	0,0
Ai10e	surface	mars-04	Igarape do Sale	21,6	78,4	0,0	0,0	0,0
Ai10f	surface	mars-04	Igarape do Sale	21,8	78,2	0,0	0,0	0,0
Ai10g	surface	mars-04	Igarape do Sale	16,7	83,3	0,0	0,0	0,0
Ai10i	surface	mars-04	Igarape do Sale	10,2	84,9	4,9	0,0	4,9
Ai10j - sortie	surface	mars-04	Igarape do Sale	14,6	83,8	1,6	0,0	1,6
Ai91	fond	déc-03	Boca Sud	21,2	71,9	5,3	1,6	6,9
A02bis	fond	déc-03	Lago Grande	29,1	68,6	0,0	2,2	2,2
A20	fond	déc-03		19,5	74,6	5,9	0,0	5,9
A11	fond	déc-03	Santa Ana	21,4	72,3	6,2	0,2	6,4
A24	fond	déc-03	Lago Pocao	12,7	77,1	8,1	2,1	10,2
A25	fond	déc-03	Lago Pocao	14,6	72,8	11,3	1,3	12,6
A03bis	fond	déc-03	Lago Grande	15,8	66,4	12,7	5,1	17,8
A05bis	fond	déc-03	Lago Grande	15,9	61,8	13,2	9,1	22,3
A38	fond	déc-03		15,5	60,7	20,3	3,4	23,7
A36	fond	déc-03	Lago Acai	6,2	69,1	19,1	5,6	24,7
A40	fond	déc-03	Curuai	10,3	59,0	22,6	8,1	30,7
A33	fond	déc-03	Lago Curumucuri	4,8		23,2	11,2	34,4
Rio Negro	fond	déc-03	Manaus	15,1	74,0	7,3	3,7	11,0

**Tableau 4.8.** Fractions en argile, limons et sables de quelques prélèvements de surface et de fond des campagnes de mesures de décembre 2003 et mars 2004 sur la várzea de Curuai Pour les prélèvements de fond de la campagne de mesures de décembre 2003, on distingue trois classes d'échantillons suivant la répartition granulométrique observée :

- Les échantillons des canaux reliant le fleuve à la plaine d'inondation (point de mesures Ai91) et des points de mesures situés dans des zones en permanence connectées au fleuve (points de mesures A02bis, A20 et A11). Ils sont caractérisés par une granulométrie relativement fine avec une fraction de sable inférieure à 7% et une fraction de limons de l'ordre de 70% (cf. tableau 4.8.). L'enrichissement en quartz observé dans les échantillons de surface en provenance de l'Amazone (cf. paragraphe 4.2.2) n'est pas corrélé au contenu en sables. Ces minéraux sont donc probablement compris dans la fraction de limons. Les particules de quartz constituent un des produits de l'érosion physique de la chaîne andine remaniés au cours de leur transport et de leur transfert dans la plaine amazonienne. Du quartz a été par ailleurs observé, dans certains glaciers, sous forme de fines particules.
- Les échantillons des points de mesures situés dans les lacs d'eau noire, alimentés localement par les eaux d'écoulement des sous-bassins forestiers (points de mesures A36, A40 et A33). Ils sont caractérisés par une granulométrie relativement grossière avec une fraction de sable supérieure à 24%, une fraction de limons de l'ordre de 60 à 70% et une fraction d'argile inférieure à 10% (cf. tableau 4.8.).
- Les échantillons des points de mesures situés dans des zones temporairement connectées au fleuve (points de mesures A24, A25 et A03 et A05). La granulométrie intermédiaire de ces échantillons témoigne du mélange des apports en eau et suspensions des sous-bassins forestiers et du fleuve dans ces lacs.

Les prélèvements de surface sur le canal Ai10 (cf. figure 4.1. pour la localisation du point de mesures) montre l'existence d'un gradient granulométrique longitudinal croissant le long du canal depuis le fleuve vers le lac d'inondation, avec une granulométrie des échantillons Ai10 et Ai10b proche de celle du fleuve à Obidos. Les apports hydrique et sédimentaire des bassins forestiers traversés par cet « igarapé » sont très probablement à l'origine de ce phénomène ; en effet, les sédiments de fond des lacs d'eau noire isolés du fleuve sont caractérisés par une fraction de sable importante de l'ordre de 30% (cf. points de mesures A40, A33 et A36, tableau 4.8.).

#### 5. Conclusion et perspectives

L'étude que mène le programme HyBAm sur la plaine d'inondation du bassin amazonien présente un intérêt certain à l'heure actuelle où l'Amazonie reste menacée par les activités humaines. L'étude hydrologique, sédimentaire et géochimique de la plaine d'inondation de Curuai pourrait permettre à long terme une gestion intégrée du bassin versant mais aussi le contrôle des ressources naturelles (essentiellement agricoles, élevage et pêche,dans cette région).

