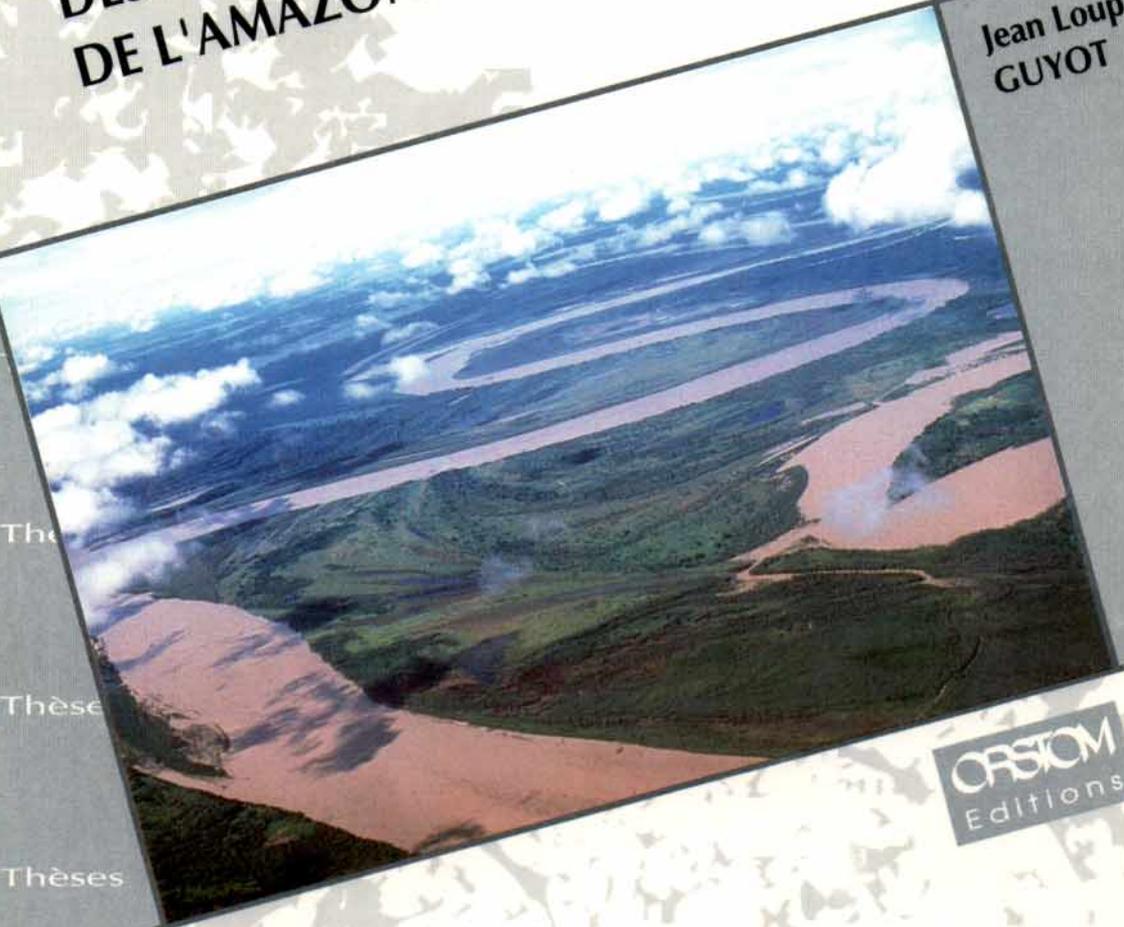




# HYDROGÉOCHIMIE DES FLEUVES DE L'AMAZONIE BOLIVIENNE

Jean Loup  
GUYOT



CRISTOM  
Editions

Jean Loup GUYOT

**HYDROGÉOCHIMIE  
DES FLEUVES  
DE L'AMAZONIE BOLIVIENNE**

---

**Editions de l'ORSTOM**

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

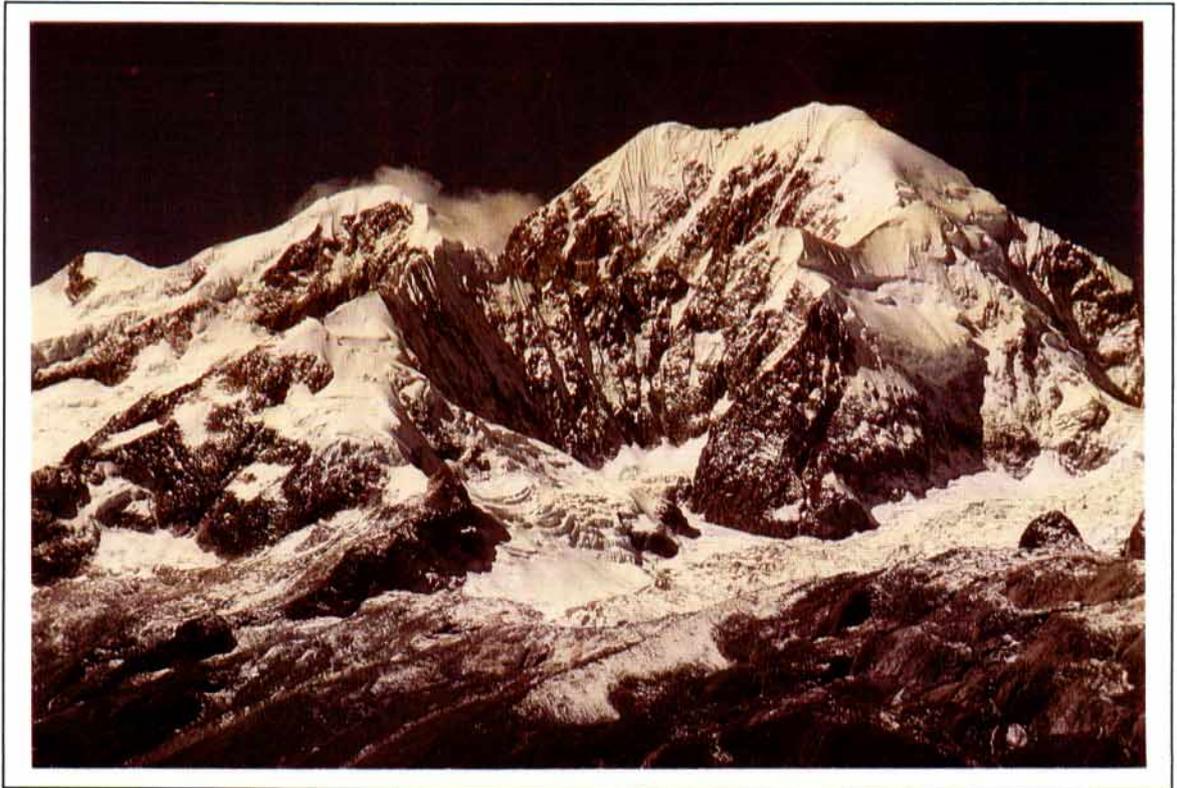
Collection **ÉTUDES et THÈSES**

PARIS 1993

Cet ouvrage a fait l'objet d'une thèse de doctorat d'État,  
(spécialité : géologie, géochimie),  
soutenue le 12 juin 1992, à l'université de Bordeaux I.

