

Géodynamique Actuelle des Grands Bassins Fluviaux Tropicaux

“ Présentation détaillée du projet scientifique ”

Jean Loup Guyot avec la collaboration de :

Alain Laraque, Frédérique Seyler, Gérard Cochonneau, Jean Claude Olivry, Josyane Ronchail,
Laurence Maurice-Bourgoin, Luc Bourrel, Michel Molinier, Pascal Kosuth, Patricia Moreira
Turcq, Patrick Seyler & Philippe Magat.

Sommaire

1. Intérêt scientifique	p. 2
1.1. Introduction	p. 2
1.2. Contexte scientifique et pertinence de la thématique de recherche	p. 2
1.3. Objectifs scientifiques	p. 3
2. Etats des connaissances dans le Bassin Amazonien. Résultats acquis par l'équipe proposante et les lacunes actuelles	p. 4
2.1. Dynamique hydrologique	p. 4
2.2. Processus d'érosion et transfert sédimentaire	p. 6
2.3. Processus d'altération et transferts géochimiques	p. 7
2.3.1. Etude des apports élémentaires des rivières andines	p. 8
2.3.2. Etude du transfert des éléments traces en solution et en suspension	p. 9
2.3.3. La problématique du mercure en Amazonie	p. 10
2.3.4. Evolution temporelle des concentrations à Obidos	p. 11
3. Actions de recherche	p. 12
3.1. Action 1 : Dynamique hydrologique et forçage climatique	p. 12
3.1.1 Calage altimétrique du réseau hydrométrique	p. 12
3.1.2. Dynamique des zones humides : les várzeas	p. 13
3.1.3. Spatialisation de l'humidité des sols	p. 14
3.1.4. Forçage climatique	p. 15
3.2. Action 2 : Erosion / altération, et exportation de matières des bassins andins	p. 16
3.2.1. Mesure de l'érosion actuelle par les bilans aux stations hydrologiques	p. 16
3.2.2. Estimation du taux d'érosion à long terme en utilisant la mesure de ^{10}Be in situ	p. 17
3.3. Action 3 : Transfert et piégeage sédimentaire dans la plaine amazonienne	p. 18
3.3.1. Bilan de la sédimentation par mesure des flux aux stations hydrologiques	p. 19
3.3.2. Estimation de la sédimentation actuelle à l'aide de ^{210}Pb et ^{137}Cs	p. 20
3.3.3. Utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'évaluation du piégeage sédimentaire	p. 21
3.3.4. Comparaison avec les taux de sédimentation dans les bassins subandins	p. 22
3.4. Action 4 : Transfert des éléments dissous et rôle des várzeas	p. 22
3.4.1. Caractérisation physico-chimique des eaux	p. 23
3.4.2. Distribution des éléments dans les phases dissoute, colloïdale et particulaire	p. 24
3.4.3. Distribution des éléments dans les sédiments et taux de sédimentation	p. 25
3.4.4. Bilan de masse des éléments majeurs et traces dans les várzeas étudiées	p. 25
3.5. Action 5 : Modélisation globale distribuée	p. 26
3.5.1. Modélisation hydrologique	p. 26
3.5.2. Modélisation hydrodynamique	p. 27
3.5.3. Modélisation sédimentologique	p. 28
4 Les partenariats et l'insertion du projet	p. 30
4.1. Les collaborations avec d'autres unités de recherche et de service de l'IRD	p. 30
4.2. Les programmes inter organismes français	p. 30
4.3. Les programmes binationaux franco-brésilien	p. 31
4.4. Les programmes internationaux	p. 31
5. Références bibliographiques citées	p. 32
6. Figures	p. 43

1. INTERET SCIENTIFIQUE

1.1 INTRODUCTION

Les mécanismes de transfert jouent à toutes les échelles, de celle du cristal à celle du continent. Mais c'est par l'intermédiaire des fleuves que les transferts de matière à la surface de la terre se font principalement [Martin et Meybeck, 1979; Milliman et Meade, 1983]. L'UR GBFT « *Géodynamique actuelle des Grands Bassins Fluviaux Tropicaux* » se positionne explicitement sur les bassins versants de grande taille, de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions de km², de la zone intertropicale.

Cette unité de recherche se propose :

- ↳ d'étudier à l'échelle des grands bassins versants tropicaux les processus qui contrôlent les transferts d'eau et de matières et leur variabilité temporelle,
- ↳ de formaliser et de quantifier de manière spatialisée les processus mis en jeu afin,
- ↳ de réaliser un modèle de fonctionnement actuel de ces bassins.

1.2 CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET PERTINENCE DE LA THEMATIQUE DE RECHERCHE

1.2.1. Contexte scientifique

Depuis les travaux de Schumm sur les flux sédimentaires [1977], le bassin versant est décomposé schématiquement en une zone de production (les reliefs), une zone de transfert (les rivières et les fleuves), et enfin une zone de sédimentation (les deltas et les estuaires). Il s'agit en fait d'une zonalité à processus dominants pour une échelle de temps et d'espace, car des phénomènes de sédimentation peuvent être observés dans les zones de production et de transfert, alors que des phénomènes érosifs sont fréquemment observés dans les zones de transfert et de sédimentation (érosion des berges par exemple).

Dans le cas des grands bassins fluviaux, la zone de production est généralement d'extension géographique limitée (reliefs de chaîne active en bordure et à l'amont du bassin), et les zones de transfert et de sédimentation largement confondues et imbriquées, apparaissent sur de vastes bassins sédimentaires, souvent subsidents, et développés sur les plus vieux cratons du globe. Au cours du cycle hydrologique annuel, une dynamique transversale s'installe entre le fleuve et les zones d'inondation interconnectées à celui-ci (flux bidirectionnels) qui va contrôler l'équilibre spatial et temporel des processus de transfert et de sédimentation [Amoros et Petts, 1993]. Dans le bassin amazonien, ces zones humides - *les várzeas* - s'étendent sur plus de 300 000 km² [Melack, 1984] et sont le lieu d'une forte productivité biologique [Junk et al., 1989].

Le relief et le climat sont donc les deux moteurs de la dynamique de transfert à la surface de la terre, et les plus forts taux d'érosion sont ainsi observés dans les bassins des chaînes de montagnes actives de la ceinture tropicale [Pinet et Souriau, 1988 ; Milliman et Syvitzki, 1992 ; Summerfield et Hulton, 1994]. Par ailleurs, il existe un certain équilibre interactif entre les contrôles tectonique et climatique de l'érosion, du fait des réajustements isostatiques des chaînes de montagne [Masek et al., 1994]. Le transfert sédimentaire (transport/sédimentation) dans les plaines d'inondation des grands bassins fluviaux est également conditionné par les mouvements structuraux récents [Dumont, 1994 ; Mertes et al., 1996 ; Dunne et al., 1998] et la dynamique hydrologique actuelle [Meade et al., 1985 ; Laraque et Olivry, 1996 ; Olivry et al., 1995 ; Bricquet et al., 1997].

Les grands bassins fluviaux tropicaux représentent 25% de la surface des continents émergés et accueillent plus de 50 % de la population du globe. Par les volumes qu'ils représentent (57% de l'eau douce, 50% des apports solides, 38% des apports en solution), les grands fleuves tropicaux contribuent largement au fonctionnement global de la planète [Baumgartner et Reichel, 1975 ; Stallard, 1988 ; Degens et al., 1991]. Du fait même de l'étendue géographique de leur bassin de drainage, les grands

fleuves tropicaux sont sensiblement affectés par le forçage climatique de type ENSO [Richey et al., 1989 ; Amarasekera et al., 1997 ; Uvo, 1998]. Aujourd'hui, ces grands bassins sont soumis à une forte pression anthropique : déforestation, activités agricoles et minières, urbanisation [Trimble, 1977, Sternberg, 1995]. Ces activités se traduisent par une altération de l'état de la couverture pédologique et forestière, qui induit une modification du régime climatique [Shukla et al., 1990], dont les effets conjugués (climat et couverture) influent sur les processus de transfert dans les bassins.

Pour la problématique générale de l'étude des mécanismes de transferts, les grands fleuves offrent un certain nombre d'avantages :

- i) L'étude d'un bassin versant permet d'établir des bilans (bilan de masse, bilan d'énergie, etc.). C'est l'une des clés pour avancer dans la compréhension des processus d'érosion / altération, et en particulier pour quantifier le rôle de l'érosion sur le cycle du CO₂ [Berner, 1995 ; Stallard, 1995a ; Stallard, 1995b, France-Lanord et al., 1998, Gaillardet et al, 1999].
- ii) Il existe dans les grands bassins fluviaux une consistance interne, tant pour l'enchaînement des processus érosion - transport - sédimentation, qu'à cause de leur pouvoir de lissage de la diversité lithologique de la croûte superficielle. Le caractère intégrateur des grands bassins limite les effets d'événements singuliers, dits catastrophiques. Si l'on veut fournir des éléments de réponse aux déterminismes climatique et tectonique des mécanismes d'altération, c'est uniquement à l'échelle de ces objets d'étude [Meybeck, 1994 ; Stallard et al, 1991].
- iii) La comparaison des sous bassins d'un même ensemble permet d'isoler l'effet d'un paramètre (par exemple l'altitude moyenne ou la lithologie) et de quantifier sa contribution au mécanisme de transfert [Drever, 1994 ; Edmond et al., 1995 ; White et Blum, 1995 ; Gaillardet et al, 1997].

1.2.2. Pertinence

“ Les dernières décennies ont montré qu'il était urgent de développer, en le structurant, notre effort de recherche sur la compréhension du fonctionnement de la surface de notre planète. La morphologie de la surface de la terre est façonnée par la dynamique interne (eustatisme, tectonique, volcanisme et érosion chimique des sols) et externe (érosion mécanique et sédimentation) de la planète, qui dépendent de nombreux facteurs : nature et évolution des climats et des couvertures végétales, lithologie. Les rôles respectifs de ces différents facteurs sur ces dynamiques internes et externes ne sont pas encore élucidés et la part anthropique est mal connue. ” Extrait de l'appel d'offre 1999 du Programme National de recherche Sols et Érosion (PNSE).

1.3 OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

L'objectif principal auquel l'UR GBFT attend apporter sa contribution est le suivant :

Quels sont les processus hydrologiques et géochimiques qui, à l'échelle d'un grand bassin sont déterminants dans la compréhension du système et pertinents pour la réalisation, in fine, d'un modèle – quantitatif et régionalisé - de fonctionnement géodynamique actuel d'un grand système fluvial?

Au cours de la période 2000-2003, l'UR GBFT portera son attention sur le seul bassin amazonien. Ce choix est la conséquence de : i) un investissement de longue date de nombreux chercheurs de l'UR dans les bassins amazoniens de Bolivie et du Brésil [programmes PHICAB, BIOBAB, HIBAM], ii) d'un partenariat sud-américain identifié et compétent, et iii) de l'orientation de la politique de recherche française, le Brésil et l'Amazonie ayant été définie comme des sujets prioritaires par notre Ministère de tutelle.

De manière synthétique le projet se propose :

1. D'étudier la dynamique hydrologique (variabilité saisonnière et inter annuelle) et l'impact de la variabilité climatique (forçage climatique type ENSO) sur les débits liquides et les flux - dissous et particulaires - de l'Amazone et de ses principaux tributaires,
2. De quantifier les taux d'érosion / altération des bassins andins de l'Amazone à l'aide d'approches méthodologiques indépendantes,
3. D'établir des bilans de transfert de matière / sédimentation dans la plaine amazonienne, et en particulier de: montrer i) le rôle des zones d'inondation (várzeas), et ii) l'impact de la géodynamique des arcs tectoniques sur ces transferts,
4. D'étudier le rôle des zones d'inondation (várzeas) sur le bilan de transferts géochimiques (dissous et particulaires) et en particulier de quantifier les échanges solide / liquide pour les éléments traces à formes redox et du mercure (scavenging, méthylation, remise en solution),
5. De coupler les données caractéristiques du bilan hydrique (pluie, débit, évapotranspiration, coefficient d'écoulement) et des bilans de transferts de matière avec le système d'information géographique en cours de montage (relief, géologie, sols, végétation) afin de déterminer quels sont les facteurs explicatifs.

Cette démarche intégrée doit contribuer à l'établissement d'un modèle de simulation du fonctionnement actuel du bassin Amazonien. Un tel modèle permettrait de rendre compte de l'évolution récente du bassin (variabilité climatique, déforestation / agriculture), mais encore d'évaluer son fonctionnement à long terme (élévation du niveau océanique par ex.).

2. ÉTATS DES CONNAISSANCES DANS LE BASSIN AMAZONIEN. RESULTATS ACQUIS PAR L'ÉQUIPE PROPOSANTE (PROGRAMMES GRHRA, HIBAM ET PHICAB) ET LACUNES ACTUELLES

2.1. DYNAMIQUE HYDROLOGIQUE

Le Bassin Amazonien est le plus grand bassin hydrographique continental avec une superficie de $6.11 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. Situé en zone intertropicale, il reçoit des précipitations moyenne de 2460 mm.an^{-1} , et le débit moyen ainsi produit par ce fleuve géant est estimé à $209\,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à l'embouchure de l'océan atlantique [Molinier et al., 1997]. Une des particularités du fleuve Amazone réside dans la partie montagneuse de son bassin : la chaîne andine de Bolivie, du Pérou et d'Équateur, bien qu'elle ne représente qu'un peu plus de 10% de la superficie totale du bassin (Figure 1). Cette chaîne constitue une barrière à l'Ouest du bassin sur laquelle viennent buter les masses d'air chaud et humide d'origine atlantique, et les maximums pluviométriques du bassin amazonien sont enregistrés sur les premiers reliefs du bassin du Rio Negro, et à proximité des piedmonts andins [Salati et Marques., 1984 ; Roche et al., 1990]. Dans les Andes et leur piedmont, les hydrogrammes à multiples crues se fondent vers l'aval pour donner naissance à la grande crue annuelle de type tropical, de moins en moins dentelée de l'amont vers l'aval des grands fleuves [Bourges et Hoorelbeke, 1995].

En plaine amazonienne, les apports combinés des tributaires méridionaux et septentrionaux, aux régimes différents, associés à l'effet régulateur des zones d'inondations, génèrent à l'aval de Manaus, un hydrogramme à crue unique et étalée d'avril à juillet [Molinier et al., 1996]. Le bassin amazonien est affecté par les accidents climatiques de type ENSO (El Niño South Oscillation) qui entraînent une baisse importante des précipitations [Kousky et al., 1984 ; Aceituno, 1988 ; Rao et Hada, 1990]. L'impact de cette variabilité climatique sur l'hydrologie du fleuve Amazone et de ses principaux tributaires a été étudiée par divers auteurs [Marengo et Hastenrath, 1993 ; Marengo, 1995], mais leurs résultats sont en partie invalidés par la non prise en compte des phénomènes de barrage hydraulique le long du cours principal de l'Amazone [Meade et al., 1991].

Bien que l'Amazone soit le plus important fleuve de la planète, l'étude hydrologique de ce fleuve gigantesque n'a débuté que récemment. Les premières observations de son fonctionnement

hydrologique sont dues à Lecointe [1903, 1935] et Pardé [1936, 1954] qui décrivent le régime saisonnier à partir des hauteurs d'eau du service brésilien de la navigation. Ces résultats restent qualitatifs du fait de l'absence de mesures de débits fiables. En 1963, les hydrologues de l'USGS réalisent les premiers jaugeages de l'Amazone par exploration du champ de vitesses au moulinet [Oltman et al., 1964 ; Oltman, 1968]. Dans les années 1970, le DNAEE (Département National brésilien des Eaux et de l'Énergie Électrique) installe un vaste réseau de plus de 200 stations hydrométriques avec jaugeages réguliers (4 par an). Aujourd'hui, 339 stations pluviométriques et 246 stations hydrométriques (Figure 2) sont opérationnelles en Amazonie brésilienne [Oliveira et al., 1993 ; Guimarães, 1996]. A partir de 1982, des équipes d'hydrologues de l'ORSTOM s'implantent au Brésil et en Bolivie, au sein de l'UR « Géodynamique de l'Hydrosphère Continentale ».

Au Brésil, les hydrologues du programme **GRHRA** (Gestion des Ressources Hydriques de la Région Amazonienne, CNPq – DNAEE – ORSTOM, 1982-1993) développent des outils informatiques pour la critique et l'homogénéisation des séries chronologiques hydroclimatiques [Hiez et Rancan, 1983 ; Hiez et al., 1987, 1992], des techniques de jaugeages des grands fleuves [Jacon, 1987 ; Jaccon et Cudo, 1987], des modes d'étalonnage pour les stations non univoques [Guimarães et Jaccon, 1983 ; Jaccon et Guimarães, 1985 ; Jaccon et Cudo, 1987], et installent un réseau de télétransmission satellitaire de données hydrologiques – le premier opérationnel en Amérique du Sud [Callède et al., 1986 ; Callède et Claudino, 1987 ; Guimarães et al., 1993]. Les résultats obtenus par cette équipe permettent de i) dresser la première carte isohyète fiable de bassin amazonien du Brésil [DNAEE – ORSTOM, 1993], ii) établir un premier bilan hydrologique des principaux tributaires du bassin [DNAEE – ORSTOM, 1992, 1994], et iii) évaluer précisément les apports hydriques de l'Amazone à l'Océan Atlantique [Molinier et al., 1991, 1993].

A partir de 1993, l'équipe du programme **HIBAM** (Hydrologie et géochimie du Bassin Amazonien, ANEEL – CNPq – IRD – UnB, 1993-1999) poursuit au Brésil l'étude hydrologique avec notamment : i) l'adaptation des jaugeage par effet Doppler aux grands fleuves du bassin amazonien [Guyot et al., 1995 ; Guimarães et al., 1997], ii) l'établissement de courbes d'étalonnage définitives, dont celle de Óbidos – la plus importante station hydrométrique du monde [Callède et al., 1997], iii) la poursuite de l'installation des stations de télétransmission satellitaire – 80 stations en activité aujourd'hui [Guimarães et al., 1995 ; Callède et al., 1996 ; Rodrigues et al., 1997], iv) la mise au point d'un modèle d'annonce de crue pour la ville de Manaus [Cappelaere et al., 1996, 1997], v) la connaissance précise des régimes et des bilans hydrologiques sur l'ensemble du bassin [Guyot et al., 1993, 1994 ; Molinier et al., 1994, 1995, 1996, 1997], et vi) l'évaluation de l'impact des phénomènes de type ENSO sur les débits de l'Amazone et de ses principaux tributaires [Guyot et al., 1997, 1998 ; Molinier et al., 1999].

En **Bolivie**, avant le démarrage du projet **PHICAB** (Programme Hydrologique et Climatologique du Bassin Amazonien, ORSTOM – SENAMHI – UMSA, 1983-1995) l'hydrologie amazonienne était inexistante. Aussi, les hydrologues de cette équipe ont porté leurs efforts sur la mise en place d'un réseau d'une douzaine de stations hydrométriques dans le bassin du Rio Madeira [Cortez et Mendosa, 1993]. Les nombreux résultats de ce projet ont permis de i) connaître le régime des précipitations en Amazonie bolivienne [Roche et al., 1990 ; Campos et Peña, 1993 ; Herbas, 1993 ; Ronchail, 1993 ; Roche, 1993], ii) dresser la première carte isohyète précise de ce pays [Roche et al., 1990], iii) connaître le régime des écoulements [Bourges et al., 1990, 1993, 1995 ; Carrasco et Bourges, 1993] et iv) calculer le bilan hydrique du bassin amazonien de Bolivie – le premier réalisé en Amazonie [Roche et Fernandez, 1988 ; Roche et al., 1991 ; Abasto, 1993 ; Aliaga, 1993 ; Cruz, 1993].

✓ **Lacunes actuelles**

Malgré ces nombreuses études sur le climat et l'hydrologie dans le bassin amazonien, des lacunes existent, dont certaines fondamentales, qui limitent la compréhension des phénomènes observés, et en empêchent toute modélisation. Ces lacunes sont :

1. La quasi totalité des échelles limnimétriques des stations hydrologiques ne sont pas raccordés aux réseaux géodésiques nationaux. Les niveaux d'eau enregistrés sont donc des niveaux relatifs ce qui, en l'état actuel des connaissances, rend aléatoire toute modélisation hydrodynamique.
2. Malgré leur grande extension - plus de 300 000 km² au Brésil [Junk, 1997], la dynamique hydrologique des zones inondées adjacentes aux fleuves amazoniens (les várzeas), est également très mal connue par déficit d'information topographique (non connaissance des gradients altitudinaux et hydrauliques transversaux), cartographique (extension des inondations dans l'espace et le temps) et hydrologique (les zones inondées sont très rarement appareillées par les réseaux hydrologiques nationaux).
3. La variabilité pluviométrique est relativement bien connue en Amazonie brésilienne [Kayano et al., 1988 ; Rao et Hada, 1990 ; Marengo et Hastenrath, 1993 ; Roucou, 1997] ainsi que dans la zone tropicale andine [Aceituno, 1988 ; Ronchail, 1993, 1996, 1998]. Par contre, il existe une zone peu connue assez étendue (entre 5 et 25° de latitude Sud), car lieux de réponse à priori faible aux signaux océaniques, et qui correspond aux plaines amazoniennes (Llanos) de Bolivie, du Pérou, et l'extrême ouest du Brésil.
4. Les régimes hydrologiques sont aujourd'hui bien connus pour les fleuves amazoniens de Bolivie et du Brésil, grâce aux acquis des programmes PHICAB et HIBAM. Cependant, il n'existe pratiquement aucune information sur l'hydrologie des cours d'eau du domaine tropical andin (Colombie, Équateur et Pérou), ce qui est un frein à la modélisation hydrologique de l'ensemble du bassin amazonien. Enfin, la relation ENSO - Hydrologie n'a été explorée que pour l'Amazone et quelques tributaires sous influence de ce fleuve [Marengo, 1995]. L'impact de la variabilité climatique sur l'hydrologie de l'ensemble du bassin est encore mal connue [Guyot et al., 1997].