Pour ce qui est du travail réalisé lors de mon stage de fin d'étude, les objectifs spécifiques prévus initialement ont été atteints. Les résultats des analyses aux rayons X et au granulomètre laser témoignent de la complémentarité des méthodes utilisées pour la caractérisation des particules drainées par le fleuve et déposées dans la plaine. En ce qui concerne l'étude de la dynamique sédimentaire d'une plaine d'inondation, l'étude du modèle réservoir a permis de reproduire à l'échelle mensuelle la dynamique hydrologique et sédimentaire de la várzea pilote étudiée sur 3 années hydrologiques.

Les perspectives liées au modèle concernent en particulier l'amélioration des paramètres hydrologiques. Une meilleure prise en compte de l'évaporation en se basant sur les données de terrain est en effet envisageable. Une étude fine des processus de dépôt et remise en suspension par le vent dans les canaux reliant le fleuve aux lacs d'inondation permettrait une meilleure analyse des suivis décadaires de MES. La modélisation de l'effet de l'onde de marée dans les canaux en période de basses eaux permettrait également une meilleure estimation des flux sédimentaires sortant par le modèle. De nouvelles analyses au granulomètre laser et au diffractomètre d'échantillons recueillis à intervalles de temps réguliers sur un cycle de marée seraient alors utiles pour affiner la modélisation des flux solides sortant.

D'un point de vue plus personnel, l'expérience acquise lors de mon stage m'a permis de me familiariser avec les différentes étapes du travail de chercheur. La participation à une campagne de terrain et les mesures en laboratoire m'ont amené a être confronté aux aspects pratiques de la recherche et m'ont permis d'apprendre à intégrer les rapports humains dans mon travail. L'étude plus théorique sur le modèle sédimentaire m'a permis d'acquérir des réflexes d'autocritiques ainsi qu'un recul nécessaire, voire indispensable dans la recherche.

L'expérience d'un stage hors métropole est également une étape particuliè rement enrichissante, tant d'un point de vue personnel que professionnel. Ce stage m'a permis de découvrir et apprécier en particulier la culture brésilienne, riche et contrastée et de comprendre l'intérêt d'une coopération franco-brésilienne pour un développement durable et une optimisation de la gestion des ressources du pays.

Pour toutes ces raisons, ce projet de fin d'études a mûri mes connaissances tout en suscitant un fort enthousiasme pour une étude aux enjeux réels.

#### 6. Remerciements

Je tient à remercier particulièrement ma maître de stage Laurence Maurice-Bourgoin pour son accueil à Brasilia et son aide précieuse dans la réalisation de ce projet de fin d'étude, ainsi que Jean-Michel Martinez pour ses conseils et ses explications pour l'élaboration du modèle hydro-sédimentaire.

Je remercie l'ensemble du personnel de l'IRD, de l'ANA et de l'UFRJ que j'ai rencontré lors de mon stage et de la campagne de mesures pour leurs conseils, leur aide ainsi que leur accueil au sein de l'institut et du programme de recherche HyBAm.

Merci également à l'ensemble du personnel du laboratoire de géochimie de l'UnB, au personnel du laboratoire de Rayons X de l'UnB pour leur aide précieuse pour la caractérisation des argiles, aux chercheurs et étudiants de l'UFRJ qui m'ont accueillis pour l'étude granulométrique à Rio de Janeiro.

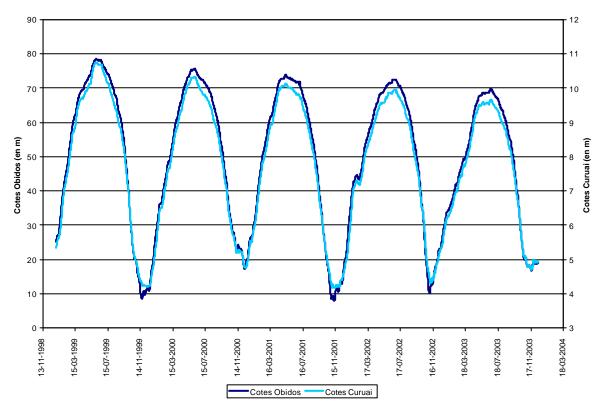
Un grand merci également à l'équipage du « Capitaine Dario » pour son accueil chaleureux lors de la campagne de terrain de mars 2004.