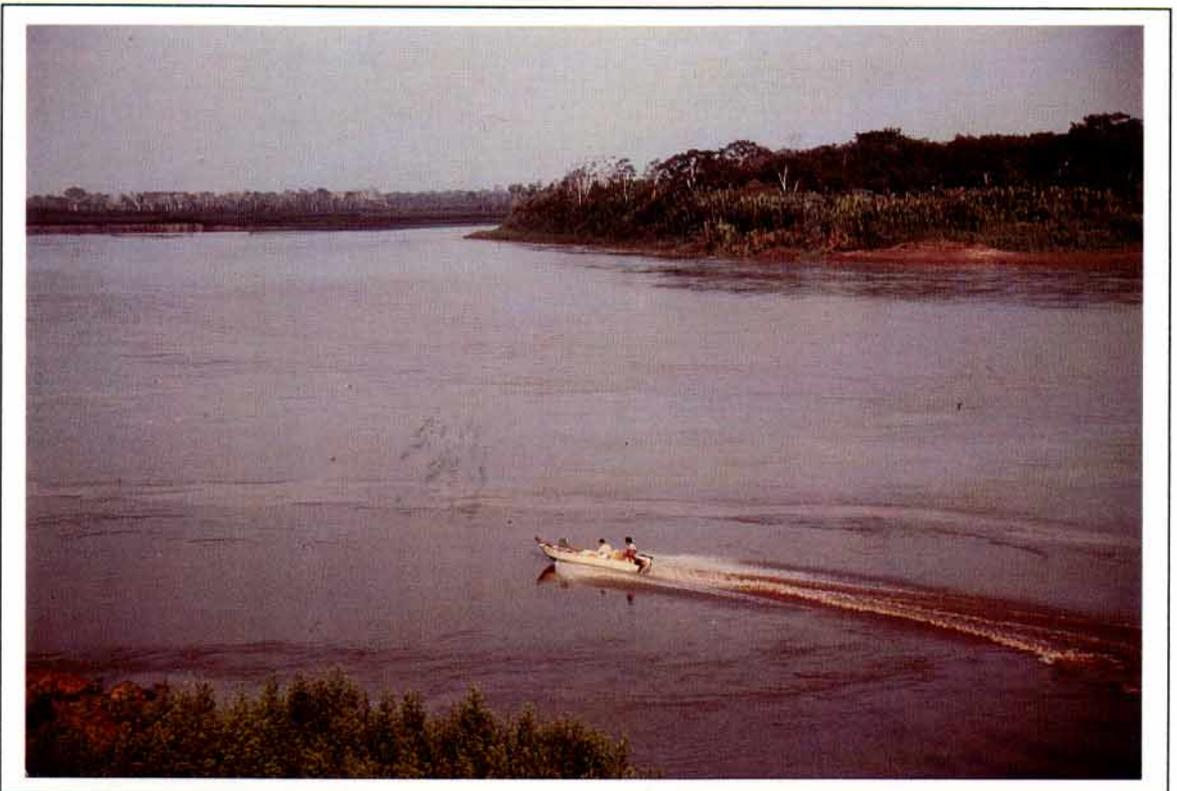
La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.



↑ Photo 1 : L'Illampu (6420 m) près de Sorata, Cordillère Royale.  
*El Illampu cerca de Sorata, Cordillera Real. The Illampu near Sorata, Real Cordillera.*

↓ Photo 2 : Le Río Madre de Dios à la station de Miraflores (130 m).  
*El Río Madre de Dios en la estación de Miraflores. The Madre de Dios river station of Miraflores.*



## SOMMAIRE

Remerciements .....	p. 7
Résumé, Resumen, Resumo, Abstract .....	p. 9
<b>Introduction .....</b>	<b>p. 17</b>
<b>1. Le bassin amazonien .....</b>	<b>p. 19</b>
<b>2. Le programme PHICAB dans le bassin du Rio Madeira .....</b>	<b>p. 39</b>
<b>3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella (Bolivie) .....</b>	<b>p. 47</b>
<b>4. La recherche d'une méthode .....</b>	<b>p. 89</b>
<b>5. Les matières particulaires .....</b>	<b>p. 109</b>
<b>6. Les matières dissoutes .....</b>	<b>p. 165</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>p. 217</b>
Références bibliographiques .....	p. 223
Cartes utilisées .....	p. 247
Liste des figures .....	p.249
Liste des tableaux .....	p.255
Liste des photographies .....	p.257
Table des matières .....	p. 259

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mes collègues hydrologues de l'ORSTOM en Bolivie, pour leur soutien constant durant 5 années : Jacques BOURGES & Robert HOORELBECKE. Je suis particulièrement reconnaissant à Michel Alain ROCHE, co-directeur du PHICAB, pour son accueil au sein de l'équipe PHICAB, et qui a bien voulu être l'un des rapporteurs de ce travail. J'ai également apprécié la collaboration climatologique de Josyane RONCHAIL (IFEA,LMD) lors de sa participation au programme PHICAB. Je remercie tout le personnel de la mission ORSTOM en Bolivie pour son accueil chaleureux, et son aide constante.

Cette étude n'aurait pas été réalisable sans la réelle coopération du SENAMHI. Je suis donc très reconnaissant envers Mario CANEDO et Carlos DIAZ (directeurs du SENAMHI et du PHICAB), ainsi que Nestor ABASTO et José CORTEZ (Chefs du service hydrologique). Je tiens à remercier tout particulièrement Héctor CALLE ainsi que le personnel du laboratoire du SENAMHI de El Alto, pour leur énorme travail d'analyses et de préparation des échantillons. Je remercie également Oscar FUENTES, Hubert GALLARDO & Luis NORIEGA pour leur participation aux campagnes d'échantillonnage.

L'engagement sans faille de Jorge QUINTANILLA, directeur de l'IIQ-UMSA, dans cette étude a permis au programme de créer une banque de données hydrochimiques considérable, encore largement inexploitée. Je le remercie, ainsi que Moises CALLICONDE, Johnny MARTINEZ & Romulo GEMIO pour les innombrables déterminations physico-chimiques.

Partenaire privilégié du PHICAB, l'IHH-UMSA a également apporté sa pierre à l'édifice, avec notamment les travaux de Maria Cristina BARRAGAN, Julio CAMPOS & Miguel CARRASCO sur le bassin du Rio Alto-Béni. Je remercie donc sincèrement Carlos FERNANDEZ, Jorge MATOS & Freddy CAMACHO (directeurs de cet institut), ainsi que les nombreux chercheurs avec qui les échanges ont toujours été fructueux : Angel ALIAGA, Ricardo ARELLANO, Carlos CRUZ, Ricardo FRIAS, Carlos HERBAS, Jorge MOLINA, German PALENQUE, Jorge PEÑA, Edgar SALAS.

Jean Claude OLIVRY (directeur du programme GBF-PEGI, Responsable UR2A de l'ORSTOM) m'a fait confiance pour mener à bien cette étude, qu'il a accepté de juger en participant au jury de thèse. Je le remercie vivement pour son soutien constant.

Je suis très reconnaissant envers Jean Marie JOUANNEAU (IGBA-CNRS, Université de Bordeaux), qui a su orienter mes travaux vers la géochimie des sédiments, et qui a accepté de diriger cette nouvelle thèse. Je remercie également Noèle MAILLET, Yvon LAPAQUELLERIE, Max DIGNAN & Guy HANAUT pour leurs déterminations minéralogiques, géochimiques et granulométriques.

L'étude du carbone organique a pu être abordée dans ce travail, grâce à la franche collaboration de Jean Gabriel WASSON (CEMAGREF Lyon). Je le remercie vivement ainsi que Hélène SANEJOUAND & Philippe NAMOUR pour leurs dosages.

Je suis particulièrement reconnaissant envers Michel MEYBECK (CNRS) pour ses remarques constructives lors de la rédaction de ce travail, dont il a bien voulu être rapporteur. Je remercie également Claude LATOUCHE (CNRS), Jean MOYES & Jean Pierre TASTET (Université de Bordeaux) pour leur participation au jury de thèse.