2.2. PROCESSUS D'ÉROSION ET TRANSFERT SEDIMENTAIRE

Du fait des fortes précipitations reçues et du fort gradient topographique qui varie du nord au sud en fonction des taux de surrection, la chaîne andine est soumise à d'intenses phénomènes d'érosion qui vont apporter aux rivières andines du bassin amazonien de grandes quantités de matières, sous forme particulière (sédiments), mais aussi sous forme dissoute [Masek et al., 1994].

En **Bolivie**, à partir des résultats du programme **PHICAB** sur le transport de matières dans les cours d'eau andins [Roche et Fernandez, 1988 ; Bourges et al., 1990 ; Guyot et al., 1990a ; Guyot et al., 1990b], le taux d'érosion moyen de la chaîne andine a ainsi été estimé à 3200 t.km⁻².an⁻¹, soit 1.3 mm.an⁻¹ [Guyot, 1993]. Bien que de très fortes hétérogénéités spatiales existent, dues aux régimes locaux des précipitations et à la nature lithologique des bassins versants [Aalto et al., 1998, 1999], il est intéressant de constater que ce taux moyen d'érosion correspond au double du taux de surrection de la chaîne andine, calculé sur de plus longues périodes par trace de fission [Benjamin et al., 1987]. La production sédimentaire issue des Andes va être transportée par les fleuves du bassin amazonien vers l'océan atlantique. A la sortie des Andes, du fait du brutal changement de gradient topographique, la capacité de transport des cours d'eau chute rapidement [Guyot et al., 1999], entraînant une abondante sédimentation dans les piedmonts andins (Figure 3), où la subsidence est très active [Baby et al., 1997]. Dans le bassin du Rio Madeira, seulement 40% du matériel érodé dans les Andes parvient ainsi à l'Amazone [Guyot et al., 1996].

Au **Brésil**, les données existantes sur les transports sédimentaires dans la plaine amazonienne [Meade et al., 1979 ; Meade et al., 1985 ; Richey et al., 1986] étaient jusqu'alors basées sur l'échantillonnage restreint du programme CAMREX - 12 échantillons sur 4 ans. Depuis, le programme **HIBAM** a installé un réseau station de 12 stations de référence (Figure 4) avec un échantillonnage décadaire (tous les 10 jours) des matières en suspension. Les premières données obtenues à Óbidos depuis 1995 présentent une forte variabilité temporelle du flux particulaire [Seyler et al., 1998 ; Guyot et al., 1999] qui invalide les évaluations antérieures des flux sédimentaires à l'océan.

Ces résultats montrent par ailleurs que le flux sédimentaire en plaine semble être contrôlé par le jeu tectonique des “ arcs ” amazoniens [Dunne et al., 1998]. En effet, les résultats du programme HiBAm indiquent que le schéma de fonctionnement observé sur le bassin du Rio Madeira - sédimentation progressive d'amont en aval lors de la traversée des plaines d'inondation, est également valide au Brésil [Filizola, 1999 ; Filizola et Guyot, 1999]. Ce résultat est corroboré par l'étude de Gaillardet et al. [1997] qui montre qu'un modèle d'équilibre d'érosion ne permet pas d'expliquer les fortes concentrations particulières mesurées dans les fleuves andins (Solimões et Madeira), ce qui implique qu'une partie au moins des sédiments aient été précédemment altérés et stockés à l'intérieur du bassin, phénomène également observé dans le bassin du Brahmapoutre [Goswami, 1985].

Enfin, l'utilisation du courantomètre à effet Doppler (ADCP) – couplé à un turbidimètre et à un échantillonneur ponctuel - permet d'explorer finement la distribution des concentrations en matières en suspension dans la section de mesure [Filizola et Guyot, 1996 ; Guimarães et al., 1997 ; Guyot et al., 1998]. De même, du fait d'un calage de l'ADCP sur un repère « fond du cours d'eau », il devient possible par contrôle de la trajectoire du bateau par GPS, d'évaluer la vitesse de déplacement de la couche de charriage qui atteint en crue 0.5 m/s à Óbidos [Callède et al., 1999]. Ces résultats récents vont permettre d'améliorer l'évaluation des flux sédimentaires, et en faciliter la modélisation.

✓ Lacunes actuelles

Comme pour la dynamique hydrologique, certaines interrogations persistent :

1. Les premiers résultats obtenus aux stations de référence du programme HIBAM ont montré que le flux sédimentaire est très variable au cours du cycle hydrologique, aux stations des piedmonts andins en Bolivie, mais aussi à la station de Óbidos qui draine un bassin de près de 5 millions de km². Qu'en est-il sur les autres cours d'eau du bassin ?
2. Les bilans de masse d'amont en aval attestent l'existence d'un piégeage sédimentaire, notamment dans les zones d'inondation des piedmonts andins et le long des várzeas, probablement sous contrôle structural des “ arcs ” amazoniens [Dunne et al., 1998 ; Filizola, 1999]. Mais de nombreuses questions persistent : quel est le fonctionnement actuel de ces “ arcs ” ? quel est leur impact sur la géométrie des écoulements (gradients topographiques et hydrauliques) ? Quelle est la dynamique sédimentaire dans les várzeas ?
3. La marée océanique a un effet dynamique mesurable jusqu'à Óbidos, soit plus de 700 km à l'amont de l'estuaire. Ainsi, à Almeirim, le débit de l'Amazone mesuré en décembre 1998 est passé de 54 400 à 137 000 m³/s en quelques heures [Kosuth et Filizola, 1998 ; Kosuth et al., 1999]. Cette forte variabilité journalière des débits et des vitesses dans tout le bas - Amazone a probablement un effet - non encore étudié, sur les flux de matières et leur dynamique vers les várzeas et l'Océan.
4. Enfin l'impact de la variabilité climatique sur l'érosion, les transferts de matières, et la sédimentation n'a encore pas été étudiée, malgré la réalité des effets observés dans le bassin amazonien.
5. De même l'impact de l'anthropisation du bassin sur les transferts de matières est peu connu. Il a été étudié sur des petits bassins [Fritsch, 1993], avant et après déforestation, mais l'extension sur grand bassin de ces résultats peut s'avérer difficile.

2.3. PROCESSUS D'ALTERATION ET TRANSFERTS GEOCHIMIQUES

De nombreux travaux sur les taux d'érosion chimique et particulaire ont été réalisés sur les grands bassins fluviaux, en particulier sur les bassins de l'Amazone, de l'Orénoque [Stallard *et al.*, 1991 ; Edmond *et al.*, 1995] et du Congo.

Les premières informations sur la qualité des eaux (physico-chimie) du bassin Amazonien sont le résultat des travaux précurseurs de Sioli [1950, 1954, 1957, 1965], de Gibbs [1967, 1972, 1973,

1977]. La plupart de ces données ne concernent que le cours principal des grands tributaires de l'Amazone [Stallard et Edmond, 1983, 1987; Gaillardet et al., 1997]. Depuis l'étude de Stallard [1980] sur le bassin amazonien, les concepts « d'érosion à altération limitée » et « d'érosion à transport limité » servent à caractériser les régimes d'érosion. Dans les grands bassins fluviaux, l'érosion dit « à altération limitée » prédomine généralement dans les parties à orogénèse active (les zones de montagnes jeunes) tandis que l'érosion dit « à transport limité » prédomine plutôt sur les zones de faible relief et de faible pente (cratons anciens). En l'absence de données fiables sur les débits et leur variabilité saisonnière ces auteurs ont interprétés leurs résultats de manière essentiellement qualitative et non en terme de flux résultants. De même, ces études ont uniquement portées sur les éléments majeurs et peu d'informations existaient sur l'origine, les modes de transport et les flux d'éléments traces. Seul le mercure, en tant que problème environnemental et de santé publique avait fait l'objet de recherches spécifiques [Pfeiffer et Lacerda, 1988; Martinelli et al., 1988]. Celles-ci montraient qu'il existait dans certaines régions de très fortes concentrations de mercure dans les eaux, les sédiments et la faune aquatique, teneurs attribués aux activités minières des « garimpos ».

Cet état de fait a fait ressortir la nécessité d'une étude plus approfondie de l'origine et du devenir des éléments en trace (y compris le mercure) durant leur transport le long du cours principal de l'Amazonie, étude réalisée selon quatre axes de recherche :

1. l'origine des éléments chimiques dans la zone d'apport andine,
2. le transfert longitudinal des ces éléments dans la plaine d'inondation et redistribution dans les zones de mélange « eaux noires-eaux blanches »,
3. la problématique du mercure en Amazonie,
4. l'étude du bilan des apports chimiques de l'Amazonie à l'Océan Atlantique

2.3.1. Étude des apports élémentaires des rivières andines

La partie montagneuse des bassins des deux fleuves d'origine andine, le Solimões et le Madeira, ne représente que 11% de la superficie totale du bassin de l'Amazonie mais est responsable de la plus grande partie de l'apport en solution et de l'essentiel des apports solides. La distribution d'un grand nombre d'éléments majeurs et traces en phases dissoute et particulaire (Na, K, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄, NO₃, SiO₂, DOC, POC, V, Mn, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, U) a pu être étudiée. Deux approches complémentaires ont été utilisées pour interpréter nos données.

Une approche statistique, en croisant les données de concentrations en éléments traces avec celles des paramètres physico-chimiques du milieu (conductivité, pH, concentrations en éléments majeurs et en particules en suspension) et celles concernant les facteurs environnementaux (altitude, lithologie, végétation). Les différentes analyses statistiques (analyses en composantes principales sur les données chimiques puis costructure ACP/ACP sur l'ensemble des données) ont permis de discriminer l'origine des éléments. Dans cette zone orogénique majeure, le facteur "lithologie" exerce un contrôle prépondérant sur la composition chimique des rivières. On a ainsi pu montrer que l'association Rb, Sr, Mo, Sb, Cs, U caractérise les rivières drainant les séries détritiques du Carbo-Permien, du Siluro-Dévonien et des formations sédimentaires du Tertiaire, alors que les éléments As, Zn, Cd sont associés aux sédiments de l'Ordovicien et/ou aux roches intrusives cénozoïques. L'association Mn, Co, Ni, V, COD caractérise les rivières "noires" drainant les formations quaternaires de la plaine bolivienne des "llanos" [Seyler et al, 1998].

Une approche purement géochimique, utilisant le calcul de la spéciation des éléments et celui de leurs coefficients de partage entre phases (utilisation du programme MINEQL et des constantes d'équilibre USEPA) permet de quantifier les termes des réactions d'équilibre qui contrôlent la solubilité des éléments (et donc des échanges solide/liquide) en fonction des phases minérales qui leur sont associées. L'origine du Sr, Ba et Rb apparaît lié aux roches relativement altérables (carbonates et évaporites). Leur comportement est conservatif dans les eaux des rivières, à l'exception des eaux fortement alcalines ou sulfatées où la calcite et la baryte peuvent précipiter. Les éléments Mo et U sont corrélés avec le Ca, ce qui reflète leur forte solubilité dans les eaux carbonatées. Les éléments de transition sont contrôlés par les réactions d'équilibre en solution et les échanges solide-liquide, mais

leurs concentrations relatives dépendent aussi des lithologies différentes rencontrées dans les bassins du Béni et du Mamoré. La distribution des éléments traces dans les particules en suspension est attribuée surtout au triage granulométrique des feldspaths durant le transport. Ce fractionnement reflète un mélange à deux composantes, l'une étant la muscovite et l'illite, l'autre le quartz. Ces minéraux, peu altérables et peu solubles ne contribuent pratiquement pas à la charge dissoute en éléments traces [Elbaz-Poulichet et Seyler, 1988, Elbaz-Poulichet et al, 1999; Maurice-Bourgoin et al, 1999].

2.3.2. Etude du transfert des éléments traces en solution et en suspension : rôle des zones de mélange « eaux blanches-eaux noires »

Les résultats analytiques indiquent que les concentrations dissoutes mesurées sur le Solimões et sur le cours principal de l'Amazone en amont de la zone estuarienne, à l'exception des environs de Manaus, sont parmi les plus faibles rapportées dans la littérature et caractéristiques de fleuves des régions non contaminées et éloignées des sources de pollution atmosphérique. Les concentrations en Sr, Ba, V, As, comme les éléments majeurs décroissent de l'amont vers l'aval, indiquant une dilution progressive des apports des rivières andines par ceux des rivières de la plaine amazonienne. Bien que basses, les concentrations en Pb, Cd, Ni, Co et Zn mettent en évidence une zone contaminée par des rejets anthropiques au voisinage de Manaus [Seyler et Boaventura, 1999^a, Seyler et Boaventura, 1999^b et Seyler et al, 1999].

Les éléments du groupe des terres rares (TR) présentent des caractéristiques géochimiques cohérentes et une sensibilité aux phénomènes de complexation / adsorption et aux variations de redox qui rend leur utilisation précieuse pour l'étude des interactions solide - liquide. Il existe une très nette différence dans les gammes de teneurs entre le bassin du Rio Negro et celui du Solimões - Amazone. Dans le premier bassin, les teneurs sont environ dix fois plus élevées, avec par exemple environ 200 ppt de La, 500 ppt de Ce et 2 ppt de Lu. Sur base du fractionnement La_{sh}/Yb_{sh} et de la valeur de Ce et Eu, il est possible de classer l'ensemble des eaux étudiées en trois groupes :

- les eaux du bassin du Rio Négro: elles montrent une légère anomalie positive en Ce, mais ne présentent pas de fractionnement TRI - TRL ni d'anomalie en Eu. Ces eaux sont caractérisées par un pH acide (4,4 - 6,5) et une conductivité inférieure à 20 μ S;
- les eaux du Solimões et des affluents de rive droite: elles se caractérisent à la fois par une forte anomalie positive en Eu, un enrichissement en TRI, particulièrement marqué pour les affluents, et une faible anomalie négative en Ce. Ces eaux ont un pH supérieur à 7,0 et une conductivité de plus de 50 μ S.
- les eaux de l'Amazone en aval de Manaus: la dilution par les eaux du Négro conduit à une légère anomalie positive en Eu et négative en Ce. Les pH compris entre 6,7 et 7,1 ainsi que les conductivités allant de 25 à 70 μ S traduisent bien le mélange des eaux. L'apparition d'un léger enrichissement en TRL caractérise la partie aval du bassin. Ce fractionnement pourrait résulter d'une coprécipitation préférentielle des TRI dans la zone de mélange des eaux entraînant leur fixation préférentielle sur les MES [Seyler et al, 1999, Gerard et al, 1999].

La distribution des éléments entre les phases (dissoute, colloïdale et particulaire) a été étudiée sur les échantillons d'ultrafiltration des principaux affluents de l'Amazone. Dans les eaux « blanches » (Solimões, Madeira) le carbone organique est majoritairement concentré dans la fraction de faible poids moléculaire (<5000D), alors que dans les eaux noires (Negro), la plupart du CO est associé à la fraction de haut poids moléculaire (>20kD). Dans les eaux noires, les fractions particulaire et colloïdale contrôlent la distribution des éléments. Dans les eaux blanches, l'ensemble des éléments étudiés, à de rares exceptions près, sont associés à la fraction particulaire. Les propriétés de complexation des différentes fractions mesurées en voltamétrie varient d'une rivière à l'autre. Dans les eaux noires, la fraction de haut poids moléculaire a l'affinité la plus grande pour les éléments de transitions tels que Al, Fe et Cu [Benedetti et al, 1999]

Les données acquises montrent également que les mélanges entre les eaux de l'Amazone et de ses principaux affluents ne sont pas conservatifs pour un certain nombre d'éléments majeurs, en trace et composés organiques. On observe que certains éléments présentant un excès dans la zone de

mélange (Mn et U). Dans ce cas, il y a désorption à partir de la phase particulaire ou bien mise en solution à partir des sédiments. Il semble que la diminution du pH en début de mélange est certainement le ou un des facteurs explicatifs de ce type de comportement. Inversement certains éléments présentent un déficit de concentration par rapport à la dilution théorique. C'est le cas des métaux de transition, de Pb, Cs, Co et du carbone organique dissous. Dans le cas du carbone il existe une perte considérable en acides humiques après la zone de mélange des eaux due principalement à l'adsorption sur les particules en suspension). Dans le cas de métaux, ce déficit est lié à des phénomènes d'adsorption [Moreira-Turcq et al., 1999].

2.3.3. La problématique du mercure en Amazonie

En ce qui concerne le cycle global du mercure, les espèces particulières transportées par les fleuves sont à l'origine de l'apport le plus important en mercure élémentaire aux océans, les flux atmosphériques ne représentant que moins de 20% [Cossa et al., 1996] de l'apport total. La moitié des émissions d'origine anthropique est déposée localement, dans les bassins fluviaux concernés par cette contamination, probablement en raison de la présence de mercure réactif dans les flux gazeux, la seconde moitié rentrant dans le cycle atmosphérique global [Mason et al., 1994]. On estime qu'au cours de ce siècle, les émissions d'origine anthropique ont triplé les concentrations en mercure dans l'atmosphère et dans les océans.

Dans le bassin amazonien plus spécifiquement, sur la période 1960-1995, les émissions de mercure, essentiellement attribuées aux activités d'orpaillage, ont été évaluées à 1200 tonnes au Brésil [Barbosa et al., 1995] et à 300 tonnes environ en Bolivie [Maurice-Bourgoin et al., in press] contre 200 000 tonnes durant la période coloniale [Nriagu, 1993] pour toute l'Amérique Latine. De nombreuses études ont fait état de teneurs inquiétantes de mercure dans les poissons carnivores et chez les populations dont ces poissons constituent la principale source de protéines [Malm et al., 1990 ; Nriagu et al., 1992 ; Pfeiffer et al., 1993 ; Malm et al., 1995 ; Maurice-Bourgoin et al., 1999].

Cependant, il a été démontré récemment que les sols amazoniens disposent de réserves en mercure qui dépassent largement celles attribuées aux seules activités d'orpaillage [Roulet et al., 1999]. En effet, ces sols contiennent jusqu'à 10 fois plus de Hg que ceux des pays tempérés en raison probablement de leur âge (plusieurs milliers d'années) et de leur pouvoir de rétention supérieur grâce à la présence importante d'oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium. Cependant, très peu d'études ne donnent de valeur de mercure dissous dans les eaux [Nriagu et al., 1992] en raison de la stratégie d'échantillonnage, de la méthodologie et des techniques analytiques utilisées. Les premières campagnes réalisées en 1995-1996 dans le cadre du Programme 'Grands Bassins - Amazone' de l'IRD et de PEGI ont permis d'établir un premier transect longitudinal des concentrations en mercure dans les eaux de surface sur tout le bassin du Madeira jusqu'à l'Amazone à Santarém [Maurice-Bourgoin et al., 1997]. La combinaison de techniques 'ultra-propres' de prélèvement [Ahlers et al., 1990], de stockage et de traitement des échantillons, avec l'extrême sensibilité de la technique de fluorescence atomique permet de présenter des résultats fiables de mercure total dans les eaux naturelles [Cossa et al., 1995] et donc de corriger les fortes valeurs publiées jusque-là.

Il est intéressant de relever que les teneurs en mercure dissous mesurées dans l'Amazone sont particulièrement élevées par rapport à la moyenne mondiale mais présentent l'avantage d'être parmi les premières publiées, limitant les possibilités de comparaison et d'interprétation. De nouvelles campagnes sont donc nécessaires d'une part, pour confirmer les premiers résultats obtenus, et d'autre part, afin de mesurer l'influence de l'hydrologie sur la répartition des teneurs en mercure dans le bassin de l'Amazone.

Des premiers résultats obtenus dans l'Amazone, au niveau de la zone de mélange eaux noires / eaux blanches, les pics de mercure sont clairement apparus au niveau des eaux de surface du Rio Negro caractérisée par des teneurs élevées en COD [Maurice-Bourgoin et al., 1999]. Des études récentes [Küchler et al., 1994 ; Patel et al., 1999] ont montré que 30 à 50% du COD est sous forme colloïdale dont la capacité complexante favorise l'adsorption de nombreux métaux traces et ainsi leur transport dans l'hydrosystème. La capacité d'adsorption élevée du Hg et la stabilité de ses liaisons avec le carbone font

qu'il est essentiellement transporté sous forme particulaire dès que la teneur en MES est élevée. Pour expliquer l'origine de ces très fortes concentrations en mercure dissous et surtout particulaire dans le Rio Negro, il faut s'intéresser aux processus de ruissellement des eaux pluviales à l'intérieur du bassin versant associé aux processus de spéciation du mercure dans les sols forestiers. En effet, dans les sols ferrallitiques, le comportement et l'accumulation du mercure sont liés à la pénétration des substances humiques complexantes et mobiles puis à leur adsorption sur les surfaces d'oxy-hydroxydes de fer en profondeur [Roulet et Lucotte, 1995].