#### 7. Bibliographie

- Guyot J.L., Callède J., Cochonneau G., Filizola N., Guimarães V., Kosuth P., Molinier M., Oliveira E., Seyler F., Seyler P. 1999. Caractéristiques hydrologiques du bassin amazonien. *In* Hydrological and Geochemical Process in Large-scale River Basins, Manaus'99 Symposium, Manaus, 16-19 Nov. 1999.
- Molinier M., Guyot J.L., Oliveira E., Guimarães V., Chaves A. 1995. Hydrologie du bassin de l'Amazone, 335-344. *In* Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques, PEGI, Paris, Nov. 1993.
- Molinier M., Guyot J.L., Callède J., Guimarães V., Oliveira E., Filizola N. 1997. Hydrologie du bassin amazonien, 24-41. Environnement et développement en Amazonie brésilienne, Théry H. (ed.), Publ. Belin, Paris.
- Junk, W.J., Piedade, M.T.F., 1993. Biomass and primary production of herbaceous plant communities in the Amazon floodplain. *Hydrobiologia*, 263:155-162.
- Melack, J. M., 1984. Amazon floodplain lakes: Shape, fetch and stratification. *Verhandlungen International Vereinigen Limnologie*, 22: 1278 1282.
- Sippel, S.J., Hamilton, S.K. and Melak, J.M. 1992. Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon River floodplain, Brazil. Arch. Hydrobiol. 123:385-400.
- Mertes, L.A.K., Dunne, T. and Martinelli, L.A., 1996. Channel-floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon River, Brazil. Geol. Soc. of America Bull., 108: 1089-1107.
- Dunne, T, Mertes, L.A.K, Meade, R.H., Richey, J.E., Forsberg, B.R., 1998. Exchanges of sediment between the floodplain and channel of the Amazon River in Brazil. Geol. Soc. Of America Bull. 110:450-467.
- J.M. Martinez and T. Le Toan. Mapping of flood dynamics and vegetation spatial distribution in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. Soumis à Remote Sensing of Environment, 2004.
- Maurice-Bourgoin et al., 2001, 2002 et 2003 rapports de campagne de mesures HyBAm-Brésil sur la várzea do Lago Grande de Curuai.
- Maurice Bourgoin L., Grelaud J., Kosuth P., Martinez J.M., Oliveira E., 2004. Sedimentary dynamics monitoring of the Curuai varzea. In: 3<sup>rd</sup> Scientific Meeting of the LBA Experiment, Brasilia, Brazil.
- J.M. Martinez, P. Kosuth, G. Cochonneau, J.L Guyot, F. Seyler, L. Bourrel and L. Maurice-Bourgoin. Application of remote sensing data for the quantification of an Amazon floodplain extension, dynamic and river water storage. Proceedings of joint conference of European Geophysical Union and American Geophysical Union, Nice, France, 7-11 Avril 2003.
- Kosuth, P. 2002. Water and Sediment Dynamics in the Várzea of Lago Grande de Curuaí. *Second Scientific Conference LBA*, Manaus, July 2002.
- RADAMBRASIL (1976). Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais, 10 (Folha SA.21 Santarém). Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, 522 pp.

# **Annexe 1 -** Données hydrologiques de la várzea do lago grande de Curuai

#### 1. Hauteurs d'eau



**Figure A1.1.** Hauteurs d'eau dans la plaine d'inondation à Curuai comparées aux hauteurs d'eau de l'Amazone à Obidos

#### 2. Evapo-transpiration

Mois	Precipitations	E.P.
	mm	mm
janv	227	136
févr	226	115
mars	318	125
avr	259	121
mai	175	123
juin	94	120
juil	60	127
août	23	141
sept	39	144
oct	40	155
nov	73	150
déc	116	153
annee	1650	1610