Je remercie sincèrement Gérard HERAIL pour sa collaboration sur le terrain, et nos discussions sur la géodynamique des Andes de Bolivie. Tous mes remerciements vont également vers mes collègues de l'ORSTOM, hydrologues ou géologues, qui m'ont apporté leurs remarques et réflexions, tant en Bolivie qu'en France lors de la rédaction de ce mémoire : Anne COUDRAY-RIBSTEIN, Jean François DUMONT, Gérard HIEZ, Gilbert JACCON, Gérard LAUBACHER, Hélène LUBES et Michel MOLINIER. Je remercie également Marc SUAVIN du laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM Montpellier pour ses dessins.

Enfin, ce travail ne serait pas ce qu'il est sans la présence de ma famille et mes amis qui ont pris plaisir à m'accompagner sur le terrain, parfois dans des conditions difficiles : Annie, Antoine, Arnaud, Bruno, Camille, César, Claude, François, Garance, Gérard, Jacques, Jean François, Jean Gabriel, Lois, Luis, Misha, Noémie, Olivier, Patrice, Pierre Jean, Robert, Sabine, Serge, Sylvie, Thierry, Vincent.

## RÉSUMÉ

### Le haut-bassin du Rio Madeira en Amazonie bolivienne.

Le bassin de l'Amazone couvre environ  $7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  et apporte à l'océan Atlantique un volume d'eau de plus de  $6000 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ . La chaîne andine, qui ne représente que 11% de la superficie totale du bassin, fournit l'essentiel des matières particulaires, et une grande partie des matières dissoutes à l'Amazone, dont les flux sont aujourd'hui estimés respectivement à  $1000 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1}$  et  $300 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1}$ . Le Rio Madeira, le plus important affluent méridional de l'Amazone, est le seul grand fleuve du bassin qui draine à la fois la cordillère des Andes, le bouclier brésilien et la plaine amazonienne. A Villabella, à la frontière boliviano-brésilienne, le bassin du Rio Madeira couvre  $903500 \text{ km}^2$ , dont 25% dans les Andes, 27% dans le bouclier brésilien et 48% dans les Llanos (plaine amazonienne de Bolivie). Il s'agit d'un grand bassin fluvial aux caractéristiques climatiques et topographiques contrastées (de 120 m à 6500 m d'altitude et de  $200 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  à plus de  $6000 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$  de précipitations suivant les régions), à la géologie variée (du socle Précambrien du bouclier brésilien aux séries sédimentaires quaternaires d'altitude), et à la végétation qui passe d'une couverture rase en altitude à la forêt tropicale humide.

### L'échantillonnage et les données.

L'utilisation de données anciennes, souvent inédites, sur le transport de matières dissoutes et particulaires de quelques cours d'eau andins, a permis d'évaluer la très forte variabilité temporelle des teneurs. Aussi, un protocole d'échantillonnage a été spécialement mis au point aux stations du réseau PHICAB(\*) en plaine amazonienne, sur la base d'un pas de temps journalier et décadaire. L'exploration de la distribution des teneurs dans la section de mesure a permis de connaître la représentativité des échantillons prélevés. Parallèlement au suivi en continu des stations du PHICAB, des campagnes ponctuelles d'échantillonnage ont été organisées à différentes époques hydrologiques, sur environ 400 cours d'eau du bassin versant.

### Les matières particulaires.

La granulométrie des sédiments transportés sur le lit des cours d'eau (transport de fond) a montré que le matériel grossier ( $>1 \text{ mm}$ ) se dépose rapidement dans la zone de piedmont. Dans les Andes, la taille des matières en suspension varie de 0.02 à 0.10 mm, alors que dans les Llanos, les sédiments transportés en suspension sont des limons fins avec une granulométrie de 7 à 13  $\mu\text{m}$ . Dans les Llanos, aucune évolution de la taille des matières en suspension, ou des sédiments du fond, n'est perceptible d'amont en aval sur près de 1000 km.

La détermination minéralogique du cortège argileux des matières en suspension d'une trentaine de cours d'eau andins, a montré que l'illite est le minéral argileux largement dominant dans les Andes. L'illite et la chlorite, produits de l'érosion physique de la chaîne andine, représentent souvent plus de 80% des minéraux argileux. Certains bassins montagneux où affleurent des dépôts sédimentaires tertiaires présentent des teneurs sensibles en kaolinite et smectite. Dans les Llanos, le Rio Orthon qui draine des séries sédimentaires tertiaires présente un cortège minéralogique à smectite dominante, alors que les autres fleuves de l'Amazonie bolivienne conservent un caractère andin où prédomine l'association illite-chlorite.

Les analyses des éléments majeurs et des éléments traces des matières en suspension d'une vingtaine de cours d'eau andins, et des stations du réseau PHICAB dans les Llanos, ont montré qu'en dehors de contaminations locales (concentrations urbaines, activité minière), le cortège géochimique est particulièrement stable dans le temps, et que les variations régionales sont limitées. La détermination du carbone organique particulaire sur 52 cours d'eau du bassin amazonien de Bolivie, dont 41 dans les Andes, a montré que les concentrations observées dépendent des teneurs en matières en suspension, dans un rapport variant de 0.1 à 20%.

L'étude du régime des flux de matières particulaires montre que dans les Andes, l'essentiel du transport se produit en période de crue, et les trois mois de plus hautes eaux (de janvier à mars) peuvent représenter jusqu'à 90% du flux exporté durant l'année. Dans les Llanos où le régime hydrologique est davantage régularisé par la longueur du trajet et l'influence des plaines d'inondation (150000 km<sup>2</sup>), ce pourcentage est de l'ordre de 60%. L'analyse corrélatoire a montré qu'une estimation précise du flux de matières en suspension passe par un échantillonnage dont le pas de temps doit être de 15 jours maximum dans les Llanos, et de 3 à 5 jours pour les stations du piedmont andin.

Le calcul des flux sédimentaires transportés par les cours d'eau andins permet d'estimer un taux de transport particulaire (Ts), qui varie suivant les vallées de 20 à 18000 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, en fonction des caractéristiques topographiques, géologiques et climatologiques des bassins. Les fleuves andins exportent un flux de matières particulaires estimé à 500 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>, ce qui correspond à un taux d'érosion mécanique moyen théorique de 3200 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> de la chaîne andine de Bolivie. Lors de la traversée des Llanos, plus de la moitié de ce flux sédimentaire va se déposer dans les plaines d'inondation. Pour le bouclier brésilien, ce taux de transport particulaire est estimé à 16 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>.

#### Les matières dissoutes.

Dans les Andes, les eaux sont généralement bicarbonatées calciques, avec une minéralisation inférieure à 100 mg.l<sup>-1</sup>, où la silice dissoute peut représenter jusqu'à 50% de la charge en solution. Dans certaines régions arides, des eaux sulfatées magnésiennes sont fréquemment observées, avec des teneurs en matières dissoutes supérieures à 1000 mg.l<sup>-1</sup>. Dans le Subandin, les rivières qui drainent les formations sédimentaires tertiaires ont des concentrations intermédiaires, qui varient de 100 à 200 mg.l<sup>-1</sup>. Dans les Llanos, les fleuves d'origine andine voient leur concentration en matières dissoutes diminuer sous l'effet de la dilution par les apports peu minéralisés des fleuves de la plaine (de 15 à 50 mg.l<sup>-1</sup>), mais qui ont des teneurs relatives en Fe et K généralement plus élevées que les fleuves andins. Le carbone organique dissous présente des teneurs de 1 à 4 mg.l<sup>-1</sup> dans les Andes, et de 4 à 8 mg.l<sup>-1</sup> dans les Llanos.

Du fait d'une faible variabilité des concentrations en matières dissoutes au cours du cycle hydrologique, le régime des flux de matières en solution exportés par les fleuves est quasiment identique au régime hydrologique.