En effet, le mercure contenu dans les sols ne provient pas uniquement des apports dus aux activités d'orpaillage en cours dans tout le bassin amazonien depuis près d'un siècle mais pourrait provenir d'une accumulation sur plusieurs centaines d'années résultant du cycle atmosphérique naturel du mercure et de la pédogenèse. Si les actions de déforestation ont une influence négligeable sur l'augmentation du mercure atmosphérique dans le bassin amazonien [Lacerda, 1995], en revanche, leur influence sur les processus de lessivage des sols est importante et donc peuvent contribuer à l'augmentation du mercure dans les eaux de surface de sous-bassins versants amazoniens non affectés par les activités d'orpaillage. Le mercure apporté par le lessivage des sols forestiers peut alors précipiter dans les eaux de surface ce qui expliquerait les fortes teneurs mesurées en mercure particulaire [Maurice-Bourgoin et al., 1999].

2.3.4. Evolution temporelle des concentrations à Obidos : bilan des apports chimiques de l'Amazone à l'Océan Atlantique

Afin de connaître l'évolution temporelle des concentrations un suivi des concentrations avec un pas de temps mensuel a été mis en place à la station d'Obidos située à l'amont de l'embouchure. Les premiers résultats montrent qu'il existe une forte variabilité des concentrations dissoutes. Pour le V et le Mo par exemple, les concentrations varient d'un facteur 2 à 5 et diminuent lorsque les débits augmentent (comme la conductivité). Pour le Mn, le Ba, le Sr ou le Co les concentrations varient d'un facteur 2 à 3 et augmentent avec le débit. Ces comportements sont liés en partie à l'arrivée à Obidos de masses d'eau d'origine différente (andine en mai-juin, plaine amazonienne en juillet). Le second mécanisme explicatif serait le stockage temporaire des eaux dans la zone d'inondation (les conditions redox existant dans les zones de "várzea" permettant la remobilisation des éléments) qu'il conviendrait d'étudier. Ces variations qui n'avaient, jusqu'à présent pas été prises en compte ont permis de réévaluer le flux en éléments traces qui sont transférés à l'Océan Atlantique par le système amazonien [Seyler et al, 1998, Guyot et al, 1999].

3. ACTIONS DE RECHERCHE

Pour atteindre les objectifs du projet, L'UR GBFT portera l'essentiel de ses efforts sur le chantier Amazone s.l. (Bolivie, Brésil, Équateur), sur lequel l'ensemble des résultats décrits ci-dessus ont été acquis. La possibilité d'extension des activités de l'UR GBFT au Pérou sera étudiée avec attention en fonction des contraintes locales, politiques et financières. Enfin, l'éventualité du démarrage d'un chantier Inde et/ou Asie du Sud - Est sera explorée, en relation avec les autres UR et UMR associées au pôle universitaire de l'UPS à Toulouse.

Concernant le bassin amazonien l'ensemble des objectifs du projet peuvent se regrouper en quatre actions de recherche spécifiques :

☞ **Action 1. Dynamique hydrologique et forçage climatique**

☞ **Action 2. Érosion / altération et exportation de matières des bassins andins**

☞ **Action 3. Transfert et piégeage sédimentaire dans la plaine amazonienne, rôle des zones humides**

☞ **Action 4. Transfert des éléments dissous et rôle des várzeas**

Les résultats obtenus sur ces quatre axes de recherche, seront intégrés dans la base de données SIG Amazone, qui sera le cadre d'une modélisation globale distribuée des transferts dans les grands bassins fluviaux tropicaux (**Action 5**).

3.1. ACTION 1 : DYNAMIQUE HYDROLOGIQUE ET FORÇAGE CLIMATIQUE

3.1.1. Calage altimétrique du réseau hydrométrique

Dans le bassin amazonien, seules 3 stations du réseau hydrographique brésiliens sont rattachées en altimétrie au référentiel "niveau moyen de la mer". Le rattachement des échelles de Manaus (1500 km de l'embouchure) et Santarem (730 km de l'embouchure) montre que les niveaux moyens y sont respectivement de 20.0 m et de 6.8 m, soit une pente moyenne du Fleuve entre ces deux stations de 0.018 m/km et de 0.009 m/km entre Santarem et l'embouchure. Toutefois les fluctuations annuelles de niveau sont de 14 m à Manaus alors qu'elles ne sont que de 7m à Santarem, fortement sous l'influence de la mer en basses eaux. Les quelques données de topographie disponibles indiquent que le fond de l'Amazone est nettement sous le niveau de la mer sur plus de 2000 km.

La compréhension des processus hydrodynamiques et sédimentologiques du Fleuve Amazone, et le développement d'outils de prévision (propagation des crues, lois d'étalonnage hauteur-débit) nécessitent la connaissance de la ligne d'eau du Fleuve dans un référentiel altimétrique absolu, c'est à dire, par rapport au géoïde. Les chroniques de données de niveaux aux échelles seront traduites en niveaux par rapport au référentiel "niveau moyen de la mer" ce qui permettra d'étudier la dynamique de la ligne d'eau sur les différents tronçons du fleuve. On pourra également étudier la dynamique de remplissage et vidange des zones d'inondation (lit majeur) en fonction de la dynamique du niveau dans le fleuve (lit mineur). Par ailleurs les données de topographie ainsi obtenues permettront d'aborder la modélisation hydrodynamique sur des bases réalistes

Chantier

Cette opération de rattachement altimétrique ne concernera **qu'une quarantaine de stations hydrométriques clés**, sur les transects les plus représentatifs du bassin amazonien : Napo - Marañón, Beni - Madeira, Branco - Negro, Solimões - Amazone.

Méthode

Techniques de GPS bi-fréquence couplées à un modèle d'écart ellipsoïde - géoïde

Étant donnée la difficulté de cheminement le long du réseau hydrographique, les techniques classiques de topographie au sol sont inenvisageables. Seules les techniques de GPS bifréquence (nivellement par rapport à l'ellipsoïde) couplées à un modèle de géoïde (écart géoïde-ellipsoïde, modèle de géopotential EGM 96 amélioré par intégration de mesures gravimétriques au sol) peuvent permettre de déterminer l'altimétrie absolue des stations. Ces techniques ont été mises en œuvre en juin-juillet 1999 sur la partie aval de l'Amazone depuis l'embouchure jusqu'à Santarem et devraient être prolongées de Santarem à Manaus d'ici fin 1999. Une fois analysés les résultats l'extension pourra être envisagée sur le reste du réseau hydrographique amazonien au Brésil puis dans les autres pays du bassin.

Altimétrie satellitaire radar

L'objectif est d'exploiter les données d'altimétrie satellitaire radar (ERS, Topex-Poséidon,...) et d'analyser la corrélation du signal avec les mesures au sol aux stations hydrométriques. Une bonne corrélation permettrait de caler le zéro des échelles par rapport à l'ellipsoïde. Ceci permettrait d'envisager un rattachement altimétrique d'échelles isolées sans besoin de mesures GPS spécifiques au sol, mais également d'analyser la dynamique de zones d'inondation où aucune échelle n'a été implantée. Le travail consistera donc (1) à analyser la qualité des corrélations entre signal au sol et signal satellite, et à définir les limites de précision et de résolution dans le contexte des grands fleuves, (2) à élaborer des méthodologies d'interpolation de ligne d'eau ou de suivi d'évolution sur des zones non équipées en échelles limnimétriques.

Chercheurs de l'UR impliqués

Pascal Kosuth (IRD) et Denizar Blitzkow (USP).

Collaborations

Les mesures au sol et l'implantation de bornes de référence seront réalisées par l'IBGE au Brésil et les partenaires géophysiciens de l'UR « Déformation de la lithosphère continentale et transferts de matière en zone de convergence » dans la partie andine du bassin [projet PNSE en cours pour cette opération – Baby, 1999]. Le dépouillement des mesures au GPS bi-fréquence et leur couplage au modèle régional de géoïde sera réalisé par l'USP (collaboration envisagée avec l'IGN et l'ESGT). L'analyse de la dynamique de la ligne d'eau sera effectuée en collaboration avec les hydrologues l'ANEEL au Brésil.

Les travaux sur l'altimétrie satellitaire radar seront menés avec la collaboration du LEGOS (GRGS/CNES), du LODYC, et de partenaires brésiliens (USP, IBGE, DHN, ANEEL). Des contacts avec des partenaires américains (NASA) sont en cours. Un projet au PNTS a été déposé pour cette étude : « Développement de l'altimétrie satellitaire radar pour le suivi hydrologique des plans d'eau continentaux : application au réseau hydrographique de l'Amazone » [Kosuth, 1999c].

3.1.2. Dynamique des zones humides : les várzeas

Les zones humides des grands fleuves intertropicaux, qui couvrent plusieurs dizaines de milliers de km², sont des écosystèmes particuliers dont les caractéristiques sont éminemment variables selon la saison et selon les années. Quand elles sont interconnectées de façon permanente ou temporaire au cours d'eau, elles constituent les zones d'inondation (floodplains ou várzeas au Brésil). Leur caractéristique majeure est la dynamique hydrologique engendrée par la variation du niveau des eaux du fleuve. En terme de bilans hydrologique et sédimentaire, les zones d'inondation jouent un rôle de stockage temporaire (voire définitif) du matériel dissous et particulaire, avec une variation du temps de stockage compris entre quelques mois (eau et substances dissoutes) à quelques centaines d'années (sédiment). La variabilité spatio-temporelle de l'extension des zones inondées et la dynamique du mélange eaux blanches / eaux noires au cours du cycle hydrologique, seront étudiées en détail (à partir d'une approche conjointe télédétection - radar et visible - et hydrologie) sur les sites.

Une modélisation des flux (eau, sédiments, matières dissoutes), du stockage, des temps de résidence et de la production dans ces zones humides sera ensuite réalisée. La compréhension à grande échelle de cette dynamique des zones humides sera approchée par extrapolation des résultats obtenus à l'échelle locale et ce, à partir des outils de spatialisation fournis par la télédétection et le SIG. Les résultats ainsi obtenus sur la dynamique du lit majeur (zones humides) seront couplés aux résultats acquis sur le réseau hydrographique pour donner une représentation unifiée et cohérente du système.

Chantier

La connaissance du fonctionnement des zones humides est donc fondamental pour la modélisation globale du système grands bassins. Pour cela, l'UR GBFT étudiera en détail la dynamique de **deux várzeas représentatives au Brésil** : celle de **Lago Grande de Curuaí** (Figure 5) près de Óbidos pour le bas Amazone, et une autre várzea à l'amont de Manacapuru (site à définir) pour le cours moyen de l'Amazone. Par ailleurs, l'étude entreprise par le programme BIOBAB sur les zones d'inondation de **la plaine du Beni en Bolivie** [Bourrel et al., 1999], à l'amont du système, sera poursuivie si les moyens humains de l'UR (ITA) le permettent.

Méthode

Les objets sélectionnés seront équipés (limnigraphes) et suivis (calage altimétrique, jaugeages) pour la mise en route de leur modélisation hydrodynamique (cf Action 5). L'extension des zones inondées et leur dynamique temporelle sera appréhendée par imagerie satellitaire (visible et radar). Enfin, l'altimétrie satellitaire radar pourra être utilisée pour le suivi hydrologique, en complément des mesures hydrologiques au sol.

Cette étude hydrodynamique sera couplée avec une étude des couleurs d'eau sur la várzea par vidéographie numérique et une étude de la topographie fine des zones inondées (hors forêt et sous forêt) par laser aéroporté. L'US ESPACE qui vient de se doter de ces équipements au LRT de Cayenne a choisi de travailler sur deux des sites choisis à titre de démonstration et de mise au point des capacités de ces instruments en zone forestière, en particulier les possibilités d'obtenir des profils topographiques de sol ou de zone inondées sous la forêt, ou des profils de fond des zones inondées en période de basses eaux.

Chercheurs de l'UR impliqués

Luc Bourrel (IRD), Pascal Kosuth (IRD) et Jean Michel Martinez (CSN CESBIO).

Collaborations

- ✓ les services hydrologiques nationaux : ANEEL au Brésil, SENAMHI en Bolivie
- ✓ le CESBIO à Toulouse,
- ✓ l'US ESPACE « Expertise et Spatialisation des connaissances en Environnement » proposée par Frédéric Huynh.

3.1.3. Spatialisation de l'humidité des sols

L'humidité des sols est l'une des variables d'entrées des modèles hydrologiques globaux. Elle est en général estimée dans les modèles distribués à partir de données moyennes de porosité ou de densité apparente par type de sol délimités sur des cartes existantes, ou approchées par des indices de sol tenant compte du type de sol et de son occupation classée en grands types (zone urbaine, forêt, culture). La capacité de rétention du sol est pourtant la principale cause des effets réservoirs qui compliquent la relation entre pluie, évaporation et écoulement dans un bassin versant. L'estimation de ces déficits d'écoulement et de leur variabilité dans l'espace est essentielle pour caractériser les bassins versants. D'autre part, les chemins que suivent l'eau à travers le sol ou à la surface du sol pour rejoindre les nappes ou la rivière et le temps de résidence dans ces différents réservoirs conditionnent en partie la qualité chimique des eaux, par les différents mécanismes de l'altération et de l'érosion.

Chantier

L'ensemble du bassin amazonien.

Méthode

Il est prévu en liaison avec l'US ESPACE de mener une action d'analyse multi-échelle de la variabilité spatiale de l'humidité des sols sur images satellites dans le domaine du proche infrarouge et des micro-ondes. Cette action est détaillée dans le document " Approches spatiales des interactions Sol, Eau et Végétation " [Seyler, 2000], inclus dans la proposition d'US ESPACE.

Chercheurs de l'UR impliqués

Frédérique Seyler (US ESPACE) et Nabil Eid (UnB).

Collaborations

- ✓ l'US ESPACE, où une implication forte de Frédérique Seyler (Volet SEV) est attendue sur ce projet.
- ✓ l'UR " Processus et bilans de transferts dans les formations superficielles de la zone intertropicale " [E. Fritsch].

3.1.4. Forçage climatique

Il s'agit de d'évaluer l'impact de la variabilité climatique actuelle sur les précipitations et les écoulements, afin de quantifier son effet sur l'érosion et les flux de matières dans le bassin amazonien. Enfin la variabilité des flux hydriques à l'Océan Atlantique Tropical (fleuves Amazone et Congo) sera analysée. L'étude des longues séries chronologiques (ruptures, variabilité climatique) sera poursuivie. Une première approche [Guyot et al., 1997] a montré que la réponse aux événements de type ENSO est variable suivant les régions du Bassin. Dans la partie septentrionale (rios Branco, Jari), la réponse hydrologique est fortement corrélée, positivement, à l'Indice d'Oscillation Austral (SOI) avec un décalage de 6 mois, alors que sur d'autres bassins comme le Rio Madeira, la corrélation est beaucoup moins nette, mais semble être négative. Ces premiers résultats devront être affinés, notamment en utilisant les indices de température de surface de l'Océan Atlantique (SST) au lieu de l'Indice d'Oscillation Austral défini dans l'Océan Pacifique [Uvo, 1998]. Par ailleurs, la variabilité du signal pluviométrique sera étudiée, à partir de l'ensemble de l'information des stations de l'ANEEL (339 postes), alors que les études précédentes ne prennent en compte que la 30^{aine} de stations du réseau synoptique de l'INMET.

Chantier

Cette étude hydrologique portera sur **l'ensemble du bassin amazonien** à partir des données climatiques et hydrologiques et la collaboration des services partenaires. Dans certains pays comme le Brésil, ces données sont nombreuses et de bonne qualité, alors qu'elles sont éparées et de médiocre qualité en Bolivie, en Equateur, en Colombie et au Venezuela, ou encore pratiquement inexistantes comme au Pérou.

Méthode

- ✓ Traitement statistique des séries chronologiques, et utilisation de logiciels spécifiques (MVR, KhronoStat, ...).

Chercheurs de l'UR impliqués

Michel Molinier (IRD), Josyane Ronchail (UPMC), Edison Heredia (INAMHI), Jean Loup Guyot (IRD) et Alain Laraque (IRD).

Collaborations

Cette étude sera réalisée en étroite collaboration avec :

- i. les hydrologues des services partenaires de l'ANEEL (Eurides de Oliveira, Valdemar Guimarães), de l'INAMHI (Rodrigo Pombosa, German Subia) et du SENAMHI (Jose Cortez).
- ii. l'UR « Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales. Indicateurs Climatiques et Environnementaux » [P. Ribstein],

Moyens et données

- ✓ Réseaux hydrométriques et personnels opérationnels des services nationaux partenaires : l'ANEEL (Brésil), l'INAMHI (Equateur), le SENAMHI (Bolivie et Pérou).
- ✓ Banques de données existantes des services nationaux partenaires (pluie, hauteur d'eau et débit, à pas de temps journalier). Ces services nationaux sont : l'ANEEL (Brésil), l'IDEAM (Colombie), l'INAMHI (Equateur), le SENAMHI (Bolivie et Pérou), et le MARN (Venezuela).

3.2. ACTION 2 : ÉROSION / ALTERATION ET EXPORTATION DE MATIERES DES BASSINS ANDINS

Il s'agit d'appréhender les taux d'érosion / altération des bassins andins, et l'exportation de matières vers l'Amazone : c'est la fonction de production des bassins.

Le système de drainage amazonien s'est mis en place relativement récemment il y a environ 6 Ma, à la suite d'une forte accélération de la surrection des Andes, et on peut supposer que le taux d'érosion (au sens de dénudation) a peu ou pas changé au cours de cette période. En effet, la paléogéographie des bassins d'avant chaîne de Bolivie, du Pérou et d'Équateur, qui constituent la bordure ouest du bassin amazonien, a peu changé entre le Miocène et l'Actuel [Hoorn et al., 1995 ; Héral et al., 1996 ; Baby et al., 1997].

Afin de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse, nous nous proposons d'évaluer et de comparer les taux d'érosion actuel et "à long terme" (+ ou - 10^6 an) sur les chantiers sélectionnés, au moyen d'approches méthodologiques distinctes :

- i. pour l'actuel, en utilisant l'approche classique de la mesure des débits solides ;
- ii. pour le passé, en utilisant une approche isotopique (cosmonucléides produits in situ).

3.2.1. Mesure de l'érosion actuelle par les bilans aux stations hydrologiques

En Bolivie, les bilans des transports de matières ont été établis et publiés pour une quarantaine de bassins du bassin versant amazonien, pour lesquels il existait des chroniques de données suffisantes, généralement 10 à 20 ans [Guyot, 1993]. Dans la plupart des cas, du fait de la taille réduite des bassins et de leur pente, ces taux de transport peuvent être assimilés à des taux d'érosion. Malgré une forte dispersion des taux, dues aux régimes locaux des précipitations et à la nature lithologique des bassins versants [Aalto et al., 1998], il est intéressant de constater que le taux moyen d'érosion calculé ($3200 \text{ t/km}^2 \cdot \text{an}$, soit 1.3 mm/an , Guyot, 1993) correspond au double du taux d'érosion de la chaîne andine, mesuré sur de plus longues périodes par trace de fission [Benjamin et al., 1987].

Cette étude est basée sur l'exploitation des données sur les flux de matières - dissous et particulaire - acquises en Bolivie, par les programmes PHICAB [Guyot, 1993], puis HIBAM [Seyler et al., 1998 ; Seyler et Guyot, 1999]. Les données existantes seront complétées par la mise en place d'un réseau d'observation sur le bassin du Rio Napo dans les Andes équatoriennes, au régime climatique équatorial [Guyot, 1998 ; Pérez Suasnavas, 1998], et éventuellement d'un réseau sur les bassins du Maraón et de l'Ucayali au Pérou.

Chantier

En **Bolivie**, le **bassin du Rio béni** a été sélectionné du fait de l'existence de données provenant des projets PHICAB puis HIBAM, mais aussi de la relative accessibilité du bassin depuis La Paz. Les stations sélectionnées sont encore opérationnelles. En **Equateur**, le **bassin du Rio Napo** vient d'être appareillé pour un échantillonnage régulier. Ce bassin, tout comme celui du Beni en Bolivie, est d'un accès aisé en toutes saisons. Au **Pérou**, nous envisageons de démarrer une opération semblable sur **les bassins du Marañón et de l'Ucayali** au cours de cette UR, si le partenaire hydrologique local (SENAMHI) est disposé à s'investir dans une telle étude, et si le financement du projet le permet.

Méthodes

Les bilans de matières sont obtenus au niveau de stations de référence où l'hydrologie est connue (débits liquides), et où les flux sédimentaires (débits solides) et dissous sont estimés selon une procédure classique de calcul des flux instantanés [Walling et Webb, 1985] à partir d'un suivi au pas de temps décadaire (particulaire) ou mensuel (dissous) des concentrations de surface. La modélisation de la réponse sédimentaire aux cycles hydrologiques proposée par Picouet et al. [1999] sera testée sur le bassin amazonien. Une modélisation globale spatialisée de la production sédimentaire actuelle sera tentée de la même manière [Thèse Filizola] en couplant les données hydro-sédimentaires au SIG Amazone [Maneux, 1998].

Chercheurs de l'UR impliqués

Jean Loup Guyot (IRD), Alain Laraque (IRD), Laurence Maurice Bourgoïn (IRD), Patrick Seyler (IRD), Geraldo Boaventura (UnB), Edison Heredia (INAMHI), Jérôme Viers (UPS) et Naziano Filizola (doctorant UPS).

Collaborations

- ✓ les hydrologues des services partenaires de l'ANEEL (Eurides de Oliveira, Valdemar Guimarães), de l'INAMHI (Rodrigo Pombosa, German Subia) et du SENAMHI (Jose Cortez).
- ✓ l'UMR 5563 LMTG « Laboratoire des Mécanismes de Transfert en Géologie »

Moyens et données

- ✓ Banques de données existantes des projets antérieurs : PHICAB et HIBAM.
- ✓ Réseaux hydrométriques et personnels opérationnels des services nationaux partenaires : l'INAMHI (Equateur), et le SENAMHI (Bolivie et Pérou).