**Tableau A1.1.** Evapo-transpiration potentielle calculée à Obidos (RADAMBRASIL, 1976)

#### 3. Précipitations mensuelles à Curuai et Juruti

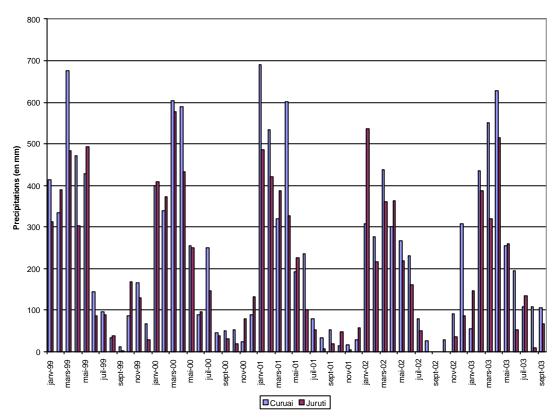


Figure A1.2. Précipitations mensuelles à Curuai et Juruti

#### 4. Cartes des lacs de la plaine d'inondation

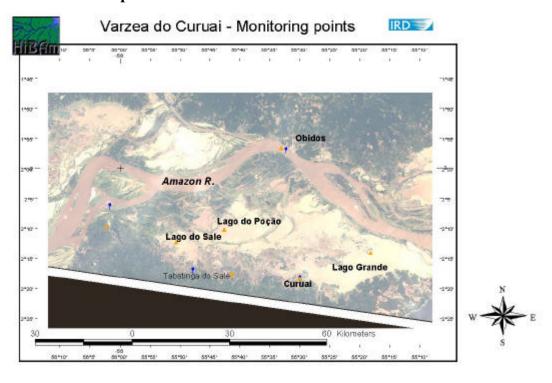


Figure A1.3. Carte des lacs de la « várzea » de Curuai

### Annexe 2 - Dynamique sédimentaire

# 1. Flux mensuels liquides calculés par le modèle réservoir pour les années hydrologiques 2001, 2002 et 2003

Annee	mois	Quantite entrante cumulee	Quantite sortante cumulee	Flux cumule	Bilan mensuel
		(km3)	(km3)	(km3)	(km3)
2000	nov-99	0,0700	-0,6521	-0,5821	
	déc-99	0,5736	-0,7029	-0,1293	0,4528
	janv-00	2,0614	-0,8356	1,2258	1,3551
	févr-00	3,2427	-1,2909	1,9518	0,7260
	mars-00	3,9293	-1,4099	2,5106	0,5677
	avr-00	4,8647	-1,6761	3,1886	0,6692
	mai-00	5,5262	-1,8771	3,6491	0,4605
	juin-00	5,6563	-2,8385	2,8179	-0,8312
	juil-00	5,6686	-3,9280	1,7407	-1,0772
	août-00	5,6839	-5,4005	0,2833	-1,4574
	sept-00	5,6839	-7,6404	-1,9566	-2,2399
	oct-00	5,7019	-9,7118	-4,0099	-2,0534
	nov-00	5,9704	-10,4324	-4,4620	-0,4521
2001	nov-00	0,2685	-0,7206	-0,4521	
	déc-00	1,2292	-1,3171	-0,0878	0,3642
	janv-01	2,3779	-1,5294	0,8484	0,9363
	févr-01	3,4334	-1,6433	1,8869	0,9416
	mars-01	4,8045	-1,7787	3,0258	1,2357
	avr-01	5,6179	-2,0100	3,6079	0,5821
	mai-01	5,7303	-2,6186	3,1117	-0,4962
	juin-01	5,7982	-3,1301	2,6680	-0,4437
	juil-01	5,8321	-4,6337	1,1985	-1,4696
	août-01	5,8321	-6,6445	-0,8123	-2,0108
	sept-01	5,8321	-9,3580	-3,5259	-2,7135
	oct-01	5,8321	-10,8517	-5,0196	-1,4937
	nov-01	6,2730	-11,0840	-4,8109	0,2087
2002		0.4444	0.4000	0.0405	
2002	nov-01	0,4411	-0,1986	0,2425	1 0027
	déc-01	1,5379	-0,2917	1,2462	1,0037
	janv-02	3,5325	-0,2955	3,2370	1,9908
	févr-02	4,5052	-0,7409	3,8122	0,5273
	mars-02	5,2540	-0,8248	4,3872	0,6649
	avr-02	6,1806	-0,9105	5,2702	0,8410
	mai-02	6,8245	-1,3104	5,5141	0,2440
	juin-02	7,2743	-1,8160	5,4583	-0,0558
	juil-02	7,3472	-2,8158	4,5314	-0,9269
	août-02	7,3637	-4,4757	2,8879	-1,6435
	sept-02	7,3637	-6,7456	0,6180	-2,2699
	oct-02	7,3637	-9,4365	-2,0728	-2,6908
	nov-02	8,2679	-9,7827	-1,5148	0,5580

Rapport de stage de fin d'études – Julien Grélaud (ENSEEIHT – Toulouse, IRD – Brésil)

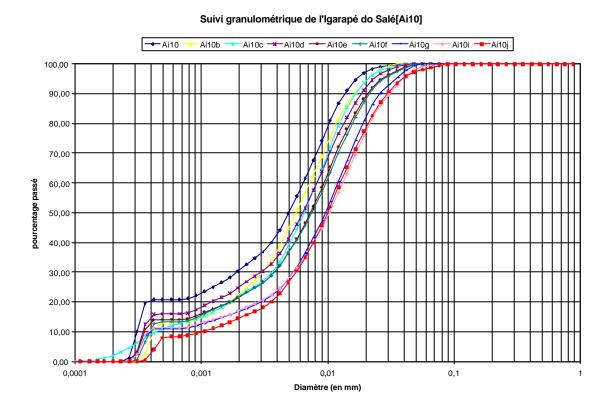
Annee	mois	Quantite entrante cumulee	Quantite sortante cumulee	Flux cumule	Bilan mensuel
		(km3)	km3) (km3) (km3		(km3)
2003	nov-02	0,8771	-0,4170	0,4601	
	déc-02	2,1609	-0,4469	1,7140	1,2539
	janv-03	3,1411	-0,5097	2,6314	0,9173
	févr-03	3,6971	-0,8487	2,8585	0,2171
	mars-03	4,5575	-1,1284	3,3509	0,5807
	avr-03	5,4884	-1,3584	4,1300	0,7009
	mai-03	5,8631	-1,7169	4,1462	0,0161
	juin-03	6,2425	-2,1535	4,0891	-0,0571
	juil-03	6,3051	-3,2018	3,1034	-0,9857
	août-03	6,3340	-4,4221	1,9119	-1,1915
	sept-03	6,3340	-6,8835	-0,5495	-2,4614
	oct-03	6,4422	-8,9440	-2,5017	-1,9522
	nov-03	7,0287	-9,3485	-2,3198	0,1819