#### Les apports au Rio Madeira.

Le Rio Madeira à Villabella, dont le module est de 18000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, reçoit un flux de matières particulaires de l'ordre de 230 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>, et un flux de matières dissoutes de 40 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>. Si le Rio Madeira débouchait dans l'océan, il serait en 8<sup>ème</sup> position des grands fleuves mondiaux en terme de débit et de flux de matières particulaires.

Les fortes variations des teneurs globales en matières dissoutes et particulaires observées au cours du cycle hydrologique n'affectent que très peu les concentrations relatives des éléments de la phase dissoute et particulaire. Ces résultats ont permis le calcul de bilans élémentaires. SiO<sub>2</sub> (dont 4% sous forme dissoute), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> représentent 75% du flux total de matières exportées par le Rio Madeira à Villabella.

(\*) PHICAB = Programme Hydrologique et Climatologique du Bassin Amazonien de Bolivie, (ORSTOM - SENAMHI - UMSA).

## RESUMEN

### La Alta Cuenca del Río Madera en la Amazonía Boliviana.

La cuenca del río Amazonas cubre más de  $7 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup> y aporta un volumen de agua superior a  $6000 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> al Océano Atlántico. La cadena andina, que representa solamente 11% de la superficie total de la cuenca amazónica, suministra lo esencial de los sedimentos y una gran parte de la materia disuelta en este río, cuyos flujos son actualmente estimados en  $1000 \cdot 10^6$  t.año<sup>-1</sup> y  $300 \cdot 10^6$  t.año<sup>-1</sup>. El Río Madera, el afluente meridional más importante del Río Amazonas, es el único gran río de la cuenca que drena los Andes, el escudo brasileño y la planicie amazónica. En Villabella, en la frontera Bolivia-Brasil, la cuenca del Río Madera cubre 903500 km<sup>2</sup>, de los cuales el 25% está ubicado en los Andes, el 27% en el escudo brasileño y el 48% en los Llanos (llanura amazónica de Bolivia). Esta gran cuenca fluvial presenta características climáticas y topográficas contrastadas (de 120 m a 6500 m de altitud y de 200 mm.año<sup>-1</sup> a más de 6000 mm.año<sup>-1</sup> de precipitación según la región); variada geología (del zócalo precámbrico del escudo brasileño a las series sedimentarias cuaternarias de altitud); y vegetación que pasa de una cubierta baja en las grandes altitudes a la floresta húmeda tropical.

### El Muestreo y los Datos.

El aprovechamiento de datos antiguos, frecuentemente inéditos, sobre el transporte de materia disuelta y de sedimentos en algunos ríos andinos permitió evaluar la gran variabilidad temporal de los contenidos. Además, se empleó un protocolo de muestreo especial en las estaciones de la red PHICAB(\*) en la llanura amazónica, con base en mediciones diarias y a cada diez días. La exploración de la distribución de concentraciones en la sección de medida permitió conocer la representatividad de las muestras obtenidas. Paralelamente al monitoreo en las estaciones del PHICAB, se organizaron campañas puntuales de muestreo en diferentes épocas hidrológicas, en aproximadamente 400 ríos de la cuenca.

### Los sedimentos.

La granulometría de los sedimentos transportados sobre el lecho de los cursos de agua (arrastre) demostró que el material más grueso (>1 mm) se deposita rápidamente en la zona de pie-de-monte. En los Andes, el tamaño del material en suspensión varía de 0.02 a 0.10 mm, mientras que en los Llanos el sedimento transportado es limo fino, con una granulometría entre 7 y 13  $\mu$ m. En los Llanos, no es perceptible cualquier evolución en el tamaño de los materiales en suspensión, o de los sedimentos de fondo, de aguas arriba hasta aguas abajo, sobre casi 1000 km.

La determinación mineralógica de la fracción argilosa del material en suspensión en cerca de treinta ríos andinos, demostró que la illita es el material arcilloso dominante en los Andes. La illita y la clorita, productos de la erosión física de la cadena andina, frecuentemente representan más del 80% de los minerales arcillosos. Ciertas cuencas montañosas en que afloran depósitos sedimentarios terciarios presentan contenidos sensibles de caolinita y esmectita. En los Llanos, el Río Orthon que drena las series sedimentarias terciarias presenta un cortege mineralógico en que domina la esmectita, mientras que los otros ríos de la Amazonía boliviana conservan su carácter andino, donde predomina la asociación illita-clorita.

Los análisis de los elementos mayores y menores de los sedimentos en suspensión de aproximadamente veinte ríos andinos, y de las estaciones de la red PHICAB en los Llanos, demostraron que sin considerar la contaminación local (concentraciones urbanas, actividades de minería), la geoquímica es particularmente estable en el tiempo, y que las variaciones regionales son limitadas. La determinación del carbono orgánico particulado en 52 ríos de la cuenca amazónica de Bolivia, de los cuales 41 en los Andes, indicaron que las concentraciones observadas dependen de los contenidos de sedimentos en suspensión, en una relación que varía entre 0.1 y 20%.

El estudio del régimen de flujo de los sedimentos demuestra que en los Andes el transporte básico se produce en el periodo de crecida, y los tres meses de aguas más altas (de enero a marzo) pueden representar hasta el 90% del flujo exportado durante el año. En los Llanos, donde el régimen hidrológico está más regularizado debido al gran trayecto y a la influencia de las zonas de inundación (150000 km<sup>2</sup>), este porcentaje es del orden del 60%. El análisis de auto-correlación indicó que una estimación exacta del flujo de sedimentos en suspensión requiere un muestreo en que el periodo máximo entre muestras, en los Llanos, sea de 15 días, y de 3 a 5 días en las estaciones de pie-de-monte andino.

El cálculo de los sedimentos transportados por los ríos andinos permite que se estime una tasa de transporte de sedimentos (Ts), que varía de acuerdo con los valles de 20 a 18000 t.km<sup>-2</sup>.año<sup>-1</sup>, en función de las características topográficas, geológicas y climatológicas de las cuencas. Los ríos andinos exportan un flujo de sedimentos estimado en 500 10<sup>6</sup> t.año<sup>-1</sup>, lo que corresponde a una tasa de erosión mecánica teórica promedio de 3200 t.km<sup>-2</sup>.año<sup>-1</sup> para la cadena andina de Bolivia. Durante la travesía de los Llanos, más de la mitad de ese flujo sedimentario se deposita en las zonas de inundación. En el escudo brasileño, se estima la tasa de transporte de sedimentos en 16 t.km<sup>-2</sup>.año<sup>-1</sup>.

#### Las materias disueltas.

En los Andes, las aguas son casi siempre de tipo HCO<sub>3</sub>-Ca, con mineralización inferior a 100 mg.l<sup>-1</sup>, donde SiO<sub>2</sub> representa hasta 50% de la carga en solución. En algunas regiones áridas, las aguas son frecuentemente de tipo SO<sub>4</sub>-Mg, y presentan contenidos en solución superiores a 1000 mg.l<sup>-1</sup>. En la región subandina, los ríos que drenan las formaciones sedimentarias terciarias presentan concentraciones intermedias, que varían de 100 a 200 mg.l<sup>-1</sup>. En los Llanos, la concentración en elementos disueltos de los ríos de origen andino disminuye debido al efecto de la dilución causada por las aguas poco mineralizadas de los ríos de las planicies (de 15 a 50 mg.l<sup>-1</sup>), pero que tienen contenidos relativos de Fe y K en general más elevados que los de los ríos andinos. El carbono orgánico disuelto presenta contenidos de 1 a 4 mg.l<sup>-1</sup> en los Andes y de 4 a 8 mg.l<sup>-1</sup> en los Llanos.

Debido a una débil variabilidad de las concentraciones durante el ciclo hidrológico, el régimen de flujos de materiales en solución exportados por los ríos es prácticamente idéntico al régimen hidrológico.