3.2.2. Estimation du taux d'érosion à long terme en utilisant la mesure de ^{10}Be in situ dans les sédiments fluviaux

Le béryllium 10 cosmogénique est produit lorsque le rayonnement cosmique, frappant la surface de la terre, rencontre certains atomes " cibles " comme l'oxygène, l'azote le silicium. Les quantités produites " in situ ", c'est à dire dans la matrice des minéraux exposés au rayonnement cosmique sont faibles, soit quelques atomes par an et par gramme de matière, et diminuent au cours du temps (le béryllium 10 est un élément radioactif). Parce que son taux de production diminue exponentiellement avec la profondeur, sa concentration dans les minéraux des roches ou des sols est directement liée à " l'histoire " de la couche de surface exposée [Brown et al. 1991 ; Lal, 1991].

Les méthodes d'investigation utilisant les cosmonucléides produits in situ n'ont pu être mise en œuvre qu'au cours des dernières années, en particulier en utilisant la technique de spectrométrie de masse par accélérateur. On considère qu'après un temps d'exposition d'environ 10^4 à 10^5 ans la concentration en ^{10}Be atteint un équilibre stationnaire qui est inversement proportionnel au taux d'érosion de la couche exposée. Minéral ubiquiste, le quartz, composé de silice et d'oxygène, est un milieu propice à la production de béryllium. En mesurant le ^{10}Be et le ^{26}Al dans les quartz des sédiments déposés dans le lit des cours d'eau (et en faisant un certain nombre d'hypothèses : taux d'érosion continue et constant sur la période considérée) on pourra estimer le taux d'érosion moyen du bassin

versant considéré [Lal et Arnold, 1991, Brown et al, 1991]. Cette méthode a été appliquée avec succès sur un petit bassin versant en zone tropicale : Icaros River Basin à Puerto Rico [Brown et al, 1995].

Utilisant le même mode opératoire que sur le bassin de l'Icaros River nous nous proposons de tester la faisabilité de cette méthode sur les bassins et sous-bassins du Beni et du Napo. Au niveau méthodologique, et par rapport à l'étude sur le bassin versant expérimental de l'Icaros river, il s'agira de démontrer que cette méthode peut être appliquée à des bassins versants d'ordre supérieur à 1. Le deuxième intérêt de notre étude réside dans la confrontation des résultats des taux d'érosion obtenus par la méthode isotopique avec ceux issus des études géophysiques décrites ci-dessous et portant sur la même période.

Chantiers

Les chantiers seront les mêmes que pour l'opération précédente : « Quantification du taux d'érosion moyen actuel », ie **les bassins andins des rios Beni en Bolivie, Napo en Equateur, et éventuellement Marañón et de l'Ucayali au Pérou.**

Chercheurs de l'UR impliqués

Patrick Seyler (IRD) et Geraldo Boaventura (UnB).

Collaborations

Cette étude ne pourra être menée qu'avec la participation réelle des chercheurs du CEREGE (Aix en Provence).

Moyens analytiques

Dosage de $_{10}\text{Be}$ et $_{26}\text{Al}$ sur le Tandetron par le CEREGE.

3.3. ACTION 3 : TRANSFERT ET PIEGEAGE SEDIMENTAIRE DANS LA PLAINE AMAZONIENNE : ROLE DES ZONES HUMIDES

Cette action de recherche correspond à l'étude des processus qui contrôlent le transfert et la sédimentation le long des grands fleuves, depuis le piedmont andin, jusqu'à l'océan atlantique : *c'est la fonction de transfert des cours d'eau*. Il passe par le suivi longitudinal, d'amont en aval, des flux de matières aux stations de référence et la connaissance de l'impact des zones humides sur ces flux.

De la même manière que pour l'action précédente « érosion / altération et exportation de matières des bassins andins », le transfert sédimentaire et son piégeage dans la plaine amazonienne sera abordé aux deux échelles de temps : l'actuel et le million d'années (Ma). Pour l'actuel, trois approches seront utilisées :

- i. le bilan de la sédimentation par différence des flux particuliers mesurés aux stations hydrologiques,
- ii. l'estimation de la sédimentation actuelle à l'aide du $_{210}\text{Pb}$ et du $_{137}\text{Cs}$,
- iii. l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'évaluation du piégeage sédimentaire dans les zones humides (várzeas).

Les résultats obtenus seront comparés à ceux estimés par les sondages géophysiques des pétroliers dans l'avant pays andin.

3.3.1. Bilan de la sédimentation par différence des flux particuliers mesurés aux stations hydrologiques

Le taux de sédimentation dans les zones humides est calculé par la différence des flux observés d'amont en aval, rapportés aux superficies des zones inondées. Il s'agit donc dans ce volet de connaître précisément les flux aux stations des grands fleuves de la plaine amazonienne.

Chantier

Dans le bassin de l'Amazone, un réseau des 12 **stations de référence** du programme HiBAM (Figure 3) fonctionne actuellement en Amazonie bolivienne et brésilienne. Certaines stations, comme celle de Óbidos qui contrôle l'exutoire du bassin, possèdent déjà plusieurs années de données sur les flux dissous et particulaires. Les résultats obtenus en Bolivie et à Óbidos [Guyot, 1993 ; Seyler et al., 1998] montrent une forte variabilité temporelle des flux sédimentaires sans relation simple avec les débits, ce qui invalide les premières estimations de flux de matières à l'océan atlantique estimés à partir du flux hydrique [Meade et al., 1979, 1985]. Pour avoir une connaissance sur l'ensemble du Bassin Amazonien, il faudrait étendre ce réseau de stations de référence en Équateur, mais aussi au Pérou, pays dans lequel se situe la plus grande partie du domaine andin de l'Amazonie. Pour la Colombie, l'IDEAM gère un réseau de stations hydrométriques sur lesquelles des prélèvements sont régulièrement effectués. Une collaboration existe avec l'IDEAM à travers le projet AARAM, et les données sont en cours d'exploitation. En absence de mesures au Pérou, la régionalisation des résultats acquis en la Bolivie et en cours d'acquisition en Equateur et en Colombie, devrait permettre d'obtenir une estimation raisonnable des flux andins.

Méthodes

Les bilans de matières sont obtenus au niveau de stations de référence où l'hydrologie est connue (débits liquides), et où les flux sédimentaires (débits solides) sont estimés selon une procédure classique de calcul des flux instantanés [Walling et Webb, 1985] à partir d'un suivi au pas de temps décadaire des concentrations de surface. Pour les éléments de la phase dissoute, ce pas de temps peut être mensuel. Généralement, l'échantillonnage aux stations de référence est effectué par un observateur, en surface du cours d'eau et près de la berge. Compte tenu de la distribution non uniforme des matières en suspension dans les sections des grands fleuves [Curtis et al., 1979 ; Olivry et al., 1988 ; Meade, 1994], des campagnes de jaugeage et d'échantillonnage détaillé sur toute la section sont régulièrement organisées à des différentes époques du cycle hydrologique. Pour cela, la méthodologie développée par HIBAM en Amazonie, associant mesures turbidimétriques [Guyot et Calle, 1990] et courantométrie à effet Doppler [Filizola et Guyot, 1996 ; Guimarães et al., 1997], sera utilisée. L'utilisation d'une sonde automatique de mesure des profils de turbidité sera systématisée et des travaux seront menés pour établir la corrélation entre turbidité et charge solide. En parallèle des travaux porteront sur la granulométrie des matières en suspension qui constitue un paramètre important pour la modélisation du transport sédimentaire.

Chercheurs de l'UR impliqués

Alain Laraque (IRD) et Naziano Filizola (doctorant UPS).

Collaborations

Cette étude sera réalisée en étroite collaboration avec les hydrologues des services partenaires de l'ANEEL (Eurides de Oliveira, Valdemar Guimarães), de l'INAMHI (Rodrigo Pombosa, German Subia) et du SENAMHI (Jose Cortez, ...).

Moyens et données

- ✓ Banques de données existantes des projets antérieurs : PHICAB et HIBAM.
- ✓ Réseaux hydrométriques et personnels opérationnels des services nationaux partenaires : l'INAMHI (Equateur), et le SENAMHI (Bolivie et Pérou).

- ✓ Équipements de jaugeages par ADCP de l'IRD : 300 KHz au Brésil, 600 KHz en Bolivie, 1200 KHz en Equateur.

3.3.2. Estimation de la sédimentation actuelle à l'aide du ^{210}Pb et du ^{137}Cs

Le ^{210}Pb est un radioélément naturel appartenant à la chaîne de décroissance de l'Uranium 238. Son origine naturelle, sa demi-vie connue de 22.3 ans, sa relative facilité de comptage constituent les caractéristiques essentielles de cet élément qui en font un bon outil en océanographie, communément utilisé depuis une trentaine d'années pour évaluer les taux de sédimentation modernes (période inférieure au siècle) entre autres dans les domaines lacustres et côtiers [Koide et al., 1973 ; Krishnaswamy et al., 1971]. Le ^{137}Cs (période 30.2 ans) est un radionucléide artificiel provenant essentiellement des essais nucléaires dans l'atmosphère des années 1952-1972, qui se fixe très solidement sur les particules minérales argileuses. Il a donc contaminé les sols et constitue un marqueur chronologique des produits de l'érosion [Ritchie et McHenry, 1990 ; Wicherek et al., 1994]. Ces radioéléments à courte durée de vie sont fréquemment utilisés pour la connaissance des taux de sédimentation océanique ou lacustre [Hasänen, 1977 ; Pourchet et al., 1994]. Enfin, cette approche a été mise en œuvre récemment pour l'estimation des taux de sédimentation dans les plaines d'inondation connectées aux fleuves [Walling et He, 1994].

En Amazonie, les premiers résultats obtenus avec le ^{137}Cs et le ^{210}Pb dans la plaine d'inondation de Óbidos sont particulièrement encourageants et indiquent une sédimentation actuelle voisine de 2 cm.an^{-1} [Soares, 1997 ; Soares et al., 1999].

Chantier

Pour la continuation de cette étude dans le cadre de l'UR GBFT, les sites étudiés seront les mêmes que pour la dynamique hydrologique : **les deux várzeas représentatives au Brésil** : celle de **Lago Grande de Curuaí (Figure 5)** près de Óbidos pour le bas Amazone, une autre várzea à l'amont de Manacapuru pour le cours moyen de l'Amazone, et les zones d'inondation de la **plaine du Beni en Bolivie**, à l'amont du système.

Méthodes

Des carottes de 1 à 3 mètres de profondeur sont prélevées dans les dépôts sédimentaires des várzeas. Le dosage est effectué par spectrométrie gamma.

Chercheurs de l'UR impliqués

Leo Soares (doctorant cotutelle UnB / Bordeaux I) et Geraldo Boaventura (UnB).

Collaborations

- ✓ Jean Marie Jouanneau, UMR 5805 EPOC, Université de Bordeaux I
- ✓ Des Walling, Département de Géographie, Université d'Exeter (UK)

Moyens analytiques

Les deux équipes collaborantes possèdent des spectromètres gamma pour la détermination du ^{210}Pb et du ^{137}Cs , ainsi qu'une grande expérience du sujet. L'UMR EPOC est également très bien équipée pour la granulométrie laser et les déterminations minéralogiques des minéraux argileux (RX).

3.3.3. Utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'évaluation du piégeage sédimentaire actuel dans les zones humides (várzeas)

Les taux de sédimentation en plaine inondable, déterminés par le ^{210}Pb et le ^{137}Cs , seront comparés aux taux calculés par différence de flux aux stations de référence selon la procédure définie

par HIBAM en Bolivie et au Brésil [Guyot, 1993], à condition de connaître précisément pour chaque sous système la superficie des zones inondées. Seule les surfaces occupées régulièrement par les “ eaux blanches ” sont à prendre en considération pour le calcul des taux de sédimentation.

Le traitement des données Landsat TM, calibrées par l'échantillonnage de matières en suspension, permet d'estimer les concentrations en surface (Figure 6) [Mertes et al., 1993 ; Vieira et al., 1999]. En couplant cette information avec les données sur la distribution des MES dans la section mesurée lors des campagnes, une évaluation des flux sédimentaires, tant dans le fleuve que dans les plaines d'inondation, est alors possible [Vieira et Goulart, 1999]. Une telle expérience réalisée près de Manacapuru (plaine d'inondation du Rio Solimões au Brésil) a permis d'estimer un taux de sédimentation variant de 0.3 à 3 cm.jour⁻¹ suivant les crues [Mertes, 1994].

Chantier

L'UR GBFT se propose d'étendre cette méthodologie à **l'ensemble des zones inondées connectées au fleuve principal (Rio Solimões – Amazonas) au Brésil.**

Méthodes

Une première étude de la superficie occupée par les zones inondées sera menée aux dates qui sont disponibles, ainsi qu'une première caractérisation des várzeas et des types de mélange d'eau que l'on peut rencontrer le long du cours principal de l'Amazone. Quelques várzeas seront choisies à partir de cette première étude, pour leur représentativité vis à vis du mélange d'eaux noires et d'eaux blanches qu'elles présentent et leur suivi dynamique au cours du temps sera effectué sur une période de quatre ans. Cette étude hydrodynamique sera couplée avec une étude des couleurs d'eau sur la várzea par vidéographie numérique et une étude de la topographie fine des zones inondées (hors forêt et sous forêt) par laser aéroporté.

Chercheurs de l'UR impliqués

Rui Vieira (UFRJ), Luc Bourrel (IRD) et Frédérique Seyler (US ESPACE).

Collaborations

- ✓ l'US ESPACE, où une participation effective de Frédérique Seyler est attendue. Ce volet de recherche a fait l'objet d'un projet au PNTS : « Fonctions de correspondance entre la réflectance de l'eau et ses concentrations en matières terrigènes minérales et organiques. Exemple du cours de l'Amazone en vue de sa surveillance par télédétection spatiale » [Seyler, 1999].
- ✓ l'Université de Bordeaux (UMR 5805 EPOC - J.P. Froidefond) à travers une campagne de mesures de réflectance diffuse effectuées par un spectroradiomètre de terrain.
- ✓ l'Université Fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE).

Moyens et données

Pour cette étude, l'UR GBFT en constitution a déjà acquis une trentaine d'images Landsat TM et MSS sur le cours principal de l'Amazone (Rios Solimões et Amazone). D'autre part l'équipe dispose d'une mosaïque d'images JERS qui couvre toute l'Amazonie. La couverture spatiale est donc complète. En ce qui concerne la couverture temporelle, le nombre d'images sur chaque portion du fleuve varie de 4 images à 1 image. Seules quelques portions du fleuve ne sont pas couvertes en saison de hautes eaux. Enfin l'UR GBFT dispose de l'environnement informatique (à Brasília et à Toulouse) pour le traitement des images.

3.3.4. Comparaison avec les taux de sédimentation calculés sur le long terme dans les bassins “ subandins ”

De même que pour l'érosion, les résultats sur la sédimentation actuelle estimés par les marqueurs isotopiques (^{137}Cs et ^{210}Pb) sur le siècle, seront comparés à ceux calculés par les sondages géophysiques des compagnies pétrolières dans l'avant pays andin, portant sur plusieurs millions d'années.

Les bassins d'avant chaîne constituent des zones privilégiées pour étudier le style et l'histoire de la déformation d'un orogène. En effet, les structures tectoniques y sont peu érodées et souvent scellées par des sédiments dont l'âge et le dispositif géométrique permettent d'établir une histoire des mouvements orogéniques. Ces bassins sont aussi des zones d'intérêt économique, où on trouve d'importantes accumulations d'hydrocarbures et d'or qui constituent eux aussi des marqueurs de la déformation.

Chantier

Sur le versant amazonien des Andes, **les bassins d'avant chaîne de Bolivie, du Pérou et d'Equateur** - appelés traditionnellement par l'industrie pétrolière **bassins subandins** - ont déjà fait l'objet d'importantes recherches. Dans ces bassins, on retrouve la superposition de plusieurs bassins d'avant-chaîne continentaux d'âge tertiaire qui reflètent les stades les plus importants de l'orogénèse andine.

Méthodes

Les géologues de l'UR « Déformation de la lithosphère continentale et transferts de matière en zone de convergence » proposée par G. Hérail, se proposent de calculer, pour la période 0-6 Ma, les vitesses de déformation et les taux d'érosion du front orogénique - qui varient du nord au sud -, ainsi que les taux de subsidence des bassins d'avant-chaîne.

Chercheurs de l'UR impliqués

Jean Loup Guyot (IRD)

Collaborations

Cette opération de comparaison actuel / géologique, sera réalisée en collaboration avec l'UR « Orologène en Convergence ». Elle fait l'objet d'une proposition de recherche en cours au PNSE « Tectonique, érosion et sédimentation dans le bassin de l'Amazonie: du Mio-Pliocène à l'Actuel » [Baby, 1999].

Moyens et données

Cette étude est réalisable grâce aux données des partenaires de l'UR « Déformation de la lithosphère continentale et transferts de matière en zone de convergence », liés à l'industrie pétrolière (forages, sismique réflexion), qui permettent d'analyser la déformation, de calculer les volumes de sédiments déposés depuis 6 Ma ainsi que les taux de subsidence correspondant. Ces partenaires sont PetroEcuador, PetroPeru et YPF (Bolivie).

3.4. ACTION 4 : TRANSFERT DES ELEMENTS DISSOUS ET ROLE DES VARZEAS

Les données acquises sur le transfert longitudinal des éléments en solution ont montré que les mélanges entre les eaux du Solimões - Amazone et ses principaux affluents ne sont pas conservatifs pour un certain nombre d'éléments majeurs et traces (Seyler et al, 1997) et pour le carbone (Ertel et al, 1986). Par exemple, la perte considérable en acides humiques après la zone de mélange Solimões/Negro est attribuée à l'adsorption de la fraction de carbone de haut poids moléculaire sur les particules en suspension. Ces processus, dans l'Amazonie, dépendent de la composition minérale, des flux, de la concentration, mais principalement de la nature de la matière organique transportée et ont lieu tout au long de la zone de mélange. Il semble donc exister une redistribution majeure du carbone réactif à l'interface eaux blanches/eaux noires entraînant une redistribution entre les phases liquide, colloïdale et

particulaire de certains éléments comme Na, K, Mg, Cl ou encore Fe, Mn [Seyler et Guyot, in rapport PROSE, 1999]. Une autre étude concernant les variations saisonnières des concentrations à Óbidos a montré que pour des éléments tels que le Fe, le Mn ou l'As, les maxima de concentration dissoute présentaient un décalage de plusieurs semaines par rapport au maximum hydrologique [Seyler et al, 1998]. Ce déphasage a été interprété comme étant dû à l'influence de l'arrivée à Óbidos des eaux ayant séjournées dans les « várzeas » où les conditions biogéochimiques différentes ont permis une remobilisation des éléments associés à la phase particulaire. De plus, une grande partie de la matière organique « réactive » semble être produite et introduite dans le fleuve par les zones humides, ou « várzeas ». Ces deux observations nous amène à proposer une action de recherche sur le rôle des zones humides sur les transferts géochimiques dans le bassin amazonien.

Du point de vue chimique, deux types de « várzeas » sont présentes en Amazonie centrale : celles aux eaux « blanches », riches en matériel dissous et en suspension, avec un pH proche de la neutralité, et celles aux eaux « noires », pauvres en matériel particulaire et à pH acide, et dont les eaux contiennent de fortes concentrations d'acides humiques et fulviques. Alors que les cours d'eaux amazoniens sont considérés comme hétérotrophes, les várzeas présentent une production autotrophe considérable, ce qui aura une importance sur la forme chimique et le bilan des espèces dissoutes, notamment pour les éléments qui présentent des formes méthylées (As, Pb, Se, Hg,...) Le fonctionnement trophique des várzeas dépendra des caractéristiques locales comme la morphologie, les précipitations, la biogéochimie du système (Putz, 1997), ainsi que des apports en nutriments (Forsberg et al., 1988). De plus, l'alternance sur un cycle annuel, d'une période d'eaux noires et d'une période d'eaux blanches favorise les réactions d'oxydoréduction et les échanges entre phases dissoute et particulaire. Par exemple, la dissolution de ces oxy-hydroxydes de fer particulaire s'accompagne d'une désorption de certains éléments tels que le mercure probablement sous forme complexée qui peuvent ainsi migrer vers la colonne d'eau.

L'objectif spécifique de cette action de recherche est de fournir des éléments de réponse aux questions suivantes:

1. Sous quelles formes (dissoutes, colloïdale, particulaire) le carbone et les éléments traces y compris le mercure arrivent ils dans les várzeas?
2. Quelles sont les transformations qu'ils subissent dans cet écosystème?
3. Sous quelles forme ces mêmes éléments vont ils s'échapper des várzeas?
4. Les zones de várzeas sont ils des sites de biotransformation, en particulier de méthylation pour le mercure ?
5. Peut on établir un bilan de masse de ces éléments dans le cas de deux várzeas représentatives?
6. Ce bilan est il extrapolable à l'ensemble de la zone d'inondation amazonienne?

Chantiers

Les sites d'études seront choisis en fonction des objectifs définis ci-dessus. Une várzea « à eaux blanches » dite « Lago Grande de Curuaí », située en face de la ville d'Óbidos au Brésil pourrait être un des sites d'études; elle fait l'objet actuellement d'une étude hydrologique précise (quantification des débits liquides et solides entrée/sortie, temps de résidence des eaux et des particules...). Un second site « à eaux noires » sera choisi près de Manaus en fonction des possibilités d'accès, d'instrumentation et/ou ayant fait l'objet d'études ichtyologiques antérieures. Un troisième site pourrait être choisi dans la plaine du Beni en Bolivie.