### Annexe 3 – Caractérisation sédimentaire

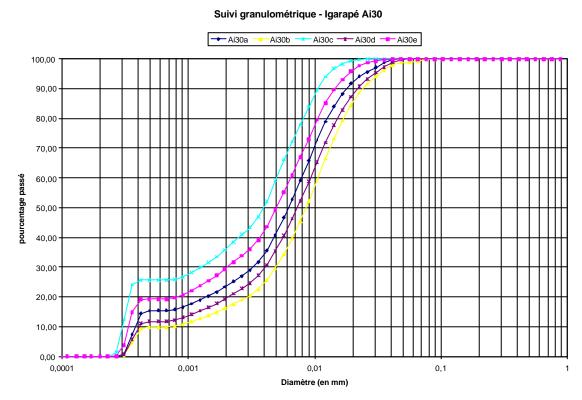
# 1. Concentrations en MES de la campagne de mesures de mars 2004 sur la várzea du Lago Grande de Curuai

		RZEA OBIDOS - MARS			Varzea de Curu					MES	AC		
Rio	drologie - sedi Code	imento : Jose Octavio P.(	Lat.	) + Marie Pau Long.	Date	Heure	-IRD) + <b>T</b>	Cond.	o (ANA) + E pH	P0 (vierge)	P1 (sec)	Vol. Tot. fi	MES
KIO	Code	Lieu	Lat.	Long.	Date	neure	<del></del>	Cona.	labo ou in	ru (vierge)	FT (SEC)	VOI. 10t. 11	IVIES
						Locale	l⊸c	ւS/cm	situ	mg	mg	l .	mg/l
Amazonas	Parintins	Parintins-750ME	-2.62661	-56.75685	14-mars-04	16:30	29.3	71	6.11	80,41	92.04	0.25	46.52
Amazonas	Parintins	Parintins-1500ME	-2,62661	-56,75685	14-mars-04	16:30	29,3	71	6,11	80,49	96,46	0.25	63,88
Amazonas	Parintins	Parintins-2250ME	-2,62661	-56,75685	14-mars-04	16:30	29,3	71	6,11	84,21	96,4	0,25	48,76
Amazonas	Am Av	Aval varzea Curuai	-2,22737	-55,18003	19-mars-04	16:00	28,8	62	6,11	79.23	115,54	0,25	145,24
Amazonas		Obidos gg km amont ville	-1,91586	-55,54414	17-mars-04	11:30	29.6	63					
Amazonas	17050000 A	Obidos 25% RD			17-mars-04	11:30	28.8	68		82.61	104.33	0.204	106.47
		Obidos 50% Obidos 75% RD			17-mars-04 17-mars-04	-	28,8 28,8	68 68		82,62 82,8	102,29 101,58	0,206 0,208	95,49 90,29
Varzea Curuai	A01bis	Foz Sud	-2.23447	-55.18003	19-mars-04	14:40		60		81.57	92.36	0,208	53.95
Vai Zea Gui dai	A01DIS	Lago Grande de Curuai	-2,20080	-55,21780	10-mars-04	14:00	30.5	55	6,48	81.72	93.14	0,2	57,10
	A03bis	Lago Grande de Curuai	-2,23303	-55,27728	19-mars-04	12:30	30,1	53	6,40	81,73	93,85	0,2	60,60
	A05	Lago Grande de Curuai	-2.25050	-55,35120	19-mars-04	12:30	30,1	53	6,40	81,36	95,1	0.2	68,70
	A05ter	Lago Grande de Curuai	-2,26066	-55,41217	19-mars-04	12:00	29,7	39		81,46	102,22	0,2	103,80
	A06bis A08	Lago Grande de Curuai Lago da Vermelha (Gran	-2,11710	-55,46770	18-mars-04	10:00	29.9	56	6,50	80,13 87.05	96,92 108,61	0,25 0,25	67,16 86,24
	A09	Lago da Vermelha (Gran	-2,11710	-55,41740	18-mars-04	09:30	29.7	56	6,30	80,57	102,08	- 1	86.04
	A10	Lago Garvernicina (Gran	-2,10030	-55,50060	18-mars-04	09:00	30	63	6.50	80.34	98.41	0.25	72.28
	A11	Lago Santa Ana	-2,05020	-57,48400						80,42	97,65	0,25	68,92
<u> </u>	A11 BIS	Lago Santa Ana	-2,08360	-55,51730	18-mars-04	12:45	31.6	66	6.52	80.53	97,43	0,25	67,60
	A14bic	Ig. Cativo (Grande)	-2,17530	-55,54220	18-mars-04	11:00	30,2 19:12	54 57	6,50	80,41	105,23	0,25 0,25	99,28
	A14bis A15	Lago do Inferno (Grande Mari Mari (Grande)	-2,12572 -2,15010	-55,54398 -55,56750	18-mars-04 18-mars-04	12:00 11:30	19:12 30.4	57 49	6,50 6,50	87,79 80.63	114 104-95	0,25	104,84 97,28
	A21	Lago do Salé	-2,15010 -2,15840	-55.85050	15-mars-04	10:00	30.4	55 55	6.06	77.08	88.93	0.2	59,25
		Lago do Poção	-2,13360	-55,70060	16-mars-04	14:40	31,9	56,7	7,03	78,85	134,6	0,25	223,00
	A25-A	Lago do Poção	-2,05755	-55,67877	16-mars-04	13:21	31.8	62		78,77	127,27	0,25	194,00
	A25-B	Lago do Poção	-2,09086	-55,66192	16-mars-04	14:15	31,8	60		78,46	135,66	0,25	228,80
	A25-C A26	Lago do Poção	-2.09554	-55.65875	16-mars-04	14:24	31,5	60	0.47	78,53	134.28	0.25	223,00
	A26SOR	Lago Pirapitinga Sortie Lago Pirapitinga v	-2,06683 -2,08356	-55,66712 -55,63980	16-mars-04 16-mars-04	10:30 15:20	30,9 31,6	60,4 53	6,47 6,36	82,73 78,59	136,29 111,54	0,25 0,182	214,24 181,04