#### Las contribuciones al Río Madera.

En Villabellá, el Río Madera, cuyo caudal medio es de 18000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, recibe un flujo de sedimentos del orden de 230 10<sup>6</sup> t.año<sup>-1</sup>, y un flujo de materias disueltas de 40 10<sup>6</sup> t.año<sup>-1</sup>. Si el Río Madera desaguase en el océano, sería el octavo del mundo en términos de caudal y de flujo de sedimentos.

Las grandes variaciones en los contenidos globales de materias disueltas y de sedimentos observados durante el ciclo hidrológico afectan muy poco las concentraciones relativas de los elementos de fase disuelta y en suspensión. Esos resultados permitieron el cálculo de los balances por elementos. SiO<sub>2</sub> (del cual un 4% en forma disuelta), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son responsables de un 75% del flujo total de materias exportadas por el Río Madera en Villabellá.

(\*) PHICAB = Programa Hidrológico e Climatológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia, (ORSTOM - SENAMHI - UMSA).

## RESUMO

### A alta-bacia do Rio Madeira na Amazônia Boliviana.

A bacia do Rio Amazonas se estende sobre cerca de  $7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  e leva para o Oceano Atlântico um volume de água de mais de  $6000 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ . A cadeia andina, que representa apenas 11% da superfície total da bacia, fornece ao Rio Amazonas o essencial dos sedimentos e grande parte das matérias dissolvidas, cujos fluxos hoje são estimados respectivamente em  $1000 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{ano}^{-1}$  e  $300 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{ano}^{-1}$ . Sendo o maior afluente meridional do Rio Amazonas, o Rio Madeira é o único grande rio amazônico que drena ao mesmo tempo a cordilheira dos Andes, o escudo brasileiro e a planície amazônica. Em Villabella, na fronteira brasileiro-boliviana, a bacia do Rio Madeira cobre  $903500 \text{ km}^2$ , dos quais 25% se encontram nos Andes, 27% no Escudo Brasileiro e 48% nos Llanos (planície amazônica da Bolívia). Esta grande bacia fluvial apresenta características climáticas e topográficas contrastadas (de 120 m a 6500 m de altitude e de  $200 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1}$  a mais de  $6000 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1}$  de precipitação dependendo das regiões), uma geologia variada (do socle pré-cambriano do escudo brasileiro às séries sedimentares quaternárias em altitude), e uma vegetação variando desde uma cobertura rasa em altitude até a floresta tropical húmida.

### A amostragem e os dados

A utilização de séries históricas, com dados muitas vezes inéditos, sobre o transporte de matérias dissolvidas e sedimentos de alguns cursos de água andinos permitiu avaliar a grande variabilidade temporal dos teores. Por consequência, um método de amostragem foi especialmente elaborado nas estações da rede PHICAB(\*) na planície amazônica, com coletas diárias e de dez em dez dias. A análise da distribuição dos teores na seção de medida permitiu averiguar a representatividade das amostras coletadas. Paralelamente à monitoração contínua das estações do PHICAB, organizaram-se campanhas pontuais de amostragem em diversas épocas hidrológicas, em cerca de 400 rios da bacia de drenagem.

### Os sedimentos.

A granulometria dos sedimentos transportados no leito dos rios (transporte de fundo) mostrou que o material grosso ( $>1 \text{ mm}$ ) se deposita rapidamente na área do piemonte. Nos Andes, o tamanho das matérias em suspensão varia entre 0,02 e 0,10 mm, enquanto nos Llanos os sedimentos transportados em suspensão são limos finos com uma granulometria situada entre 7 e  $13 \mu\text{m}$ . Nos Llanos, quase nenhuma variação do tamanho das matérias em suspensão ou dos sedimentos de fundo é perceptível sobre um trecho de cerca de 1000 km.

A determinação mineralógica das argilas das matérias em suspensão em cerca de trinta rios andinos mostrou que a illita é o mineral argiloso amplamente predominante nos Andes. A illita e a clorita, produtos da erosão física da cadeia andina, representam freqüentemente mais de 80% dos minerais argilosos. Certas bacias montanhosas em que afloram depósitos sedimentares terciários apresentam concentrações significativas de kaolinita e esmectita. Nos Llanos, o Rio Orthon que drena séries sedimentares terciárias apresenta argilas em que domina a esmectita, enquanto os outros rios da Amazônia boliviana conservam um perfil andino em que predomina a associação illita-clorita.

As análises dos elementos maiores e dos elementos-traço das matérias em suspensão em cerca de vinte rios andinos, e das estações da rede PHICAB nos Llanos, mostraram que exceto contaminações locais (concentrações urbanas, atividade extrativista), a geoquímica permanece particularmente estável no tempo e as variações regionais são limitadas. A determinação do carbono orgânico particulado em 52 rios da bacia amazônica da Bolívia, dos quais 41 são situados nos Andes, mostrou que as concentrações observadas dependem das concentrações de matérias em suspensão, numa relação que varia de 0,1 a 20%.

O estudo do regime dos fluxos de sedimentos mostra que nos Andes, a maior parte do transporte ocorre em período de cheia: os três meses de enchente (de janeiro a março) podem representar até 90% do fluxo exportado durante o ano. Nos Llanos, onde o regime hidrológico é mais regularizado pelo comprimento do trajeto e pela influência das planícies de inundação (150000 km<sup>2</sup>), esta percentagem é de 60%. A análise correlativa mostrou que uma estimativa precisa do fluxo de matérias em suspensão exigiria uma amostragem com intervalos máximos de 15 dias nos Llanos e de 3 a 5 dias nas estações do piemonte andino.

O cálculo dos fluxos sedimentares transportados pelos rios andinos permite estimar um índice de transporte em suspensão (Ts), que varia segundo os vales entre 20 e 18000 t.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>, em função das características topográficas, geológicas e climatológicas das bacias. Os rios andinos exportam um fluxo de sedimentos estimado em 500 10<sup>6</sup> t.ano<sup>-1</sup>, o que corresponde a uma taxa média teórica de erosão mecânica de 3200 t.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup> na cadeia andina da Bolívia. Durante a travessia dos Llanos, mais da metade deste fluxo sedimentar se deposita nas planícies de inundação. No que diz respeito ao escudo brasileiro, estima-se esta taxa de transporte em suspensão em 16 t.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>.

#### As matérias dissolvidas

Nos Andes, de modo geral, as águas são de tipo HCO<sub>3</sub>-Ca, com uma mineralização inferior a 100 mg.l<sup>-1</sup>, em que o SiO<sub>2</sub> dissolvido pode representar até 50% da carga em solução. Em certas regiões áridas, as águas têm freqüentemente um tipo SO<sub>4</sub>-Mg, com teores de matérias dissolvidas superiores à 1000 mg.l<sup>-1</sup>. Na região subandina, os rios que drenam as formações sedimentares terciárias apresentam concentrações intermediárias, variando entre 100 e 200 mg.l<sup>-1</sup>. Nos Llanos, a concentração de matérias dissolvidas dos rios de origem andina diminui devido à diluição pelas águas pouco mineralizadas dos rios da planície (de 15 a 50 mg.l<sup>-1</sup>), cujos teores relativos em Fe e K, no entanto, costumam ser mais elevados que nos rios andinos. O carbono orgânico dissolvido apresenta concentrações de 1 a 4 mg.l<sup>-1</sup> nos Andes, e de 4 a 8 mg.l<sup>-1</sup> nos Llanos.

Devido a pequena variabilidade das concentrações em matérias dissolvidas durante o ciclo hidrológico, o regime dos fluxos de matérias em solução exportados pelos rios é quase idêntico ao regime hidrológico.