3.4.1. Caractérisation physico-chimique des eaux

Dans chacune des várzeas seront réalisés des profils longitudinaux pendant chaque saison caractéristique: début de la crue, pic de la crue, décrue, étiage, soit quatre campagnes de mesure sur deux cycles hydrologiques si possible. Les prélèvements pour la géochimie et les mesures hydrologiques permettant de mesurer les débits liquide et solide seront réalisées, si possible, de façon synchrone. En chaque station seront mesurés, les paramètres physico-chimiques classiques (pH, Conductivité, alcalinité in situ) et la concentration en matières en suspension.

3.4.2. Distribution des éléments majeurs et traces dans les phases dissoute, colloïdale et particulaire

De façon à minimiser les contaminations, les échantillons d'eau sont prélevés soit à la main pour les échantillons de surface, soit à l'aide d'une bouteille Go-Flo (General Oceanics) horizontale. Les échantillons d'eau sont filtrés sur un système de filtration frontale (coupure à 0,2 μm) sous hotte à flux laminaire d'air filtré (Seyler et Elbaz_Poulighet, 1996), ou en cascade au moyen d'un système de filtration tangentielle selon le protocole décrit dans Gérard et al, (1999). Les fractions sont conservées à 4°C et à l'obscurité jusqu'à l'analyse. L'analyse des anions se fera suivant les laboratoires par colorimétrie (Brésil et Bolivie), ou par chromatographie ionique sur un appareil DIONEX® équipé d'une colonne AS4A (IRD, Bondy). Les cations majeurs seront analysés en absorption atomique en flamme. Un exercice d'intercalibration et de standardisation des méthodes entre les différents laboratoires est en cours. De manière à évaluer le flux de carbone dans les principaux compartiments, le carbone organique dissous-colloïdal et le carbone organique particulaire, seront analysés sur chaque prélèvement, selon les méthodes décrites dans Moreira-Turcq, 1999).

Les éléments traces seront analysés en spectrométrie ICPMS (Seyler et Elbaz_Poulighet, 1996) au laboratoire de Géochimie et Ressources minérales de l'Université de Brasilia et au LMTG à Toulouse. Une attention spéciale sera apportée au cas du mercure, au niveau du prélèvement et du stockage (utilisation exclusive du Teflon et d'acides bi-distillés), et de l'analyse (Maurice-Bourgoin et al, 1999). Les espèces du Hg seront analysées par spectrométrie de fluorescence atomique à l'UQAM de Montréal (Convention avec l'Université de la Paz) ou au laboratoire de Géochimie de l'UnB. les progrès récents des techniques analytiques permettent de mesurer directement les différents composés du Hg dans l'environnement. Nous nous proposons de déterminer sur quelques points représentatifs le monométhylmercure, le diméthylmercure ainsi que le mercure volatil total. Sur la fraction particulaire, l'analyse des éléments traces par ICPAES et ICPMS après digestion totale en bombe Teflon, sera complétée par une analyse par fluorescence X. Le mercure particulaire sera analysé après digestion en milieu acide et réduction par SnCl_2 .

Les mécanismes d'adsorption seront estimés à partir d'expériences avec la matière organique dissoute et les particules minérales (alumine et minéraux naturels). La matière organique sera caractérisée à partir de l'identification des principaux groupes fonctionnels de la matière organique adsorbée sur l'alumine (spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier-FTIR) et quantifiée par analyse du carbone organique dissous avant et après les expériences d'adsorption. Cette étude sera très complémentaire de l'étude de la redistribution des éléments majeurs et traces et des colloïdes organiques à laquelle elle est associée. Afin de mieux caractériser l'origine du matériel particulaire (détritique, macrophytique, phytoplanctonique...), seront mesurés le $\delta^{13}\text{C}$, ^{15}N , la concentration en pigments et déterminés les rapports C/N. La détermination de la concentration des pigments dans l'eau et dans le sédiments (chlorophylle *a* et phaeopigments) nous permettra de connaître l'activité biologique (production) du système. Les pigments planctoniques sont en général originaires de l'activité phytoplanctonique alors que les pigments sédimentaires peuvent avoir plusieurs origines : production « in situ » microphytobenthique (vivante ou détritique), sédimentation du phytoplancton dégradé, autres matériaux allochtones dégradés (macrophytes, fécal pellets, particules d'origine continentale ou fluviale). La matière organique ainsi que la minérale sera caractérisée par la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier installée à l'US IRD « instruments analytiques » de Bondy et à l'UFRJ de Rio de Janeiro.

Une collaboration en cours de montage entre l'ANEEL et deux universités européennes (Université de Liège, M. Frankignoulle et Université de Bordeaux, H. Etcheber) devrait nous permettre de mesurer sur nos sites d'études, les flux de CO_2 entre l'eau et l'atmosphère. Le dioxyde de carbone est le principal responsable de l'effet de serre. A l'échelle globale Le rôle effectif des zones humides sur le cycle du carbone fait toujours l'objet de controverse scientifique. Alors que l'océan est proche de

l'équilibre avec l'atmosphère, les quelques données existantes semblent montrer que les zones humides jouent un rôle non négligeable comme source de CO₂ atmosphérique (Wollast, 1991).

3.4.3. Distribution des éléments dans les sédiments et taux de sédimentation

L'étude du flux de matière minérale et organique (carbone) vers le sédiment sera réalisée en parallèle à l'étude de la sédimentation au moyen de pièges à sédiments et de carottes. Les flux verticaux entre les eaux interstitielles et les eaux surnageantes seront appréhendés au moyen de piège à gel type « Piper ». Le taux de sédimentation sera calculé à partir des analyses du ²¹⁰Pb (voir supra). Dans ces carottes les éléments tels que Fe, Mn, Hg et le carbone organique seront dosés de manière finement sériée de manière à reconstituer un profil de concentrations sur quelques dizaines d'années. Les métaux et la matière organique seront dosés par les méthodes précédemment citées. La caractérisation de la matière organique dans les carottes permettra de reconnaître les changements récents de l'environnement. Ces données permettent aussi d'évaluer la décomposition de la matière organique dans la partie superficielle du sédiment. Les flux des éléments seront calculés à partir des concentrations, du taux de sédimentation et de la densité « in situ ».

De plus pour les carottes démontrant une accumulation continue nous réaliserons des profils finement sériés de « black carbon » [Cachier et al., 1989 ; Gustafsson et al., 1997]. Une comparaison des différents profils permettra de déterminer s'il existe des pics d'accumulation de « black carbon » synchrones dans la limite d'incertitude de nos datations (²¹⁰Pb). Ces pics indiqueraient des phases d'occurrence de grands incendies. Ces événements pourront être comparés avec les données de la variabilité climatique et notamment avec les phases d'El Niño. Le «Black carbon» est connu comme étant la fraction de carbone qui a été thermiquement altéré pendant les incendies de la végétation et reste dans l'environnement naturel pendant de longues périodes de temps atteignant l'échelle géologique.

3.4.4. Bilan de masse des éléments majeurs et traces dans les várzeas étudiées

Les bilans de masse seront calculés de façon classique en utilisant les équations de conservation de masse pour chacun des éléments. Pour la phase dissoute, sera pris en compte les modèles hydrologiques décrits ci-après, ainsi que les apports atmosphériques directs. Pour la phase particulaire, on calculera un bilan à partir des moyennes des concentrations mesurées et des débits solides mesurés sur un pas de temps mensuels. Les transferts entre phases seront calculés de façon à respecter les équations de conservation.

Chercheurs de l'UR impliqués

Patrick Seyler (IRD), Laurence Maurice-Bourgoin (IRD), Geraldo Boaventura (UnB), Patricia Moreira-Turcq (IRD), et Jérôme Viers (UPS).

Collaborations

- ✓ US IRD « Géosciences des environnements intertropicaux » Bondy [F. Leguennec]
- ✓ UR IRD “ Processus et bilans de transferts dans les formations superficielles de la zone intertropicale ” [E. Fritsch]
- ✓ UMR 5563 LMTG Toulouse
- ✓ UMR 5805 EPOC Bordeaux (Henri Etcheber et Jean Marie Jouannaeu)
- ✓ UPMC Paris (Marc Benedetti et Thierry Allard)
- ✓ UQAM Montréal (Marc Roulet)
- ✓ UFRJ Rio de Janeiro

- ✓ UFF Niteroi

Moyens analytiques

- ✓ Eléments majeurs : Chromatographie ionique liquide, colorimétrie, et absorption atomique (US IRD Bondy)
- ✓ Carbone organique : Spectrométrie infra-rouge (US IRD Bondy, UMR Bordeaux et UFF Niteroi)
- ✓ Eléments traces : ICP-MS (UMR Toulouse et UnB Brasília)
- ✓ Fe, Al : GFAAS (US IRD Bondy)
- ✓ Hg : Spectrométrie de fluorescence atomique (UQAM Montréal)
- ✓ MéthylHg : HPLC (UFRJ Rio de Janeiro)

3.5. ACTION 5 : MODELISATION GLOBALE DISTRIBUEE

L'objectif de la modélisation hydrologique, hydrodynamique et sédimentologique du bassin et du réseau hydrographique de l'Amazone est double :

- d'une part articuler entre elles les connaissances disciplinaires (climatologie, hydrologie, géochimie, géodynamique,...) que l'on a du fonctionnement actuel du système Amazonien, et tester leur cohérence à la fois entre elles et sur différentes échelles d'espace et de temps,
- d'autre part fournir un outil de simulation permettant de projeter dans le passé ou le futur notre connaissance du fonctionnement actuel du bassin : un tel outil permettrait ainsi d'évaluer le fonctionnement à long terme du bassin sous des conditions différentes de relief (tectonique), de niveau de la mer, de régime climatique ou encore d'évolution anthropique du couvert végétal.

3.5.1. Modélisation hydrologique

La finalité de la modélisation hydrologique est de formaliser, quantifier et simuler de manière spatialisée les processus de transformation des pluies en débits et flux d'évaporation sur l'ensemble du bassin.

Chantier

L'ensemble du bassin amazonien.

Moyens et données

L'équipe proposante a constitué au cours des programmes antérieurs (PHICAB, HIBAM) une chronique des pluies et débits sur une longue période (25 ans) dans un emboîtement de plus de 250 sous-bassins du Bassin Amazonien. La base de données est maintenant consolidée et a permis de mettre en évidence les réponses " moyennes " (hydrogrammes et régimes hydriques) caractérisant les principaux types de sous-bassins [Guyot et al., 1999].

Méthodes

La proposition de l'Unité de Recherche " Géodynamique Actuelle des Grands Bassins Fluviaux Tropicaux " est de se baser sur cette connaissance pour développer une analyse de la variabilité spatiale et temporelle des réponses de l'ensemble des bassins. Cette analyse spatialisée s'appuiera sur un Système d'Information Géographique en cours de constitution. La modélisation hydrologique proprement dite pourra se faire :

- soit par couplage du SIG avec des modèles existants à travers les extensions Spatial Analyst et Hydrologic Modeling du logiciel Arc View, les fonctionnalités du Spatial Modeler d'ERDAS Imagine et les software CRWR-PrePro, HEC-HMS 1.0 and HEC-RAS 2.1 développés par

l'Université du Texas, Center for Research in Water Resources, Austin, Texas [Maidment et al., 1997 ; Eid, 1998 ; Olivera, 1999]. Cette approche présente l'avantage de bénéficier d'un environnement informatique déjà prêt.

- soit par le développement de modèles déterministes à réservoirs, avec lois de dynamique interne à ces réservoirs et lois d'échange entre réservoirs. Ces modèles sont a priori plus aptes que les modèles conceptuels (hydrogramme unitaire,...) à intégrer la formalisation des processus physiques (évaporation, production ou transformation géochimiques, dynamique des sédiments,...). Ils seront ensuite couplés au SIG pour une modélisation d'ensemble du système.

Les deux approches seront menées en parallèle de façon à analyser leur intérêt respectif et leur complémentarité. La modélisation de l'ensemble du bassin sera construite de manière classique par agrégation de modèles de sous-bassins (échelle méso-bassins). Elle se fera en 4 étapes :

1. Sur les sous-bassins où l'ensemble des données sont disponibles (station hydrométrique avec loi d'étalonnage en sortie) on effectue le calage des modèles et l'on détermine ainsi les valeurs des paramètres.
2. On analyse alors la corrélation entre les valeurs de paramètres obtenues par calage et les variables d'état de ces sous-bassins (relief, géologie, sols, végétation). On établit des " lois de paramétrage " permettant de calculer a priori la valeur des paramètres à partir de la connaissance physique des sous-bassins.
3. Sur les sous-bassins où l'on ne dispose pas de toute l'information, on calcule les valeurs des paramètres du modèle en utilisant les lois de paramétrage définies à l'étape 2. On généralise ainsi le modèle à l'ensemble des sous-bassins.
4. Enfin on agrège les modèles de sous-bassins en intégrant une représentation simplifiée du transfert des hydrogrammes dans le réseau hydrographique (retard et diffusion)

Chercheurs de l'UR impliqués

Nestor Campana (UnB), Nabil Eid (UnB), Edison Heredia (INAMHI), Jean Loup Guyot (IRD) et Pascal Kosuth (IRD)

Collaborations

Parallèlement à cette démarche classique de modélisation des sous-bassins vers le bassin, on s'intéressera à l'influence de l'échelle d'espace et de temps sur les variables explicatives des paramètres du modèle. Cette partie de l'étude réunira l'UR GBFT et l'US ESPACE (Frédérique Seyler).

3.5.2. Modélisation hydrodynamique

La finalité de la modélisation hydrodynamique est de reconstituer les chroniques de débits et de niveaux en tous points du réseau hydrographique pour un scénario de débits amonts et de conditions aval, la géométrie du réseau étant supposée connue.

La capacité de transport de matières en suspension par un écoulement dépend de ses caractéristiques hydrodynamiques : niveau de l'eau, champ de vitesses, contrainte de cisaillement au fond,... Ces caractéristiques varient dans le temps (cycle annuel, changements climatiques) et dans l'espace (amont-aval). La compréhension de l'hydrodynamique du Fleuve Amazone (lit mineur et lit majeur) est donc un préalable à la compréhension de sa dynamique sédimentaire. Il est à noter que l'hydrodynamique du Fleuve Amazone est très particulière avec une décrue plus précoce à l'aval qu'à l'amont, une vitesse de descente des eaux plus forte que la vitesse de montée, une influence des conditions aval (océan) remontant sur plus de 1000 km, une géomorphologie fluviale très marquée et différenciée spatialement (méandres), un rôle important du lit majeur.

Chantiers

L'ensemble du réseau hydrographique du bassin amazonien.

Méthodes

La démarche de modélisation sera déterministe, utilisant une résolution complète des équations de Saint-Venant en régime transitoire (conservations de la masse et de la quantité de mouvement exprimées en variables de niveaux et débits). Le réseau hydrographique (~6000 km) sera représenté de manière monodimensionnelle. Le recours au bi- voire tri-dimensionnel ne se justifiant que pour des études plus localisées (par exemple l'estuaire). Le tronçon Manaus – Obidos incluant une partie du Madeira sera pris comme tronçon de développement et de test de la démarche en calage et validation. Le modèle sera ensuite étendu à l'ensemble du réseau hydrographique.

Comme signalé plus haut l'acquisition d'une information, actuellement manquante, d'altimétrie par rapport au niveau de la mer est un pré-requis. Les autres données (bathymétrie, niveaux et débits) sont disponibles mais un travail particulier sur les étalonnages est à prévoir.

La prise en compte correcte du lit majeur sera une des difficultés prévisibles de la modélisation. Pour cela on comparera des formalismes où les zones d'inondation sont individualisées et des formalismes où elles sont intégrées dans une géométrie moyenne du lit majeur. La première approche présente l'avantage de fournir une représentation fidèle de la dynamique (remplissage, vidange) des zones d'inondation, mais l'inconvénient de nécessiter à l'échelle du réseau hydrographique un ensemble de données non disponibles

Chercheurs de l'UR impliqués

Pascal Kosuth (IRD), Carlos Tucci (UFRGS).

Collaborations

Cette modélisation sera menée en collaboration étroite avec le CEMAGREF en France, et l'UFRGS au Brésil.

Moyens et données

- ✓ Banques de données existantes des services nationaux partenaires (hauteur d'eau et débit, à pas de temps journalier). Ces services nationaux sont : l'ANEEL (Brésil), l'IDEAM (Colombie), l'INAMHI (Equateur), le SENAMHI (Bolivie et Pérou), et le MARN (Venezuela).

3.5.3. Modélisation sédimentologique

La finalité de la modélisation sédimentologique est de simuler d'une part les processus de production (érosion) de sédiments et solutés à l'échelle des sous-bassins et d'autre part les processus de transport, dépôt et érosion sédimentaire dans le réseau hydrographique, de façon à reconstituer, pour un scénario hydrologique donné, des chroniques de charge solide et de dépôt en tous points du réseau hydrographique.

Chantiers

L'ensemble du bassin amazonien pour l'étude des processus de production, et le réseau hydrographique pour les processus de transport par les fleuves.

Méthodes

Pour les processus de production à l'échelle des bassins on comparera sur des données spatialisées des approches conceptuelles (type fonctions de transfert) ou semi-empiriques (Wishmeier). Ces modèles seront confrontés aux données de débits solides en sortie des quelques sous-bassins faisant l'objet d'un suivi. On analysera dans les deux cas la variabilité des paramètres en fonction des variables d'état des sous-bassins (relief, sols, végétation,...).

Pour les processus de transport, dépôt et érosion dans le réseau hydrographique, deux formalismes sont habituellement employés :

- L'utilisation d'une loi de concentration à l'équilibre (différentes équations où interviennent la granulométrie et les caractéristiques hydrodynamiques moyennes de l'écoulement) permettant de calculer la capacité de transport moyenne de l'écoulement pour une période et un tronçon donné, couplée à une loi de chargement qui indique (selon que la concentration solide à l'amont est supérieure ou inférieure à cette concentration à l'équilibre) le rythme de dépôt ou d'érosion le long du tronçon. Le travail dans ce formalisme consiste à choisir ces deux lois et à caler leurs paramètres.
- L'utilisation d'une équation de convection diffusion (deux paramètres) dont la résolution numérique est effectuée en parallèle de la résolution des équations hydrodynamiques.

En raison du caractère transitoire de l'écoulement et du manque d'uniformité de l'amont vers l'aval (géométrie et affluents) on envisage d'avoir préférentiellement recours au second formalisme. La prise en compte du lit majeur (zones d'inondation) fera l'objet de travaux spécifiques pour décider du meilleur formalisme à adopter (individualisation des zones d'inondation ou adoption d'une géométrie moyenne du lit majeur).

Il est important d'être lucides sur la précision actuelle des modèles sédimentologiques (100% de précision est souvent un résultat extrêmement apprécié). On attendra donc surtout d'eux un support à l'analyse des cycles temporels et des zones de dépôts ou de reprise.

Chercheurs de l'UR impliqués

Pascal Kosuth (IRD), Rui Vieira (UFRJ), Carlos Tucci (UFRGS) et Naziano Filizola (doctorant UPS).

Collaborations

Ces travaux de modélisation seront menés en collaboration étroite avec le CEMAGREF et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), ainsi que les partenaires brésiliens de l'UFRGS et l'UFRJ.

4 LES PARTENARIATS ET L'INSERTION DU PROJET

L'Unité de Recherche " GBFT " rassemble des chercheurs ayant travaillé dans les bassins de l'Amazone (Programmes PHICAB et HIBAM), du Congo, et du Sénégal, et qui ont déjà tissé un large réseau de collaborations nationales et internationales.

4.1. Les collaborations avec d'autres unités de recherche et de service de l'IRD

Du fait de liens anciens, de thématiques voisines sur les mêmes chantiers (le cas du bassin amazonien), des collaborations sont attendues avec d'autres unités de recherche (UR) et de service (US) de l'Institut de Recherche pour le Développement, comme :

- i. l'UR « Déformation de la lithosphère continentale et transferts de matière en zone de convergence » [G. Hérail],
- ii. l'UR " Processus d'altération et de pédogenèse et bilans de transferts dans la géosphère tropicale " [E. Fritsch],
- iii. l'UR « Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales. Indicateurs Climatiques et Environnementaux » [P. Ribstein],
- iv. l'US « Expertise et Spatialisation des connaissances en Environnement » [F. Huynh],
- v. l'US « Géosciences des environnements intertropicaux » [F. Leguennec].

Le détail de ces collaborations est donné dans le descriptif des actions de recherche.

4.2. Les programmes inter organismes français

Jusqu'en 1998, le programme HIBAM (Hydrologie et Géochimie du Bassin Amazonien) participait au programme national PROSE (Programme de Recherche Sols et Erosion), faisant suite au programme PEGI-GBF (Programme d'étude de l'Environnement de la Géosphère Intertropicale – Grands Bassins Fluviaux). Ces activités de recherche en commun ont permis de nouer des liens étroits avec de nombreuses universités françaises : Montpellier (participation à l'UMR GBE), Bordeaux, Paris VI, Toulon, Lyon, Perpignan, ainsi que le LPCM de Villefranche sur Mer.

En 1999, la proposition conjointe des géologues et hydrologues sur la thématique " Tectonique, érosion et sédimentation dans le bassin de l'Amazone " [Baby, 1999], a été acceptée au Programme National de recherche Sols et Erosion (PNSE). Cette proposition associe à l'IRD les universités de Toulouse et Bordeaux.