	A33	Lago Curumucuri	-2,12580	-56,01740	15-mars-04	09:20	30.3	23,7	5.92	78,41	83,53	0.75	6,83
	A36	Lago Acai	-1,94830	-55,58530	17-mars-04	12:30	31,4	47		87,55	92,38	0,25	19,32
	A39 BIS	Lago Miua	-2,06207	-55.63390	16-mars-04	16:10	31,9	87	6,30	82.67	90.9	0.222	37,07
	A40 BIS	Curuai	-2,24815	-55,51742	19-mars-04	10:45	29,9	33	6,14	81,65	92,96	0,2	56,55
	Al10-entree Al10-B	Igarapé do Salé em Pon Igarapé do Salé	-2,07506 -2,10369	-56,00652 -56,00667	15-mars-04 15-mars-04	15:15 13:30	29,3 29,7	65 60		87,4 81,7	111,97 96,7	0,25 0,25	98,28 60,00
	Al10-B	Igarapé do Salé	-2,10503	-55,98875	15-mars-04	12:44	29,7	62		81,92	99,54	0,25	70,48
	Al10-D	Igarapé do Salé	-2,11397	-55,97897	15-mars-04	12:26	29,8	62		81,83	96,22	0,25	57,56
	Al10-E	Igarapé do Salé	-2,12633	-55,97427	15-mars-04	12:10	29,5	63		81,99	95,92	0,25	55,72
	Al10-F	Igarapé do Salé	-2,12897	-55,95613	15-mars-04	11:46	29,6	63		86,34	98,36	0,25	48,08
	Al10-G Al10-H	Igarapé do Salé Igarapé do Salé	-2,12591 -2,13719	-55,93533 -55,92106	15-mars-04 15-mars-04	11:20 10:55	29,2 29,1	64 64		85,87 87,55	97,03 103,56	0,25 0,25	44,64 64,04
	Al10-li	Igarapé do Salé	-2,13719	-55,90336	15-mars-04	10:35	29,1	64		79,14	92.92	0.25	55,12
	Al10-J	Igarape do Salé	-2,15247	-56,88819	15-mars-04	10:03	28.8	64		78,97	91,73	0,25	51,04
		Igarape Curumucuri	-2,10468	-56,01176	15-mars-04	13:45	31,1	45		81,82	84,87	0,25	12,20
	AI18		-2,14413	-55,89695						86,1	107,04		83,76
	Al20bis	languagé da lt	-2.15240	-55.88740	10 21	<b>—</b>	20.4	<u> </u>		85.78	98.93	0.25	52.60
	Al20bis Al30-A	Igarapé de Irateua Igarapé Muratuba	-2.05848	-55,68219	16-mars-04 16-mars-04	<b>-</b>	29,1 30	64 65		82,93 83,04	103,87 106,54	0,25 0,25	83,76 94,00
	Al30-A	Igarapé Muratuba	-2,05040	-55,69240	16-mars-04		29,7	65		83,11	105,34	0,25	87,60
	Al30-C	Igarapé Muratuba	-2,04202	-55,70138	16-mars-04		29,5	65		83,13	107,52	0,25	97,56
<u> </u>	Al30-D	Igarapé Muratuba	-2,03858	-55,71031	16-mars-04		29,4	65		82.82	108.2	0.25	101,52
	AI30-E	Igarapé Muratuba	0.0005	FF 1005	16-mars-04	00.00	29,1	64		82,87	110,22	0,25	109,40
	AI70 AI70-A	Ig. St. Ninha Ig. St. Ninha	-2,03995 -2,04575	-55,42867 -55,43240	18-mars-04 18-mars-04	08:00	28,7 28,7	65 62		87,23 80,06	108,6 108,97	0,25 0,25	85,48 115,64
	AI70-A AI70-B	lg. St. Ninha	-2,04575 -2,05129	-55,43240 -55,43921	18-mars-04		28,7	60		80,06	108,97	0,25	91,84
	AI70-C	lg. St. Ninha	-2.05018	-55.44956	18-mars-04		28.7	61		80.41	104.68		97.08
	AI79	Ig. St. Ninha	-2,05347	-55,45289	18-mars-04		28,7	61		86,12	113,51	0,25	109,56
<u> </u>	A180	Boca Foz Norte	-2,23620	-55,07170	19-mars-04	11:30				76,61	96,59	0,2	99,90
<u> </u>	AI80 AI80	Boca Foz Norte	-2,23620 -2,23620	-55,07170 -55,07170	19-mars-04 19-mars-04	12:25 12:50	29,4 29,8	67 68		81,68 81,92	108,74 108,02	0,2 0,2	135,30 130,50
	A180 A180	Boca Foz Norte Boca Foz Norte	-2,23620 -2,23620	-55,07170 -55,07170	19-mars-04 19-mars-04	12:50	29.8	68 68		81,92 81,93	108,02	0,2	130,50
	AI80	Boca Foz Norte	-2,23620	-55,07170	19-mars-04	15:01	29.0	67		76,23	105,24	0,2	145,05
	AI80	Boca Foz Norte	-2,23620	-55,07170	19-mars-04	15:58	29,4	67		76,51	98,86	0,2	111,75
	Al80	Boca Foz Norte	-2,23620	-55,07170	19-mars-04	16:48	29			81,72	89,81	0,2	40,45
	AI90	Boca Foz Sul	-2,24240	-55,06630	19-mars-04	17:25				79,18	98,29	0,25	76,44
	AT20	Igarapé Piraquara	-2,25870	-55,67020	16-mars-04	14:00	27,5	8	4,3	81,09	82,62	0,378	4,05