#### As contribuições para o Rio Madeira

Em Villabella, o Rio Madeira, cuja descarga média é de 18000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, recebe um fluxo de sedimentos da ordem de 230 10<sup>6</sup> t.ano<sup>-1</sup>, e um fluxo de matérias dissolvidas de 40 10<sup>6</sup> t.ano<sup>-1</sup>. Se o Rio Madeira desaguasse no mar, estaria na oitava posição entre os grande rios do mundo no que tange a descarga e ao fluxo de sedimentos.

As grandes variações dos teores globais de matérias dissolvidas e particulares observadas ao longo do ciclo hidrológico afetam muito pouco as concentrações relativas dos elementos da fase dissolvida e em suspensão. Estes resultados permitiram o cálculo dos balanços de elementos. SiO<sub>2</sub> (com 4% sob forma dissolvida), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> representam 75% do fluxo total de matérias exportadas pelo Rio Madeira em Villabella.

(\*) PHICAB = Programa Hidrológico e Climatológico da Bacia Amazônica da Bolívia, (ORSTOM - SENAMHI - UMSA).

## ABSTRACT

### The Upper Basin of the Madeira river in Bolivian Amazonian Drainage Basin.

The basin of the Amazon extends over  $7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  and releases more than  $6000 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$  of fresh water into the Atlantic Ocean. The Andean mountain range, which accounts for only 11% of the total surface of the basin, provides most sediments and a substantial amount of the soluble matter of the Amazon river, whose yields are presently estimated at  $1000 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{yr}^{-1}$  and  $300 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{yr}^{-1}$ . The Madeira river, the most important southern affluent of the Amazon, is the only large river in the basin which drains the Andean range, the Brazilian shield and the Amazon plains. At Villabella, on the Bolivia-Brazil border, the Madeira basin extends over  $903500 \text{ km}^2$ , of which 25% are located in the Andes, 27% in the Brazilian shield and 48% in the Llanos (Bolivian Amazonian floodplain). It is a large river basin of contrasting climatic and topographical characteristics (altitudes vary from 120 m to 6500 m and rainfall runs the gamut from  $200 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$  to more than  $6000 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ , depending on the region); diverse geology (from the Pre-Cambrian base of the Brazilian shield to the high-altitude Quaternary sedimentary series); and a vegetation which evolves from the low scrub found at higher altitudes to the tropical rainforest.

### Sampling and data.

The use of historical and frequently unpublished data on the transport of soluble and particulate matter in various Andean rivers, made it possible to assess the very strong temporal variability of river contents. Also, a special sampling protocol was used at the PHICAB(\*) network stations on the Amazon plain, with measurements taken daily and at ten-day intervals. An analysis of the contents distribution at the measuring section provided information on the representativeness of the samples obtained. Simultaneously with the continuous monitoring at the PHICAB stations, punctual sampling campaigns were organized for the different hydrological phases, on close to 400 streams on the watershed.

### Sediments.

The size of the transported sediments on the river bed (bottom transport) has shown that the coarser material ( $>1 \text{ mm}$ ) settles rapidly in the foothills, where a strong subsidence has been observed. In the Andes, the suspended matter varies between 0.02 and 0.10 mm in diameter, while in the Llanos the sediments transported in suspension are fine silts, between 7 and 13  $\mu\text{m}$  in diameter. In the Llanos, no variation was observed in the size of suspended material or bottom sediments from upstream to downstream along a 1000 km river section.

The determination of the mineral contents of the clay fraction in suspended sediment in approximately thirty Andean rivers has shown that illite is the predominant clay mineral in the Andes. Illite and chlorite result from the physical erosion of the Andean range and frequently constitute more than 80% of clay minerals. Certain mountain basins where Tertiary sedimentary deposits crop out show appreciable kaolinite and smectite contents. In the Llanos, the Orthon river, which drains a series of sedimentary Tertiaries shows a clay fraction where smectite predominates, while the other rivers in the Bolivian Amazon maintain the Andean characteristics and the illite-chlorite association is more frequent.

The analyses of both main and trace elements in suspended sediment from approximately twenty Andean rivers and the PHICAB network stations in the Llanos have shown that, setting aside local contamination (urban centers, mining activities) of the streams, the geochemistry is particularly stable over time and regional variations are limited. The determination of particulate organic carbon (POC) in 52 streams in the Bolivian Amazon basin, of which 41 in the Andes, has shown that the observed concentrations are dependent on the suspended sediment content, with rates which vary from 0.1 to 20%.

The study of the sediment yield regime shows that in the Andes most of the transport occurs during the flood period, and the three months of high water (January through March) may represent up to 90% of the annual sediment load. In the Llanos, where the hydrological regime is more regular as a result of the longer river stretches and the influence of the floodplains (150000 km<sup>2</sup>), this percentage is 60%. A auto-correlation analysis has shown that a precise estimate of the sediment yields requires sampling every 15 days at the most, in the Llanos, and every 3 to 5 days, at the stations located in the Andean foothills.

The calculation of the sediment yield transported by the Andean rivers made it possible to estimate a particulate transport rate (Ts) that varies from 20 to 18000 t.km<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>, depending on the valley, as a function of the topographic, geological and climatic characteristics of the basins. The Andean rivers export a sediment yield estimated at 500 10<sup>6</sup> t.yr<sup>-1</sup>, which corresponds to a theoretical, average, mechanical-erosion rate of 3200 t.km<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup> for the Andean range in Bolivia. More than half of the sediment load will be deposited in the flood plains in the Llanos. In the case of the Brazilian shield, this sediment transport rate is estimated at 16 t.km<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>.

#### Dissolved Matter.

In the Andes, waters usually have mineralization lower than 100 mg.l<sup>-1</sup>, with Ca and HCO<sub>3</sub> ionic dominance. The dissolved SiO<sub>2</sub> may represent up to 50% of the load in solution. In some arid regions, the dissolved matter content which frequently Mg and SO<sub>4</sub> dominance, is superior to 1000 mg.l<sup>-1</sup>. In the lower Andean area, the rivers which drain Tertiary sedimentary formations have intermediate concentrations which vary between 100 and 200 mg.l<sup>-1</sup>. In the Llanos, where the rivers from the plain meet those that originate in the Andes, dissolved matter loads decrease since the former have a lower mineral content (from 15 to 50 mg.l<sup>-1</sup>) than the latter, although their Fe and K contents are relatively higher. Dissolved organic carbon (DOC) contents vary between 1 and 4 mg.l<sup>-1</sup> in the Andes and 4 and 8 mg.l<sup>-1</sup> in the Llanos.

As a result of the small variability of soluble matter concentrations found throughout the hydrological cycle, the regime of dissolved matter exported by the rivers almost coincides with the hydrological regime.

#### The contribution of the Madeira river.

At Villabella, the Madeira river, whose discharge is 18000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, receives sediment and dissolved matter yields of approximately 230 10<sup>6</sup> t.yr<sup>-1</sup> and 40 10<sup>6</sup> t.yr<sup>-1</sup>, respectively. If the Madeira river were to run into the ocean it would be the eighth largest river in the world, in terms of discharge and sediment yield.

The sharp variations in overall dissolved matter and sediment contents observed throughout the Madeira's hydrological cycle have very little impact on the relative concentrations of the elements of the soluble and particulate phases. These results have allowed the calculation of element balances. SiO<sub>2</sub> (of which 4% in soluble form), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> account for 75% of the total flux of matter exported by the Madeira river at Villabella.

(\*) PHICAB = Hydrological and Climatological Program of the Amazonian Drainage Basin of Bolivia, (ORSTOM - SENAMHI - UMSA).

## INTRODUCTION

Ce travail sur l'hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne s'inscrit dans une étude plus générale des apports continentaux à l'océan Atlantique. Avant de d'entreprendre les recherches sur le fleuve Amazone et ses principaux tributaires, au Brésil, il est apparu nécessaire de comprendre en détail les processus entraînant l'érosion, puis le transport des matières dissoutes et particulaires, depuis les Andes jusque dans la plaine amazonienne.