De même en 1999 deux projets ont été soumis au Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS), l'un sur l'utilisation de l'altimétrie satellitale (ERS, Topex Poséidon) sur les plans d'eau continentaux en collaboration avec le CNES et le GRGS [Kosuth, 1999], l'autre sur l'utilisation de la télédétection pour quantifier la turbidité de surface des fleuves tropicaux, en collaboration avec l'Université de Bordeaux [Seyler, 1999].

Par ailleurs des collaborations sont déjà engagées dans le domaine de la modélisation hydrologique, hydrodynamique et sédimentologique avec le CEMAGREF (Hydrologie – Hydraulique, Lyon, Montpellier, Antony) et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT).

Enfin, signalons que l'Unité de Recherche " GBFT " reçoit le soutien financier (bourses pour étudiants) de l'IFEA (Institut Français d'Études Andines), pour ses activités en Équateur.

4.3. Les programmes binationaux franco-brésilien

L'Unité de Recherche "GBFT" a proposé divers projets de recherche aux appels d'offre l'accord CAPES-COFECUB. Le projet

- ✓ "Nature et bilan des transferts géochimiques dans le Bassin de l'Amazone" [IRD, Universités de Brasilia, Montpellier et Bordeaux]

est en cours de prolongation, et deux projets nouveaux ont été déposés :

- ✓ "Étude couplée du modèle de géoïde et de l'altimétrie satellitale pour l'analyse de la ligne d'eau du Fleuve Amazone [IRD, ESGT, Universités de São Paulo et Paris VI]
- ✓ "Modélisation du transport sédimentaire dans le bassin amazonien" [IRD, Universités de Rio de Janeiro et Toulouse].

4.4. Les programmes internationaux

L'Unité de Recherche "GBFT" participera, dans la continuité du programme HIBAM, aux programmes internationaux suivants :

- i. Andean Amazon Rivers Analysis and Monitoring (AARAM), qui s'intéresse à l'hydrologie, aux flux de matières et à la biogéochimie des bassins versants andins du bassin de l'Amazone, et de l'impact de l'anthropisation de ces régions [McClain, 1998]. Il s'agit d'un projet associant la Colombie (IDEAM, ULA), l'Equateur (INAMHI, EPN), le Pérou (UALM), la Bolivie (SENAMHI, UMSA), les USA (IAI, UW, FIU) et la France (IRD).
- ii. Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment (LBA), qui est un projet global de modélisation du fonctionnement Biosphère – Hydrosphère – Atmosphère de l'ensemble du bassin de l'Amazone, associant de très nombreux groupes de recherches nord et sud américains et européens, sur financement de la NASA, de la CEE et du Brésil. LBA fait partie intégrante du volet BAHC de l'IGBP. La participation effective de l'UR pour l'hydrologie de surface devra être renforcée au sein de ce projet LBA.
- iii. EcoHydrology – PHI V de l'UNESCO, qui étudie les interactions entre l'écologie des fleuves et l'hydrologie.
- iv. Land Use and Climate Impacts on Fluvial Systems during the Period of Agriculture (LUCIFS), qui est un programme du volet PAGES de l'IGBP, dont l'objectif est d'apprécier l'impact des variations climatiques et de l'anthropisation sur les flux de sédiments et de nutriments dans une vingtaine de grands bassins fluviaux [Wasson et al., 1998].

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES

- Aalto R., Dunne T., Guyot J.L. 1998. Geomorphic controls of erosion rates in the Bolivian Andes. In *Hillslope and Fluvial Processes*, 1998 AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Aalto R., Dunne T., Guyot J.L. 1999. Geomorphic Controls on Andean Denudation Rates. In *Hydrological and Geochemical Process in Large-scale River Basins*, Manaus'99 Symposium, Manaus, 16-19 Nov. 1999.
- Abasto N. 1993. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Madre de Dios, 71-79. In *Seminario sobre el PHICAB*, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 1 : surface climate, *Mon. Wea. Rev.*, 116, 505-524.
- Akagi H., Kinjo Y., Branches F., Malm O., Harada M., Pfeiffer W.C., and Kato H., 1994. Methylmercury pollution in Tapajos River basin, Amazon. *Env. Sc.*, 3(1):25-32.
- Alhers, W.W., Reid, M.R., Kim, J.P. & Hunter, K.A., 1990. Contamination-free sample collection and handling protocols for trace elements in natural freshwaters. *Austr. J. Mar. Freshwater Res.* 41, 713-720.
- Aliaga A. 1993. Balance hídrico de Bolivia, 107-116. In *Seminario sobre el PHICAB*, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Amarasekera K.N., Lee R.F., Williams E.R., Eltahir E.A.B. 1997. ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers. *Journal of Hydrology*, 200: 24-39.
- Amoros C., Petts G.E. 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Masson, Paris, 300 p.
- Baby P. 1999. Tectonique, érosion et sédimentation dans le bassin de l'Amazone: du Mio-Pliocène à l'Actuel. Proposition de recherche au Programme National de recherche Sols et Erosion, PNSE, 17 p.
- Baby P., Rochat P., Mascle G., Hérial G. 1997. Neogene shortening contribution to crustal thickening in the back arc of the Central Andes. *Geology*, 25(10): 883-886.
- Barbosa A.C., Boischio A.A., East G.A., Ferrari I, Goncalves A., Silva P.R.M. and da Cruz T.M.E., 1995. Mercury contamination in the Brazilian Amazon. Environmental and occupational aspects. *Water, Air and Soil Pollution*, 80: 109-121.
- Baumgartner A., Reichel E. 1975. The world water balance. Elsevier, 179 p.
- Benedetti, M.; Boulegue, J.; Mounier, S.; Benaim, J.; Filizola, N.; Seyler, P. 1999. Metal ions transport by colloids in the Amazon Basin In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brésil.
- Benjamin M.T., Johnson N.M., Naeser C.W. 1987. Recent rapid uplift in the Bolivian Andes : evidence from fission-track dating. *Geology*, 15 : 680-683.
- Berner E. K. & Berner R. 1987. The global water cycle, Geochemistry and Environment. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 397 pp.
- Berner R. A. 1995. Chemical weathering and its effect on atmospheric CO₂ and climate. In: A.F. White and S.L. Brantley (Editors), Chemical weathering rates of silicate minerals. Min. Soc. of America, *Reviews in Mineralogy*, 31, pp. 565-583.
- Bernoux M., Seyler F., Cerri C.C. (soumis). Spatial variability patterns of superficial soil moisture in tropical soil (Rondônia, Brazil) under natural forest and pasture. *Hydrological Processes*.
- Birkett C.M. 1998. Contribution of the TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands. *Water Resource Research*, 34(5): 1223-1239.
- Bourges J., Guyot J.L., Carrasco M., Barragan M.C., Cortes J. 1990. Evolution spatio-temporelle des débits et des matières particulaires sur un bassin des Andes boliviennes : le Rio Béni, 352-356. In *Hydrology in Mountainous Regions*, H. Lang & A. Musy (eds.), IAHS Publ. 193.
- Bourges J., Hoorelbecke R. 1995. Variation du régime des écoulements dans le système Ando-Amazorien de Bolivie, 471-487. In *Régionalisation en hydrologie*, Le Barbe L. & Servat E. (eds.), ORSTOM.
- Bourges J., Hoorelbecke R., Cortez J., Carrasco L.M. 1993. Los regímenes hidrológicos de la cuenca amazónica de Bolivia, 125-134. In *Seminario sobre el PHICAB*, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Bourges J., Ribstein P., Dietze C., Guyot J.L., Hoorelbeck R. 1995. Flux et crues singulières d'un petit cours d'eau andin ou les effets pervers de l'urbanisation. *Revue de Géographie Alpine*, 1995/1 : 111-126.

- Bourrel L., Philipps L. & Moreau S., 1999 : Dinámica de las inundaciones en la cuenca Amazónica boliviana con un enfoque conjunto de la hidrología i de la percepción remota; Proc. ***Symposium Internacional : Hydrological and Geochemical Processes in Large-Scale Basins***, Manaus, Brasil, 16 al 19 de Noviembre de 1999.
- Bricquet J.P., Mahé G., Bamba F., Diarra M., Mahieux A., Des Tureaux T., Orange D., Picouet C., Olivry J.C. 1997. Erosion et transport particulaire par le Niger, du bassin supérieur à l'exutoire du delta intérieur, 335-346. ***In Regional Hydrology: concepts and models for sustainable water resource management***, Postojna, IAHS Publ. 246.
- Brown E.T., Stallard R.F., Larsen M.C., Raisbeck G.M., Yiou F. 1995. Denudation rates determined from the accumulation of in situ produced ¹⁰Be in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico. ***Earth and Planetary Science Letters***, 129: 193-202.
- Brown, E. T., Edmond, J. M>, Raisbeck, G. M., Yiou, F., Kurtz, M. D. 1991. Examination of surface exposure ages od Antarctic moraines using in-situ produced 10Be and 26Al. ***Geochim. Cosmochim. Acta***, 55, 2269-2283
- Cachier, H., Bremond, M.-P. et Buat-Ménard, P. 1989. Determination of atmospheric soot carbon with a simple thermal method. ***Tellus*** 41b : 379-390.
- Callède J. 1998. Nivellement et détermination d'un géoïde gravimétrique en Amazonie. Projet d'étude, HiBAm, Brasilia, 3 p.
- Callède J., Claudino L.J. 1987. Coopération Franco-Brésilienne en Amazonie : transmission par satellite des hauteurs d'eau de l'Amazonie et de ses affluents, 7 p. In ***Colloque sur la télémessure et la transmission des données hydrologiques***, OMM, Toulouse, Mars 1987.
- Callède J., Claudino L.J., Fonseca V. 1986. Transmission par satellite des hauteurs d'eau de l'Amazonie et de ses affluents. ***Hydrologie Continentale***, 1(2) : 95-110.
- Callède J., Guyot J.L., Molinier M., Guimarães V.S., Oliveira E., Filizola N. 1997 La variabilité des débits de l'Amazonie à Óbidos (Amazonas, Brésil). 163-172. In ***Sustainability of Water Resources under increasing uncertainty***, IAHS, Rabat, April-May 1997.
- Callède J., Oliveira O., Guimarães V.S., Rodrigues M. 1996. Use of satellite communication of hydrometric data for the whole of Brazil. ***Hydrological Sciences Journal***, 41(6) : 903-913.
- Campos J.B., Peña J. 1993. Estudio climatológico de la cuenca andina del Río Beni, 33-40. In ***Seminario sobre el PHICAB***, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Cappelaere B., Lubès H., Guyot J.L., Berkoff C., Thépaut H., Molinier M., Oliveira E. 1996. Prévision des crues de l'Amazonie, 355-366. In ***L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement***, Paris, Mai 1995. IAHS Publ. 238.
- Cappelaere B., Paturel J.E., Servat E., Guyot J.L. 1997. Prévision des crues de grands fleuves tropicaux : exemples de l'Amazonie (Brésil) et du Chari (Tchad). In ***Flow forecasting under conditions of limited data***, IAHS, Rabat, April-May 1997.
- Carrasco L.M., Bourges J. 1993. Estudio del régimen del escurrimiento superficial en la cuenca andina del Río Beni, 41-49. In ***Seminario sobre el PHICAB***, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Coquery M., 1994. Biogéochimie du mercure en milieu estuarien et côtier. Thèse de doctorat de l'Université de Paris 6, 212 pages.
- Cortez J., Mendoza J. 1993. Red hidrométrica de Bolivia y banco de datos, 117-124. In ***Seminario sobre el PHICAB***, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Cossa D., Coquery M., Gobeil C., Martin J.-M., 1996. Mercury fluxes at the ocean margins. W. Bayens et als (Eds.), ***Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances***, pp. 229-247.
- Cossa, D., Sanjuan, J., Cloud, J., Stockwell, P.B. and Corns, W., 1995. Automated technique for mercury determination at sub-nanogram per litre levels in natural waters. ***J. Anal. At. Spectrom.***, 10:287-291.
- Courau P., 1983. Dosage du mercure minéral dissous. In: ***Manuel des analyses chimiques en milieu marin***, Aminot A., Chaussepied M. (Eds), IFREMER (ex-CNEXO), pp. 227-241.
- Cruz C. 1993. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Itenez, 69. In ***Seminario sobre el PHICAB***, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Curtis W.F., Meade R.H., Nordin C.F., Price N.B., Sholkovitz E.R. 1979. Non uniform vertical distribution of fine sediment in the Amazon river. ***Nature***, 280(5721): 381-383.
- De Brem P. and Maurice-Bourgoin L., 1997. Bolivie : Les risques du mercure. ***Eurêka***, 20:40-45.
- Degens E.T., Kempe S., Richey J.E., 1991. Biogeochemistry of major world rivers, 323-347. In ***Biogeochemistry of major world rivers***, SCOPE, 42, Degens E.T., Kempe S. & Richey J.E? (eds.). J. Wiley.

- DNAEE-ORSTOM. 1992. Mapa de Disponibilidade hídrica do Brasil. Carte des ressources hydriques du Brésil, Publ. DNAEE-CGRH, Brasília.
- DNAEE-ORSTOM. 1993. Mapa de Isoietas médias anuais do Brasil. Carte de précipitation moyenne du Brésil. Publ. DNAEE-CGRH, Brasília.
- DNAEE-ORSTOM. 1994. Mapa de disponibilidade hídrica da Bacia Amazônica do Brasil. Publ. DNAEE-CGRH Brasília.
- Drever J. I. 1994. The effect of land plant on weathering rates of silicate minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 2325-2332.
- Drever J.I. & Clow D.W. 1995. Weathering rates in catchments. In: A.F. White and S.L. Brantley (Editors), Chemical weathering rates of silicate minerals. Min. Soc. of America, *Reviews in Mineralogy*, 31, pp. 463-483.
- Dumont J.F. 1994. Neotectonics and rivers of the Amazon headwaters, 103-113. In *The variability of large alluvial rivers*, Schumm S.A. & Winkley B.R. (eds.), ASCE Press, New York.
- Dunne T., Mertes L.A.K., Meade R.H., Richey J.E., Forsberg B.R. 1998. Exchanges of sediment transport between the floodplain and channel of the Amazon river in Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 110(4): 450-467.
- Dupre B., Gaillardet J., Rousseau D. & Allègre C. J. 1996. Major and trace element of river-borne material: the Congo Basin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 1301-1321.
- Edmond J. M., Palmer M. R., Measures C. I., Grant B. & Stallard R. F. 1995. The fluvial geochemistry and denudation rate of the Guayana Shield in Venezuela, Colombia and Brazil. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 3301-3325.
- Eid N. 1998. Simulação Mensal do Escoamento Superficial na Sub-bacia Amazônica do Rio Negro em Curicuriari. Post Doc, Université du Texas, Austin.
- Elbaz-Poulichet F., Seyler P., Maurice-Bourgoin L., Guyot J.L., Dupuy C. 1999. Trace element geochemistry in the upper Amazon drainage basin (Bolivia). *Chemical Geology*, 157, 319-334.
- Ertel, J.R.; Hedges, J.I; Devol, A. H.; Richey, J.E. 1986. Dissolved humic substances of the Amazon River system. *Limnol. Oceanography*, 31: 739-754
- Filizola N. 1999. O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Bacia Amazônica brasileira. Publ. ANEEL, Brasília, 63 p.
- Filizola N., Guyot J.L. 1996. Medição do fluxo de sedimentos com correntômetro por efeito Doppler (ADCP) na bacia amazônica, 149-157. In *II Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*, ABRH, Rio de Janeiro, Set. de 1996.
- Filizola N., Guyot J.L., Boaventura G. 1999. Fluxo de sedimentos em suspensão na Amazônia - uma análise a partir da base de dados da ANEEL. In *Hydrological and Geochemical Process in Large-scale River Basins*, Manaus'99 Symposium, Manaus, 16-19 Nov. 1999.
- Fitzgerald W., 1995. Is mercury increasing in the atmosphere ? The need for an atmospheric mercury network (AMNET). *Water, Air and Soil Pollution*, 80: 245-254.
- Forsberg, B.R., Devol, A.H., Richey, J.E., Martinelli, L.A. et Santos, H. (1988). Factors controlling nutrient concentrations in Amazon floodplain lakes. *Limnology Oceanography*. 33(1) : 41-56.
- France Lanord C., Derry L. A. & Galy A. 1998. Continental erosion and CO₂ uptake. Interferences of the Hymalayan system (V. M. Goldschmitt Conf., Toulouse). *Miner. Mag.* 62, 466-467.
- France-Lanord et Derry L. A. 1997. Organic carbon burial forcing of the carbon cycle from Hymalayan erosion. *Nature* 390, 65-67.
- Fritsch J.M. 1993. The hydrological effects of clearing tropical rainforest and of the implementation of alternative land uses, 53-66. In *Hydrology of Warm Humid Regions*, J.S. Gladwell (Ed.), IAHS Pub. No 216.
- Gaillardet J., Dupré B. & Allègre C. J. 1995. A global geochemical mass budget applied to the Congo Basin rivers: Erosion rates and continental crust composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 3469-3485.
- Gaillardet J., Dupré B., Allègre C.J., Négrel P. 1997. Chemical and physical denudation in the Amazon river basin. *Chemical Geology*, 142: 141-173.
- Gaillardet J., Dupré B., Louvat P. & Allègre C. J. 1999. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers soumis à *Chem. Geol.*
- Gerard, M.; Seyler, P.; Sondag, F.; Boaventura, Benedetti, M. 1999. Rare earth elements in the Amazon basin: Encontro das águas. In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brésil.

- Gibbs R.J. 1967. Amazon River: Environmental Factors that control its dissolved and suspended load. *Science*, 156 : 1734-1737.
- Gibbs R.J. 1967. The Geochemistry of the Amazon River System. Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geological Society of America Bulletin* 78 : 1203-1232.
- Gibbs R.J. 1972. Water Chemistry of the Amazon River. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 36 : 1061-1066.
- Gibbs R.J. 1973. Mechanisms of Trace Metal Transport in Rivers. *Science* 180 : 71-73.
- Gibbs R.J. 1977. Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon Rivers. *Geological Society of America Bulletin* 88 : 829-843.
- Goswami D.C. 1985. Brahmaputra river, Assam, India : physiography, basin denudation, and channel aggradation. *Water Resources Research*, 21(7) : 959-978.
- Guimarães V., Cudo K.J., Callède J. 1993. Os avanços da gestão da rede hidrométrica brasileira através da telemetria por satélite, 219-226. In *X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Gramado, Novembro de 1993, Anais 4.
- Guimarães V., Cudo K.J., Callède J. 1995. Os avanços da gestão da rede hidrométrica Brasileira através da telemetria por satélite. *A Água em Revista*, 3(4) : 21-25. CPRM, Rio de Janeiro.
- Guimarães V., Guyot J.L., Filizola N., Oliveira E. 1997. O uso do ADCP (correntômetro de perfilagem acústico por efeito Doppler) para medição de vazão e estimativa do fluxo de sedimentos nos grandes rios da bacia amazônica, 545-552. In *XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Anais 1, ABRH, Vitória, Nov. de 1997.
- Guimarães V., Jacon G. 1983. Calibragem em estações fluviométricas da bacia amazônica. Aplicação do método Gradiente Linimétrico, 473-481. In *V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, ABRH, Blumenau, Novembro de 1983, Anais 1.
- Gustafsson, O., Haghseta, F., Chan, C., MacFarlane, J. et Gschwend, P.M. 1997. Quantification of the dilute sedimentary soot phase : implications for PAH speciation and bioavailability. *Environmental Science Technology*, 31 : 203-209.
- Guyot J.L. 1993. Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Collection Etudes & Thèses, ORSTOM, Paris, 261 p.
- Guyot J.L. 1998. HiBAm Equateur: proposition d'un programme de recherche sur l'hydrologie, la géochimie et les bilans sédimentaires du bassin amazonien d'Equateur. Publ. HiBAm, Brasília, 16 p.
- Guyot J.L., Calle H. 1990. Utilisation de mesures journalières de la turbidité pour l'estimation des flux de matières en suspension. L'exemple des fleuves andins de Bolivie, 271-274. In *Hydrology in Mountainous Regions*, H. Lang & A. Musy (eds.), IAHS Publ. 193.
- Guyot J.L., Calle H., Cortes J., Pereira M. 1990. Transport de matières dissoutes et particulaires des Andes vers le Rio de La Plata par les tributaires boliviens (rios Pilcomayo et Bermejo) du Rio Paraguay. *Hydrological Sciences Journal*, 35(6) : 653-665.
- Guyot J.L., Callède J., Molinier M., Guimarães V., Oliveira E. 1997. La variabilité des débits des principaux fleuves du bassin amazonien, 286-293. In *Climatic and hydrological effects of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) events at the regional and local scales*, Quito, Nov. 1997.
- Guyot J.L., Callède J., Molinier M., Guimarães V., Oliveira E. 1998. La variabilité hydrologique actuelle dans le bassin de l'Amazone, *Bull. Inst. fr. études andines*, 27(3), 779-788.
- Guyot J.L., Conceição S., Guimarães V., dos Santos J.B., Longuinhos R. 1995. Mediçãõ de vazãõ com ADCP - Primeiros resultados na bacia Amazônica. *A Água em Revista*, 3(4) : 26-30. CPRM, Rio de Janeiro.
- Guyot J.L., Filizola N., Guimarães V. 1998. Amazon suspended sediment yield measurements using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP): First results, 109-115. In *Hydrology in the Humid Tropic Environment*, Kingston, November 1996, IAHS Publ. 253.
- Guyot J.L., Filizola N., Quintanilla J., Cortez J. 1996. Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon, 55-63. In *Erosion and Sediment yield : Global and Regional Perspectives*, Exeter, July 1996. IAHS Publ. 236.
- Guyot J.L., Jouanneau J.M., Wasson J.G. 1999. River bed and suspended sediment granulometry in the Rio Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia). *Journal of South American Earth Sciences*, 12 : 401-410
- Guyot J.L., Molinier M., Oliveira E., Cudo K.J., Guimarães V. 1994. Nouveautés sur les débits monstrueux de l'Amazone. *Revue de Géographie Alpine*, 12 : 77-83.
- Guyot J.L., Molinier M., Oliveira, Cudo K.J., Guimarães V.S. 1993. Balanço hídrico do Rio Negro, 535-544. In *X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Gramado, Novembro de 1993, Anais 2.