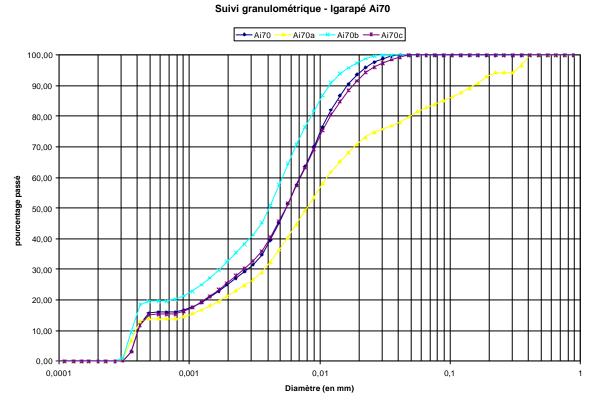
## 2. Courbes granulométriques dans les canaux Ai10 et Ai70 reliant le fleuve à la plaine d'inondation de Curuai



**Figure A3.1.** Courbes granulométriques le long du canal Ai10 reliant le fleuve à la plaine d'inondation de Curuai (point Ai10 : entrée du canal au niveau du fleuve ; point Ai10j : sortie du canal sur la plaine d'inondation)



**Figure A3.2.** Courbes granulométriques le long du canal Ai30 reliant le fleuve à la plaine d'inondation de Curuai (point Ai30a : entrée du canal au niveau du fleuve ; point Ai30e : sortie du canal sur la plaine d'inondation)