L'acquisition de telles connaissances sur les volumes de matières exportées des Andes, et transportées dans la plaine alluviale, ainsi que leur variabilité saisonnière, nécessitait la mise en place d'un réseau de mesures hydrologiques et d'échantillonnage sur un grand bassin andin de l'Amazonie. Le haut-bassin du Rio Madeira, qui draine 35% du domaine andin de l'Amazonie, a été sélectionné pour cette étude.

Pour cela, le PHICAB (programme climatologique et hydrologique du bassin amazonien de Bolivie, ORSTOM-SENAMHI-UMSA) a installé en Amazonie bolivienne une douzaine de stations hydrométriques, qui ont fonctionné depuis 1983.

Le premier chapitre de ce travail [*Le bassin amazonien*], après un rappel des grands traits historiques et géographiques du bassin amazonien, fait le point des connaissances actuelles en ce qui concerne l'hydrologie et les flux de matières dissoutes et particulaires de l'Amazonie (Rio Amazonas).

Le deuxième chapitre [*Le programme PHICAB dans le haut-bassin bolivien du Rio Madeira*] replace le bassin du Rio Madeira dans son contexte amazonien, et pose la problématique de l'étude entreprise en Amazonie bolivienne.

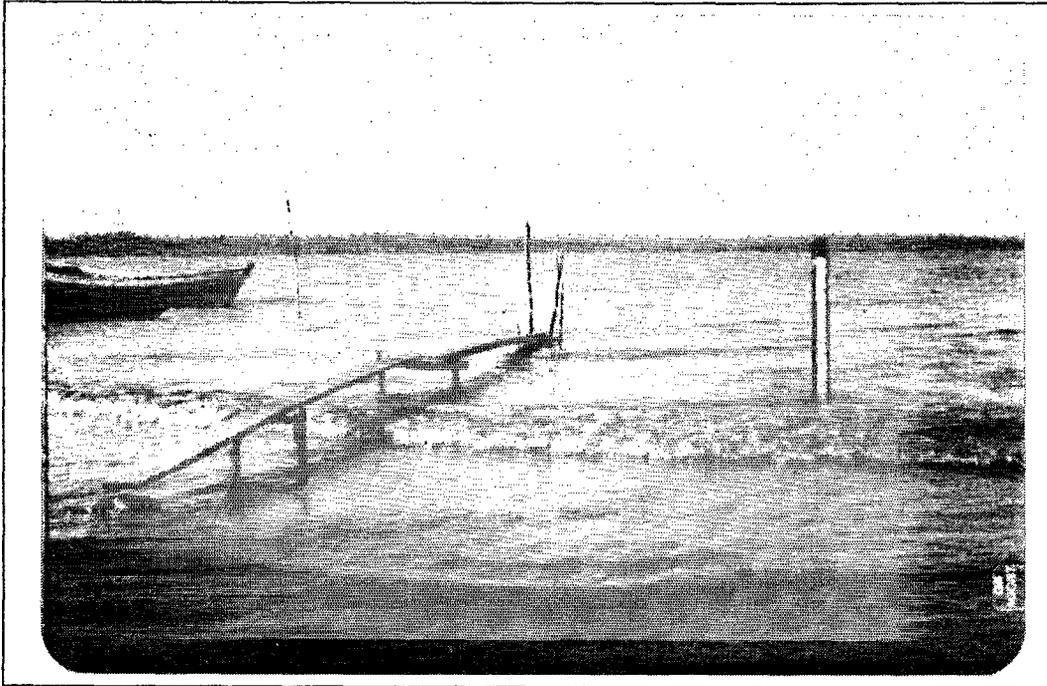
Le troisième chapitre [*Le bassin du Rio Madeira à Villabella (Bolivie)*] décrit le milieu physique du haut bassin du Rio Madeira à Villabella (frontière boliviano-brésilienne), tant d'un point de vue géodynamique, que climatique et hydrologique.

Le quatrième chapitre [*La recherche d'une méthode*] expose la méthodologie adoptée pour les prélèvements et les analyses, mais aussi l'estimation de la représentativité de l'échantillon et le mode de calcul des flux transportés.

Le cinquième chapitre [*Les matières particulaires*] porte sur l'étude des matières particulaires, en suspension ou au fond du lit, et décrit la distribution tant régionale que temporelle de la granulométrie, de la minéralogie et de la géochimie des sédiments. Une partie de ce chapitre concerne le bilan des flux transportés depuis les Andes (érosion) jusque dans la plaine amazonienne (sédimentation).

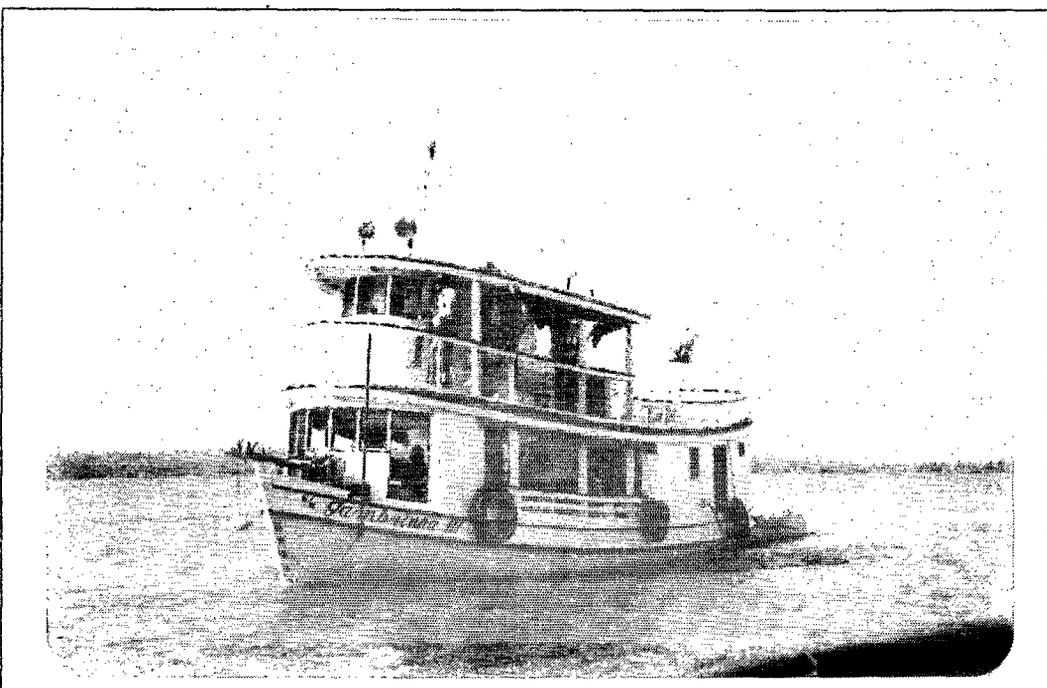
Le sixième chapitre [*Les matières dissoutes*] traite de l'étude des matières dissoutes (éléments majeurs et carbone organique) et de leur distribution régionale et temporelle. L'importance relative des flux transportés dans les différentes régions est abordée.

La conclusion, récapitule les connaissances acquises par cette étude du haut bassin du Rio Madeira, et les replace dans le contexte du grand bassin amazonien.