- Guyot J.L., Roche M.A., Noriega L., Calle H., Quintanilla J. 1990. Salinities and Sediment Transport in the Bolivian Highlands. *Journal of Hydrology*, 113 : 147-162.
- Hasänen E. 1977. Dating of sediments based on ^{210}Pb measurements. *Radiochemical Radioanalytical letters*, 31(4-5): 207-214.
- Hedges, J.I., Cowie, G.L., Richey, J.E., Quay, P.D., Benner, R., Strom, M. et Forsberg, B. R. 1994. Origins and processing of organic matter in the Amazon River as indicated by carbohydrates and amino acids. *Limnology and Oceanography*, 39(4) : 743-761.
- Hentschel, T. and Priester, M., 1991. Contaminación por mercurio en países en vía de desarrollo por amalgamación de oro de la pequeña minería y técnicas alternativas para el procesamiento. Projekt-Consult, Königstein, Deutschland.
- Hérail G. 2000. Déformation de la lithosphère continentale et transferts de matière en zone de convergence. Projet d'UR IRD, 40 p.
- Hérail G., Oller J., Baby P., Bohomme M. G. et Soler P. 1996. The Tupiza, Nazareno and Estarca basins (Bolivia): Strike-slip faulting and related basins in the Cenozoic evolution of the southern branch of the Bolivian Orocline. *Tectonophysics*, 259, p. 201-212.
- Herbas C. 1993. Climatología de la cuenca del Río Grande, 59-67. In *Seminario sobre el PHICAB*, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Hiez G., Cochonneau G., Séchet P., Fernandes U.M. 1992. Application de la méthode du vecteur régional à l'analyse de la pluviométrie annuelle du bassin amazonien. *Veille Climatique Satellitaire*, 43 : 39-52.
- Hiez G., Rancan L. 1983. Aplicação do método do vetor regional no Brasil, 205-227. In *V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, ABRH, Blumenau, Novembro de 1983, Anais 3.
- Hiez G., Rancan L., Barros M.C., Pedrollo O. 1987. Le vecteur régional et les fluctuations climatiques, 101-116. In *Journées Hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier.
- Hoorn C., Guerrero J., Sarmiento G.A., Lorente M.A. 1995. Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology*, 23(3): 237-240.
- Huynh F. 2000. ESPACE Expertise et Spatialisation des connaissances en Environnement, Projet d'US IRD.
- Jaccon G. 1987. Jaugeage de l'Amazone à Óbidos par les méthodes du bateau mobile et des grands fleuves. *Hydrologie Continentale*, 2(2) : 117-126.
- Jaccon G., Cudo K.J. 1987. Calibragem de posto fluviométrico : roteiro, cuidados e recomendações, 279-288. In *VII Simpósio de recursos hídricos*, ABRH, Salvador, Novembro de 1987, Anais 2.
- Jaccon G., Cudo K.J. 1987. Medições de descarga líquida dos rios Solimões e Amazonas pelo método do barco em movimento, 358-368. In *VII Simpósio de recursos hídricos*, ABRH, Salvador, Novembro de 1987, Anais 2.
- Jaccon G., Guimarães V. 1985. Pesquisas hidrológicas no Rio Solimões. In *VI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, São Paulo, Novembro de 1995.
- Junk W.J. 1997. General aspects of the floodplain ecology with special reference to amazonian floodplains, 3-20. In *The central Amazon floodplain, Ecology of a pulsing system*. Junk W.J. (ed.), Ecological Studies 126, Springer.
- Junk W.J., Bayley P.B., Sparks R.E. 1989. The flood pulse concept in river floodplain systems, 110-127. In *International Large River Symposium*, Dodge D.P. (ed.). Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 106.
- Kayano, M.T., Rao, T.V., et Moura, A., 1988. Tropical circulation and the associated rainfall anomalies during two contrasting years. *J. Climat.*, 8, 477-488.
- Koblinsky C.J., Clarke R.T., Brenner A.C., Frey H. 1993. Measurement of river level variations with satellite altimetry. *Water Resource Research*, 29(6): 1839-1848.
- Koide M., Bruland K.W., Goldberg E.D. 1973. Th-228/Th-232 and Pb-210 geochronologies in marine and lakes sediments. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 37 : 1171-1187.
- Kosuth P. 1997. Application des techniques de traitement du signal et de modélisation mathématique à l'analyse des données hydrologiques et géochimiques du Bassin de l'Amazone. Projet de recherche, 3 p.
- Kosuth P. 1999c. Développement de l'altimétrie satellitaire radar pour le suivi hydrologique des plans d'eau continentaux : application au réseau hydrographique de l'Amazone. Projet PNTS, 19 p.
- Kosuth P., 1999a. Mise en œuvre des méthodes d'altimétrie satellitaire sur le Fleuve Amazone: campagnes de GPS bifréquence, cartographie de l'écart ellipsoïde – géoïde, analyse des données de l'altimétrie satellitaire radar. Projet de recherche, 27 p.
- Kosuth P., 1999b. Modélisation hydrologique, hydrodynamique et sédimentologique du bassin et du réseau hydrographique de l'Amazone. Projet de recherche dans le cadre d'un poste d'accueil IRD, 13 p.

- Kosuth P., Filizola N. 1998. Effets de la marée sur l'évolution des niveaux et des débits du fleuve Amazone à l'aval d'Óbidos. Publ. HiBAm, Brasilia, 12 p.
- Kosuth, P.; Callède, J. Laraque, A.; Filizola, N.; Guyot, J.L.; Seyler, P.; Fritsch, J. M. 1999. Influence de la marée océanique sur le cours aval de l'Amazone. In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brésil.
- Kousky V.E., Kayano M.T., Cavalcanti I.F.A. 1984. A review of Southern Oscillation : oceanic, atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. *Tellus*, 36(A) :490-504.
- Krishnaswamy S., Lal D., Martin J.M., Meybeck M. 1971. Geochronology of lakes sediments. *Earth and Planetary Sc. Letters*, 11 : 407-414.
- Küchler I.L., Miekeley N. And Forsberg B. R., 1994. Molecular mass distributions of dissolved organic carbon and associated metals in waters from Rio Negro and Rio Solimões. *Sci. of Total Env.*, 156:207-216.
- Lacerda D. L., Pfeiffer W. C., Teixeira Ott A. and da Silveira E. G., 1989. Mercury Contamination in the Madeira River, Amazon - Hg Inputs to the Environment. *Biotropica*, 21 (1): 91-93.
- Lacerda D.L., 1995. Amazon mercury emissions. *Nature*, 374: 20-21.
- Lal, D., Arnold., J. 1987. In situ cosmogenic ³h, ¹⁴C, and ¹⁰Be for determining the net accumulation and ablation rates of ice sheets. *J. Geophys. Res.*, 92, 4947-4952.
- Lal, D. 1991. Cosmic ray labelling of erosion surfaces: in-situ nuclide production rates and erosion models, *Earth and Planet. Sc. Letters*, 104, 424-439.
- Laraque A., Olivry J.C. 1996. Evolution de l'hydrologie du Congo Zaire et de ses affluents rive droite, et dynamique des transports solides et dissous, 271-288. In *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*, Chevallier P. & Pouyaud B. (eds.), Paris, Mai 1995. IAHS Publ. 238.
- Le Cointe P. 1903. Le bas Amazone. *Annales de Géographie*, 12: 54-66.
- Le Cointe P. 1935. Les crues annuelles de l'Amazone et les récentes modifications de leur régime. *Annales de Géographie*, 44: 614-619.
- LIDEMA, Liga de Defensa del medio ambiente, 1993. Estudio de impacto ambiental por la explotación de oro en la region de Nueva Esperanza, Araras, del departamento de Pando, La Paz, Bolivia, 175 p.
- Maidment D.R., Reed S.M., Akmansov S., McKinney D.C., Olivera F., Ye Z. 1997. Digital atlas of the world water balance. Center for Research in water Resources, University of Texas at Austin.
- Malm O., Branches F.J.P., Akagi H., Castro M.B., Pfeiffer W. C., Harada M., Bastos W.R., & Kato H. 1995. Mercury and methylmercury in fish and human hair from the Tapajós river basin, Brazil. *Sci. Total Environ.* 175, 141-150.
- Malm O., Pfeiffer W. C., Souza C. M. M. and Reuther R., 1990. Mercury Pollution Due to Gold Mining in the Madeira River Basin, Brazil. *Ambio*, 19 (1): 11-15.
- Maneux E. 1998. Erosion mécanique des sols et transports fluviaux de matières en suspension : application des systèmes d'information géographique dans les bassins versants de l'Adour, de la Dordogne et de la Garonne. Thèse de l'Université de Bordeaux I, 251 p.
- Marengo J. 1995. Variations and change in South American streamflow. *Climatic Change*, 31 : 99-117.
- Marengo J., Hastenrath S. 1993. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. *Journal of Climate*, 6 : 617-627.
- Martin J.M., Meybeck M. 1979. Elemental mass balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*, 7: 173-206.
- Martinelli L.A., Ferreira J.R., Forsberg B.R., Victoria R.L. 1988. Mercury contamination in the Amazon: A Gold Rush Consequence. *Ambio*, 17 : 252-254. Martinelli L.A., Ferreira J.R., Forsberg B.R., Victoria R.L. 1988. Mercury contamination in the Amazon: A Gold Rush Consequence. *Ambio*, 17 : 252-254.
- Masek J.G., Isacks B.L., Gubbels T.L., Fielding E.J. 1994. Erosion and tectonics at the margins of continental plateaus. *Journal of Geophysical Research*, 99(7): 13941-13956.
- Mason R. P., Fitzgerald W. F. and Morel F. F. M., 1994. The biogeochemical cycling of elemental mercury: Anthropogenic influences. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (15): 3191-3198.
- Maurice-Bourgoin L., Guyot J.L., Seyler P., Courau P., Filizola N. and Quintanilla J., 1997. Répartition des teneurs en mercure dans les eaux de surface du bassin du Madeira, des Andes à l'Amazone. *Freshwater contamination (Webb B. Ed.)*, IAHS Pub. 243:85-92.
- Maurice-Bourgoin L., Quémerais B., Guyot J.L., Laraque A. and Seyler P., 1999. Transport and behaviour of total mercury in the Amazon River at the confluence of black and white waters. In: *Hydrological and geochemical processes in large scale river basins*, Manaus, November, 15-19, 1999, Brazil.

- Maurice-Bourgoin L., Quiroga I., Chincheros J. and Courau P., in press. Mercury distribution in waters and fishes of the Upper Madeira rivers and mercury exposure in riparian Amazonian populations. *The Science of Total Environment*
- Maurice-Bourgoin L., Quiroga I., Guyot J.L. and Malm O., 1999. Mercury pollution due to the gold-mining in the upper Beni River basin, Bolivia. *Ambio*, Vol. 28(4) :302-306.
- McClain M. 1998. Andean Amazon Rivers Analysis and Monitoring (AARAM) Project. Proposal IAI.
- Meade R.H. 1994. Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. *Quaternary International*, 21: 29-39.
- Meade R.H., Dunne T., Richey J.E., Santos U.M., Salati E. 1985. Storage and Remobilization of suspended Sediment in the lower Amazon River of Brazil. *Science* 228 : 488-490.
- Meade R.H., Nordin C.F., Curtis W.F., Costa Rodrigues F.M., Do Vale C.M., Edmond J.M. 1979. Sediment loads in the Amazon River. *Nature* 278 : 161-163.
- Meade R.H., Rayol J.M., Conceição S.C., Natividade J.R.G. 1991. Backwater effects in the Amazon river basin of Brazil. *Environ. Geol. Water Sci.*, 18(2) : 105-114.
- Melack, J.M. 1984. Amazon floodplain lakes: shape, fetch, and stratification. *Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verch.* 22:1278-1281
- Mertes L.A.K. 1994. Rates of flood plain sedimentation on the central Amazon river. *Geology*, 22: 171-174.
- Mertes L.A.K., Dunne T., Martinelli L.A. 1996. Channel floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon river, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 108(9): 1089-1107.
- Mertes L.A.K., Smith M.O., Adams J.B. 1993. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon river wetlands from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 43: 281-301.
- Meybeck M. 1994. Origin and variable composition of present day riverborne material. in Material Fluxes on the Surface of the Earth. *Studies in Geophysics*, pp 61-73.
- Milliman J.D., Meade R.H. 1983. World wide delivery of river sediment to the ocean. *Journal of Geology*, 91(1): 1-21.
- Milliman J.D., Syvitzki J.P.M. 1992. Geomorphic / tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology*, 100: 525-544.
- Molinier M. 1995. Régionalisation des débits du bassin amazonien. In *Régionalisation en hydrologie*, Le Barbe L., Servat E. (eds), ORSTOM, Montpellier, Sept. 92.
- Molinier M., Guyot J.L., Bourges J., Hoorelbecke R., Cortes J., Guimarães V. 1995. Le régime hydrologique du Rio Madeira des Andes boliviennes à l'Amazonie brésilienne, 261-262. In *Aguas, Glaciares y Cambios Climáticos en los Andes Tropicales*, La Paz, Junio 1995.
- Molinier M., Guyot J.L., Callède J., Guimarães V., Oliveira E., Filizola N. 1997. Hydrologie du bassin amazonien, 24-41. In *Environnement et développement en Amazonie brésilienne*, Théry H. (ed.), Publ. Belin, Paris.
- Molinier M., Guyot J.L., Callède J., Oliveira, Guimarães V., Cudo K.J., Aquino M. de. 1993. Hidrología de la cuenca amazónica brasileña: HIBAM. Primeros resultados sobre la cuenca del Río Madeira, 155-164. In *Seminario sobre el PHICAB*, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Molinier M., Guyot J.L., Guimarães V.S., Oliveira E. 1999. La variabilité hydrologique du bassin amazonien et la circulation atmosphérique océanique. In *Hydrological and Geochemical Process in Large-scale River Basins*, Manaus'99 Symposium, Manaus, 16-19 Nov. 1999.
- Molinier M., Guyot J.L., Oliveira de E., Guimarães V. 1996. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents, 209-222. In *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*, Chevallier P. & Pouyaud B. (eds.), Paris, Mai 1995. IAHS Publ. 238.
- Molinier M., Guyot J.L., Oliveira E., Guimarães V., Chaves A. 1995. Hydrologie du bassin de l'Amazone, 335-344. In *Grands Bassins Fluviaux Périallantiques*, PEGI, Paris, Nov. 1993.
- Molinier M., Guyot J.L., Oliveira, Guimarães V., Chaves A. 1994. Hidrologia da Bacia do Rio Amazonas. *A Água em Revista*, 2(3) : 31-36. CPRM, Rio de Janeiro.
- Molinier M., Maia A.C. da S., Santos D.F dos. 1991. Balanço hídrico da bacia amazônica. Metodologia e primeiros resultados, 158-167. In *IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Rio de Janeiro, Anais 1.
- Moreira-Turcq, P.F., Seyler, P., Guyot, J.L. et Etcheber, H. 1999. Characterization of suspended particulates and dissolved adsorbed organic matter in Amazon river. In : *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*. Novembre 1999, Manaus, Brésil.

- Nittrouer C.A., Kuehl S.A., Sternberg R.W., Figueiredo A.G., Faria L.E.C. 1995. An introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*, 125: 177-192.
- Nriagu J.O., 1989. *Nature*, 338:47-49.
- Nriagu J.O., 1996. A history of global metal pollution. *Science*, 272:223-224.
- Nriagu J.O., Pfeiffer W.C., Malm O., de Souza C.M.M., and Mierlf G., 1992. Mercury pollution in Brazil. *Nature*, 356:389.
- Nriagu, J.O., 1993. Mercury pollution from silver mining in colonial South America. In: *Proceedings. Perspectives for Environmental geochemistry in Tropical Countries Niteroi, Brazil*. Abrão, J.J., Wasserman, J.C., and Silva-Filho, E.V., (Eds), pp. 365-368.
- Oliveira, Cudo K.J., Aquino M. de, Guimarães V. 1993. A operação da rede hidrometeorológica da região amazônica, 237-246. In *X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Gramado, Nov. 1993, Vol. 4.
- Olivera F. 1999. Hydrologic modeling using GIS. Center for Research in water Resources, University of Texas at Austin.
- Olivry J.C., Bricquet J.P., Laraque A., Guyot J.L., Bourges J., Roche M.A. 1995. Flux liquides, dissous, et particulaires de deux grands bassins intertropicaux : le Congo à Brazzaville et le Rio Madeira à Villabella, 345-355. In *Grands Bassins Fluviaux Périalantiques*, Olivry J.C. & Boulègue J. (eds.), PEGI, Paris, Nov. 1993.
- Olivry J.C., Bricquet J.P., Thiébaux J.P., Sigha N. 1988. Transport de matières sur les grands fleuves des régions intertropicales : les premiers résultats des mesures de flux particulaires sur le bassin du fleuve Congo, 509-521. In *Sediment Budgets*, Bordas M.P. & Walling D.E. (eds.), IAHS Publ. 174.
- Oltman R.E. 1968. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon. *U.S. Geological Survey Circ.*, 552, 16 P.
- Oltman R.E., Sternberg H.O.R., Ames F.C., Davis L.C. 1964. Amazon river investigations reconnaissance measurements of July 1963. *U.S. Geological Survey Circ.*, 486, 15 p.
- Pardé M. 1936. Les variations saisonnières de l'Amazone. *Annales de Géographie*, 45: 502-511.
- Pardé M. 1954. Sur le régime et spécialement sur les variations saisonnières des cours d'eau brésiliens. *La Houille Blanche*, 823-846.
- Patel N., Mounier S., Guyot J.L., Benamou C., and Benaim J.Y., 1999. Fluxes of dissolved and colloidal organic carbon along the Purus and Amazonas rivers (Brazil). *Sci. of Total Env.*, 229:53-64.
- Patel N., Mounier S., Guyot J.L., Benamou C., Benaim J.Y. 1999. Behaviour of a little Solimões's tributary: the Purus. In *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*. Manaus, Nov. 1999.
- Pérez Suasnavas, V.P. 1998. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Napo, Ecuador. Proyecto de Maestria, Universidad Central del Ecuador.
- Pfeiffer, W.C., Lacerda, L.D., Salomons, W. and Malm, O., 1993. Environmental fate of mercury from gold-mining in the Brazilian Amazon. *Environ. Rev.*, 1:26-37.
- Picouet C., Hingray B., Olivry J.C. 1999. Essai de modélisation du régime du transport particulaire sur les fleuves tropicaux d'Afrique : le Niger supérieur. . In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brésil.
- Pinet P., Souriau M. 1988. Continental erosion and large scale relief. *Tectonics*, 7: 563-582.
- Pourchet M., Mourguiart P., Pinglot J.F., Preiss N., Argollo J., Wirrmann D. 1994. Sédimentation récente dans le lac Titicaca (Bolivie). *C.R. Académie des Sciences Paris*, 319(II): 535-541.
- Putz, R. 1997. Periphyton communities in Amazonian black- and whitewater habitats : Community structure, biomass and productivity. *Aquatic Science*, 59 : 74-93.
- Rao, V.B. et Hada, K., 1990. Characteristics of rainfall over Brazil : annual variations and connections with the Southern Oscillation. *Theor. Appl. Climatol.*, 42, 81-91.
- Richey J.E., Meade R.H., Salati E., Devol A.H., Nordin C.F., dos Santos U. 1986. Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon river. *Water Resources Research*, 22(5): 756-764.
- Richey J.E., Nobre C., Deser C. 1989. Amazon river discharge and climate variability, 1903 to 1985. *Science*, 246: 101-103.
- Richey, J.E. 1982. The Amazon river system : a biogeochemical model, 365-378. SCOPE, 52. *Mitt. Geol.-Paleont. Inst. Univ. Hamburg*.
- Ritchie J.C., McHenry J.R. 1990. Application of radioactive fallout Cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns : a review. *J. Environ. Qual.* 19: 215-233.