**Figure A3.3.** Courbes granulométriques le long du canal Ai70 reliant le fleuve à la plaine d'inondation de Curuai (point Ai70 : entrée du canal au niveau du fleuve ; point Ai70c : sortie du canal sur la plaine d'inondation)

# **Annexe 4 -** Classification des minéraux présents dans les échantillons<sup>2</sup>

#### 1. Quartz

<u>Classe</u>: Tectosilicates

Système cristallin : Rhomboédrique

Formule: SiO2

<u>Minéraux associés</u>: Galène, Pyrite, Sphalérite, Barytine, Biotite, Fluorine, Microcline, Muscovite <u>Forme</u>: cristaux prismatiques allongés, terminés par une pyramide hexagonale, également en masses

compactes

<u>Clivages</u>: inexistant <u>Classe</u>: Tectosilicates

<u>Fréquence</u>: le plus abondant des minéraux dans la croûte terrestre

Gisements : minéral ubiquiste : la majorité des roches éruptives, sédimentaires et métamorphiques,

pegmatites, filons hydrothermaux etc.

#### 2. Kaolinite

**Classe**: Phyllosilicates

Système cristallin : Triclinique Formule : Al2Si2O5(OH)4

<u>Minéraux associés</u>: très nombreux silicates, et fréquemment des oxydes de fer <u>Liste des minéraux associés</u>: Dickite, Halloysite, Illite, Muscovite, Quartz

<u>Forme</u> : en masses et en agrégats toujours cryptocristallins, cristaux très rares et toujours minuscules

<u>Clivages</u>: pas discernable <u>Classe</u>: Phyllosilicates

Fréquence : minéral très fréquent

<u>Utilisation</u>: très nombreuses: céramique, industrie du caoutchouc, industrie chimique (matières

échangeuses d'ions, saponifiants, dégraissants) etc.

Gisements : dans de nombreuses roches : provient de l'altération hydrothermale ou atmosphérique des

silicates d'aluminium, notamment les feldspaths

#### 3. Illite

<u>Classe</u>: Phyllosilicates

Système cristallin : Monoclinique

Formule : (K,H3O)Al2(Si3Al)O10(H2O,OH)2

Minéraux associés : Kaolinite, Montmorillonite, Muscovite, Quartz

Forme : en masses toujours cryptocristallines

<u>Clivages</u>: facile et parfait <u>Classe</u>: Phyllosilicates

<u>Fréquence</u>: minéral très fréquent

Gisements : dans de nombreuses roches : provient de l'altération hydrothermale ou atmosphérique des

silicates d'aluminium, notamment les feldspaths, constituant important des roches argileuses

#### 4. Montmorillonite

<u>Classe</u>: Phyllosilicates

Système cristallin : Monoclinique

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Source : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – Site Web : <a href="http://www.brgm.fr">http://www.brgm.fr</a>

<u>Formule</u>: (Na,Ca)0.3(Al,Mg)2Si4O10(OH)2.nH2O <u>Minéraux associés</u>: Illite, Kaolinite, Muscovite, Quartz

Forme : en masses toujours cryptocristallines

<u>Clivages</u> : parfait <u>Classe</u> : Phyllosilicates

Fréquence : minéral très fréquent

Gisements : provient de l'altération atmosphérique des roches éruptives basiques, constituant

important de certaines roches argileuses

#### 5. Anatase

<u>Classe</u>: Oxydes

Système cristallin : Quadratique

Formule: TiO2

Minéraux associés : Hématite, Ilménite, Rutile, Adulaire, Brookite, Chlorite

Forme : cristaux aplatis ou octaèdres quadratiques allongés

<u>Clivages</u>: parfaits <u>Classe</u>: Oxydes

Fréquence : minéral très fréquent

Gisements: fissures des roches métamorphiques, filons hydrothermaux, alluvions

### **Annexe 5** – Photos



Photo A5.1. Participants de la campagne de mesures HyBAm de mars 2004. Manaus-Manacapuru-Santarém. De gauche à droite, en haut, Otávio (UFRJ), Bosco (CPRM), Elias (équipage), Beto (équipage), Marcelo (ANA), Marcela (UFF), Marcelo (UFF), Patricia (IRD/UFF), Marie (LMTG/IRD), Michel (IRD), Marco (CPRM); en dessous, Julien (IRD), Graça (équipage), Sérgio (équipage), Eugênio (équipage), ), Maurrem (ANA) et Eurides (ANA).



**PhotoA5.2.** Prélèvement d'eau pour analyses des MES dans un « igarapé » de la várzea de Curuai pendant la campagne de mesures HyBAm de mars 2004



Photo A5.3. Le « Capitaine Dario » lors de la campagne de mesures HyBAm de mars 2004



Photo A5.4. Coucher de soleil sur le Lago Grande de la várzea de Curuai.