- Roche M.A. 1993. El Clima de Bolivia, 81-93. In *Seminario sobre el PHICAB*, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Roche M.A., Aliaga A., Campos J., Peña J., Cortes J., Rocha N. 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la cordillère des Andes boliviennes, 381-388. In *Hydrology in Mountainous Regions*, H. Lang & A. Musy (eds.), IAHS Publ. 193.
- Roche M.A., Aliaga A., Campos J., Peña J., Cortes J., Rocha N. 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la cordillère des Andes boliviennes, 381-388. In *Hydrology in Mountainous Regions*, H. Lang & A. Musy (eds.), IAHS Publ. 193.
- Roche M.A., Fernandez C. 1988. Water Resources, Salinity and Salt Yields of the Rivers of the Bolivian Amazon. *Journal of Hydrology*, 101 : 305-331.
- Roche M.A., Fernandez C. 1988. Water Resources, Salinity and Salt Yields of the Rivers of the Bolivian Amazon. *Journal of Hydrology* 101 : 305-331.
- Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. 1990. Mapa de precipitación anual de Bolivia, 1/5,000,000. Publ. PHICAB, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. 1990. Mapa de temperaturas anuales de Bolivia, 1/5,000,000. Publ. PHICAB, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez-Jáuregui C., Aliaga A., Bourges J., Cortes C., Guyot J.L., Peña J., Rocha N. 1991. Water and salt balances of the Bolivian Amazon, 83-94. In *Water Management of the Amazon Basin*, Braga B.P.F. & Fernandez-Jáuregui C. (eds.), Publ. UNESCO-ROSTLAC, Montevideo.
- Rodrigues M., Callède J., Guimarães V., Oliveira E. 1997. Rede telemétrica via satélite do DNAEE. In *XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Vitória, Nov. de 1997.
- Ronchail J. 1993. Funcionamiento de los surazos en América del Sur y efectos climáticos en Bolivia: algunos resultados, 95-105. In *Seminario sobre el PHICAB*, M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz (eds.), La Paz, Nov. 1992.
- Ronchail J. 1993. Winter cold advections in tropical South America : some results from ECMWF Data. In *Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*; Hobart, Australia, April 1993.
- Ronchail, J. , 1996. Variabilidad interannual de las precipitaciones en Bolivia. *Bull. Inst. Fr. Et. And.*, 24, 369-378.
- Ronchail, J., 1993: Winter cold advections in tropical and subtropical South America: some results from ECMWF data. Preprints for the *Fourth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, march 29-april 2 1993, Hobart, Tasmania, vol.4, pp. 264-265. Published by the American Meteorological Society, Boston, Mass.
- Ronchail, J., 1998. Variabilité pluviométrique en Bolivie lors des phases extrêmes de l' Oscillation Australe du Pacifique. *Bull. Inst. Fr. Et. And.*
- Roucou, P., 1997. Impact des températures de surface océanique d'échelle globale sur la dynamique de l'atmosphère et les précipitations tropicales en Amérique du Sud à l'Est des Andes : diagnostic et simulations numériques. Thèse de l'Université de Bourgogne/ ESA5080 CNRS, 199 p.
- Roulet M., and Lucotte M., 1995. Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferrallitic soils of a dense tropical forest in French Guiana. *Water, Air and Soil Pollution*, 80 :1079-1088.
- Roulet, M., Lucotte, M., Farella, N., Serique, G., Coelho, H., Sousa Passos, C.J., De Jesus da Silva, E., Scavone de Andrade, P., Mergler, D., Guimaraes, J.RD., and Armorim, M. (1999) Effects of recent human colonization on the presence of mercury in Amazonian ecosystems. *Water, Air and Soil Pollut.* 112, 297-313.
- Salati E., Marques J. 1984. Climatology of the Amazon region, 85-126. In *The Amazon, Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Schumm 1977. The Fluvial System. *J. Wiley*, New York, 338 p.
- Seyler F. 1999. Fonctions de correspondance entre la réflectance de l'eau et ses concentrations en matières terrigènes minérales et organiques. Exemple du cours de l'Amazone en vue de sa surveillance par télédétection spatiale. Projet au PNTS, 14 p.
- Seyler F. 2000. Approches spatiales des interactions Sol, Eau et Végétation. Participation au projet d'US ESPACE, 18 p.
- Seyler F. Bernoux M., Cerri C.C. 1998. Landsat TM image texture and moisture variations of the soil surface under rain forest of Rondônia (Brazil). *International Journal of Remote Sensing*, 19(2) : 1299-1317.
- Seyler F., Ávila C. (sous presse). Regionalização dos resultados do programa HiBAm. In *Seminário HiBAm*, Brasília, Outubro de 1997.

- Seyler P., Elbaz-Poulichet F. 1996. Biogeochemical control on the temporal variability of trace element concentrations in the Oubangui river. *Journal of Hydrology*, 180, 319-332.
- Seyler P., Guyot J.L. 1999. Régimes hydrologiques, nature et bilan des transferts géochimiques dans le bassin de l'Amazonie. Fiche Bilan PROSE, Brasilia, 14 p.
- Seyler P., Guyot J.L., Elbaz-Poulichet F., Filizola N., Boaventura G. 1998. Hydrological control on the temporal variability of trace element concentration in the Amazon river. In *Chemical and Physical Weathering, Goldschmidt Conference*, Dupré B. (ed.), Toulouse, Septembre 1998.
- Seyler, P., Guyot J.L., Maurice-Bourgoin L., Sondag F., Elbaz-Poulichet F., Etcheber H., Quintanilla J. 1999. Origin of trace elements in the Bolivian Amazonian drainage basin. In: *Hydrology in the Humid Tropic Environment*, (Johnson Y. Ed.), IAHS Pub. 248, 47-58.
- Seyler, P.; Boaventura G. 1999. How significant is the pollution of the Amazon Basin by Trace elements? In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brésil.
- Seyler, P.; Boaventura G.; Sondag, F.; Pineli Alves, V. 1999. Distribution and partition of trace elements in the Amazon Basin. In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brésil.
- Seyler, P.; Boaventura, G. R.(sous press) Trace metals in the mainstem river. In *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
- Shukla J., Nobre C., Sellers P. 1990. Amazon deforestation and climate change. *Science*, 247: 1322-1325.
- Sioli H. 1950. Das Wasser im Amazonasgebiet. *Forschungen und Fortschritte* 21/22 : 274-280.
- Sioli H. 1954. Gewässerchemie und Vorgänge in den Böden im Amazonasgebiet. *Naturwissenschaften* 19 : 456-457.
- Sioli H. 1957. Valores de pH de águas amazônicas. *Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi* 1 : 1-37.
- Sioli H. 1964. General features of the limnology of Amazonia. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 15 : 1053-1058.
- Sioli H. 1975. Amazon Tributaries and Drainage Basins, 199-213. In *Coupling of Land and Water Systems*, A.D. Hasler (ed.), Springer Verlag, New York.
- Sioli H. 1984. The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of river courses, and river types, 127-165. In *The Amazon*, Sioli H. (ed.), Junk.
- Soares L. 1997. Caractérisation géochimique et minéralogique des flux sédimentaires dans le bassin Amazonien du Brésil. Situation actuelle et évolution au cours des 100 dernières années. Projet de doctorat, cotutelle des universités de Bordeaux et Brasilia.
- Soares L., Jouanneau J.M., Boaventura G., Guyot J.L., Walling D. 1999. Variabilidade das taxas de sedimentação na várzea de Óbidos. In *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*. Manaus, Nov. 1999.
- Stallard R. F. 1995a. Relating chemical and physical erosion. In: A.F. White and S.L. Brantley (Editors), Chemical weathering rates of silicate minerals. Min. Soc. of America, *Reviews in Mineralogy*, 31, pp. 543-562.
- Stallard R. F. 1995b. Tectonic, environmental and human aspects of weathering and erosion : a global review using a steady-state perspective. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 23, 11-39.
- Stallard R. F. and Edmond J. M., 1981. Geochemistry of the Amazon: 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge. *Journal of Geophysical Research*, 86 (10): 9844-9858.
- Stallard R. F., Koehnken L. & Johnsson M. J. 1991. Weathering processes and the composition of inorganic material transported through the Orinoco River system, Venezuela and Colombia. *Geoderma* 51, 133-165.
- Stallard R.F., Edmond J.M. 1983. Geochemistry of the Amazon. 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal of Geophysical Research* 88(14) : 9671-9688.
- Stallard R.F., Edmond J.M. 1987. Geochemistry of the Amazon. 3. Weathering chemistry and limits to dissolved inputs. *Journal of Geophysical Research* 92 : 8293-8302.
- Stallard, 1988. Weathering and erosion in the humid tropics, 225-246. In *Physical and chemical weathering in geochemical cycles*. Meybeck et Lerman (eds.). Kluwer Academic Press.
- Stallard, R.F. 1980. Major element geochemistry in the Amazon River system, PhD. Thesis, 1980, MIT-WHO Joint program in Oceanography, WHO-80-29, 366pp.
- Sternberg H.O'R. 1995. Waters and wetlands of Brazilian Amazonia: an uncertain future, 113-179. In *The fragile tropics of Latin America: sustainable management of changing environments*, Nishizawa T. & Uitto J.I. (eds.), United Nations University Press, Tokyo.

- Summerfield M.A., Hulton N.J. 1994. Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 99: 13871-13883.
- Trimble, S. W. 1977. The fallacy of stream equilibrium in contemporary denudation studies. *Am. J. Sci.* 277: 976-879
- Uvo C.B. 1998. Influence of sea surface temperature on rainfall and runoff in northeastern south America: analysing and modelling. Department of water resources Engineering, Lund, 78 p.
- Vandal G.M., Fitzgerald W.F., Boutron C.F. and Candelone J.P., 1993. Variations in mercury deposition to Antarctica over the past 34,000 years. *Nature*, 362:621-623.
- Veiga M. M., Meech J. A., and Opaté N., 1994. *Nature*, 368: 816-817.
- Vieira da Silva R.C., Goulart Pecly J.O. 1999. Distribuição vertical de velocidades e concentrações de sedimentos no rio Solimões. In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brésil.
- Vieira da Silva R.C., Leao De Moraes Novo E.M., Goulart Pecly J.O. 1999. Potencialidades do uso de satélites para o monitoramento da concentração de sedimentos no rio Amazonas. In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins*, Nov., 15-19, 1999, Manaus, Brésil.
- Walling D.E., He Q. 1994. Rates of overbank sedimentation on the flood plains of several British rivers during the 100 years, 203-210. In *Variability in stream erosion and sediment transport*, IAHS, Canberra, Dec. 1994.
- Walling D.E., Webb B.W. 1985. Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers, some cautionary comments. *Marine Pollution Bulletin*, 16(12): 488-492.
- Wasson R.J., Walling D.E., Sidorchuk A.Y. 1998. Land use and climate impacts on fluvial systems during the period of agriculture. IGBP-PAGES Project, 10 p.
- White A. T. & Blum A. E. 1995. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 1729-1747.
- Wicherek S., Veyret Y., Bernard C. 1994. L'utilisation du Césium 137 pour la connaissance de la dégradation des sols. *Mém. Soc. géol. France*, 162: 261-268.

6. FIGURES

Figure 1

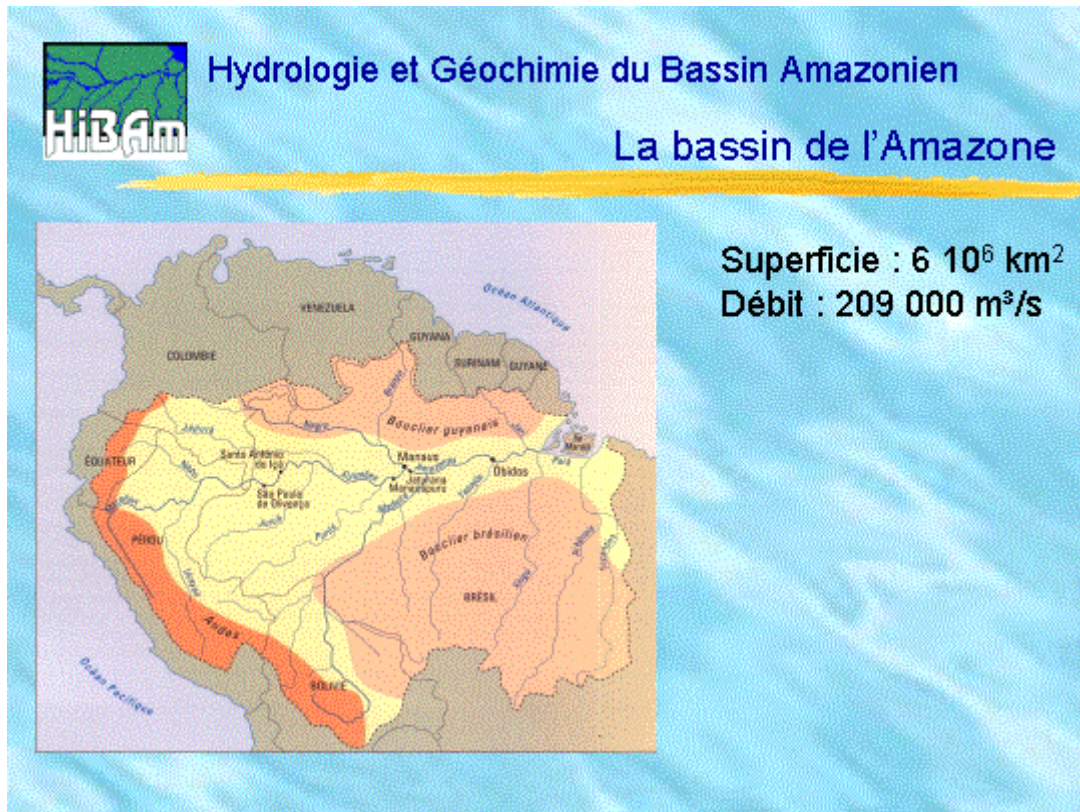


Figure 2

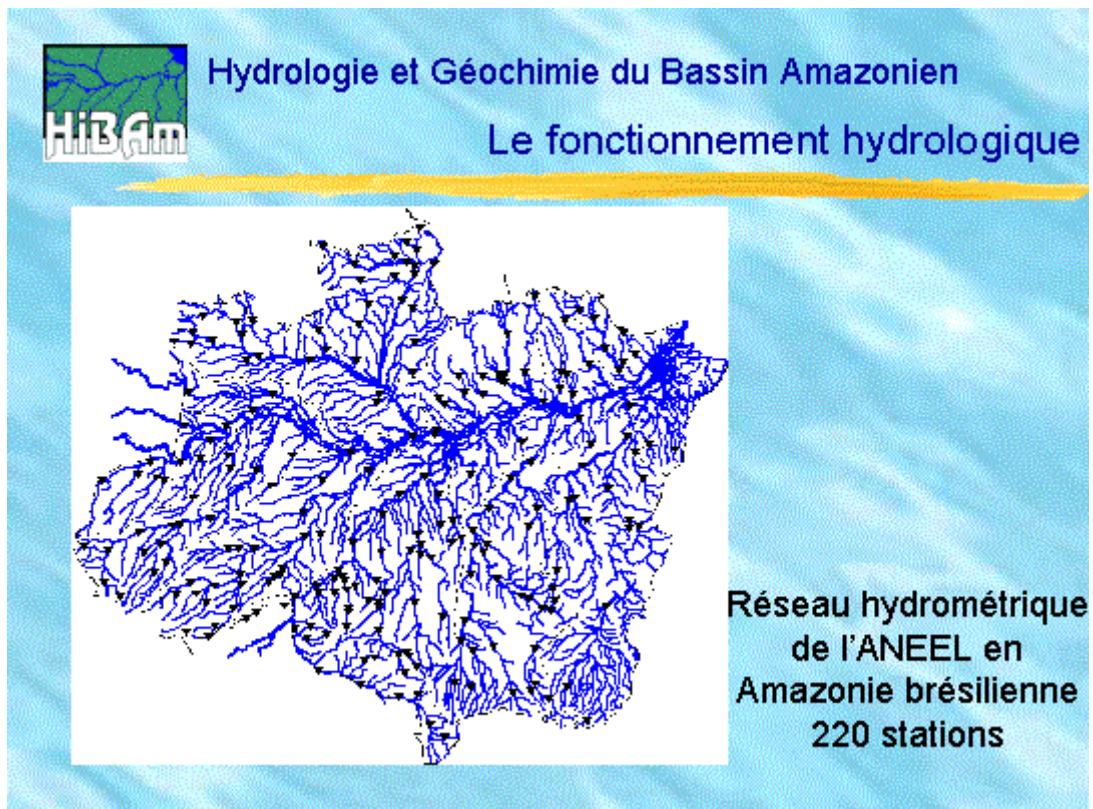


Figure 3

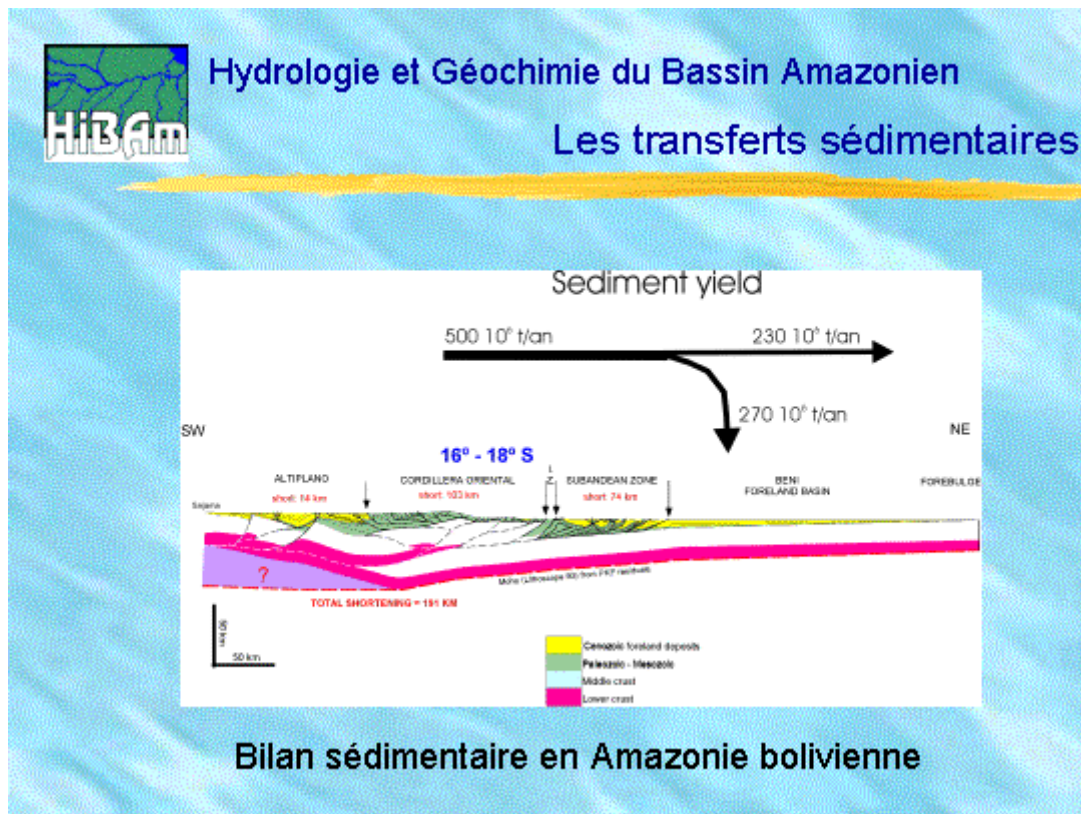


Figure 4.

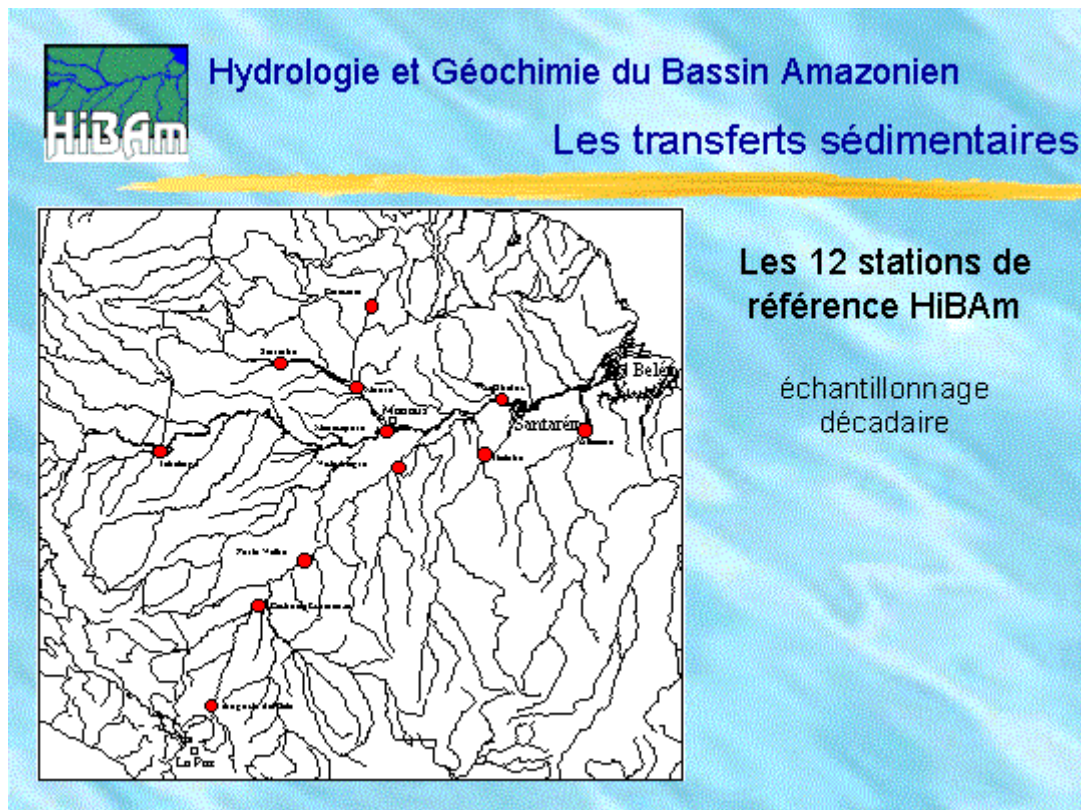


Figure 5. La várzea de Lago Grande de Curuaí, près de Óbidos.