↑ Photo 3 : La section de jaugeage de l'Amazone à Obidos (Brésil).  
*La sección de aforos del Río Amazonas en Obidos. Amazon river measuring section of Obidos.*

↓ Photo 4 : Le bateau Gamboinha III utilisé pour les jaugeages de l'Amazone à Obidos (Brésil).  
*El bote Gamboinha III usado para los aforos del Río Amazonas en Obidos.*  
*The Gamboinha III boat used for Amazon river gaugings at Obidos.*



## Chapitre I

---

# Le bassin amazonien

### RÉSUMÉ :

La première partie de ce chapitre est un rappel historique sur la découverte et l'exploration du bassin amazonien. Ensuite vient une description géographique rapide mettant en évidence l'existence de trois grands domaines : les Andes, la plaine (appelée ici Llanos) et le socle précambrien (les boucliers brésiliens et guyanais) qui ont leurs caractéristiques morphologiques, géologiques, pédologiques et climatologiques propres. Les grands traits de l'hydrographie du bassin sont abordés. Les régimes des précipitations sur l'ensemble du bassin et de l'écoulement le long de l'Amazone sont également décrits. Un résumé des principaux travaux sur l'hydrochimie et la géochimie des sédiments de l'Amazone termine ce premier chapitre.

Le bassin de l'Amazone, le plus important des fleuves mondiaux en terme de superficie et de débit, couvre environ  $6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  et apporte à l'océan Atlantique un volume d'eau de près de  $6500 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ . La chaîne andine, qui ne représente que 11% de la superficie totale du bassin, fournit l'essentiel des matières particulaires, et une grande partie des matières dissoutes à l'Amazone, dont les flux sont aujourd'hui estimés respectivement à  $1000 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1}$  et  $300 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1}$ . Les principaux fleuves andins sont les rios Marañón-Solimões et Madeira, qui drainent respectivement 65% et 35% du domaine andin de l'Amazonie.

### SOMMAIRE :

I.A. Un peu d'histoire .....	p. 20
I.A.1. Le siècle des conquérants découvreurs .....	p. 20
I.A.2. Le siècle des missionnaires pacificateurs .....	p. 20
I.A.3. Le siècle des savants explorateurs .....	p. 20
I.B. Le bassin de l'Amazone .....	p. 21
I.B.1. Extension et limites .....	p. 21
I.B.2. Les grandes unités morfo-structurales .....	p. 23
I.B.3. Les sols et la végétation .....	p. 26
I.B.4. Les grands bassins hydrographiques .....	p. 27
I.C. Le climat du bassin amazonien .....	p. 29
I.D. L'hydrologie de l'Amazone .....	p. 30
I.E. Les matières dissoutes et particulaires .....	p. 34
I.E.1. Les types d'eau .....	p. 34
I.E.2. Les matières dissoutes .....	p. 35
I.E.3. Les matières particulaires .....	p. 36

## **I.A. UN PEU D'HISTOIRE.**

### **I.A.1. Le siècle des conquérants découvreurs.**

L'embouchure de l'Amazone est découverte en 1500 par Vicente Yáñez Pinzón, (Gheerbrant, 1988), navigateur espagnol qui a déjà participé à la découverte de l'Amérique lors du premier voyage de Christophe Colomb (1492-1493).

Mais la véritable exploration de l'Amazone commence avec l'étrange aventure de Francisco de Orellana, capitaine de Gonzalo Pizarro, qui part de Quito en 1541 à la recherche du fameux 'El Dorado'. Après une difficile traversée des Andes équatoriennes, il s'embarque sur le Rio Coca, affluent du Rio Napo, avec 55 soldats et 2 prêtres dont Gaspar de Carvajal qui deviendra le chroniqueur de l'expédition. Après la descente du cours sinueux du Rio Napo, ils atteignent le haut-Amazone, puis l'embouchure du Rio Negro auquel ils donnent ce nom en raison de sa couleur particulière (Carvajal & al., *In Sioli*, 1967). Finalement, en Août 1542, ils débouchent dans l'Océan Atlantique après une traversée de 3000 kilomètres qui aura duré huit mois, et donnera naissance au mythe des 'Amazones', sur un fleuve qui s'appellera pour un temps le Rio de Orellana.

Quelques années plus tard, en 1560, Pedro de Ursúa quitte Cuzco en direction de l'Orient, pour tenter de découvrir à son tour l'El Dorado. Il s'embarque sur le Rio Ucayali, débouche ensuite dans le Rio Marañón, et arrive à l'embouchure du Rio Napo. Là, une rébellion dirigée par Lope de Aguirre éclate, Pedro de Ursúa est exécuté, Lope de Aguirre se proclame Roi d'Amazonie! Le récit de ce voyage sur l'Amazone, qui dura 10 mois, donnera la première relation des crues successives de l'Amazone, ainsi que des zones d'inondation (Vásquez, 1561).

En 1636, cent ans après la première descente de l'Amazone par Francisco de Orellana, 2 prêtres accompagnés de 6 soldats partent de Quito, et arrivent jusqu'à Belem. Cet exploit va inciter le capitaine portugais Pedro Teixeira à entreprendre le premier voyage aller-retour Belem-Quito-Belem, de 1637 à 1638. Il part de Belem (Pará) avec 2000 hommes et 47 embarcations, pour arriver à Quito en Octobre 1637. Il en repart en Février 1638, accompagné du jésuite Cristobal de Acuña, et arrive à Belem en Décembre 1638 (Chávez Suárez, 1986). Le rapport détaillé de Cristobal de Acuña comportera de précieuses indications sur l'hydrographie de l'Amazone, les zones inondables et leur fertilité, les différentes couleurs des eaux (eaux noires et eaux blanches), et la première mention de l'existence d'une connexion entre l'Amazone et l'Orénoque (Carvajal & al. *In Sioli*, 1967).

Mais bien avant la descente de l'Amazone par les espagnols, l'inca Yupanqui serait parti de Cuzco à la tête de 10000 hommes pour la conquête de nouvelles terres en Amazonie. En descendant le Rio Madre de Dios sur 4000 "balsas" (radeau en bois très léger : le balsa), il aurait atteint les rives du Rio Madeira, où ses troupes, bien que décimées par les combats et le climat, auraient soumis les indiens Moxos (Inca Garcilaso de la Vega, 1609).

### **I.A.2. Le siècle des missionnaires pacificateurs.**

Après l'épopée des conquérants découvreurs qui dura un peu plus d'un siècle, la colonisation de l'Amazonie s'effectue, principalement sous l'impulsion de missionnaires de toutes tendances : dominicains, franciscains, jésuites... Ces religieux seront sans cesse en lutte contre des bandes armées (les Bandeirantes ou Mamelucos) qui parcourent l'Amazonie à la recherche d'or, d'argent, de pierres précieuses et d'esclaves.

Cette colonisation s'effectua suivant deux axes de pénétration : le premier en remontant le cours de l'Amazone (sous contrôle portugais); le second en descendant des contreforts andins (sous contrôle espagnol). Les avancées de ces deux fronts de colonisation correspondent sensiblement aux frontières actuelles du Brésil avec ses voisins hispanophones.

De cette époque, il faut signaler les travaux d'un jésuite, Samuel Fritz, qui va publier en 1691 la première carte précise du cours de l'Amazone (Sioli, 1967).

### **I.A.3. Le siècle des savants explorateurs.**

A la suite d'un différent scientifique sur la forme de la Terre les opposant à Isaac Newton, 4 savants Français (Pierre Bouguer, Louis Godin, Joseph de Jussieu, Charles de La Condamine) partent en Equateur pour mesurer un degré de méridien (Trystram, 1989). Après un séjour de 7 années en Equateur, Charles Marie de La Condamine décide de rentrer en Europe en descendant le cours de l'Amazone. Parti en mai 1743, il arrive à Belem (Pará) en septembre de la même année,

avec une multitude d'observations nouvelles. Il découvre entre autre : le curare, la quinine, le platine, le caoutchouc; il confirme l'existence de la liaison entre l'Amazone et l'Orénoque, et il établit la première description scientifique minutieuse du cours de l'Amazone (La Condamine, 1745).

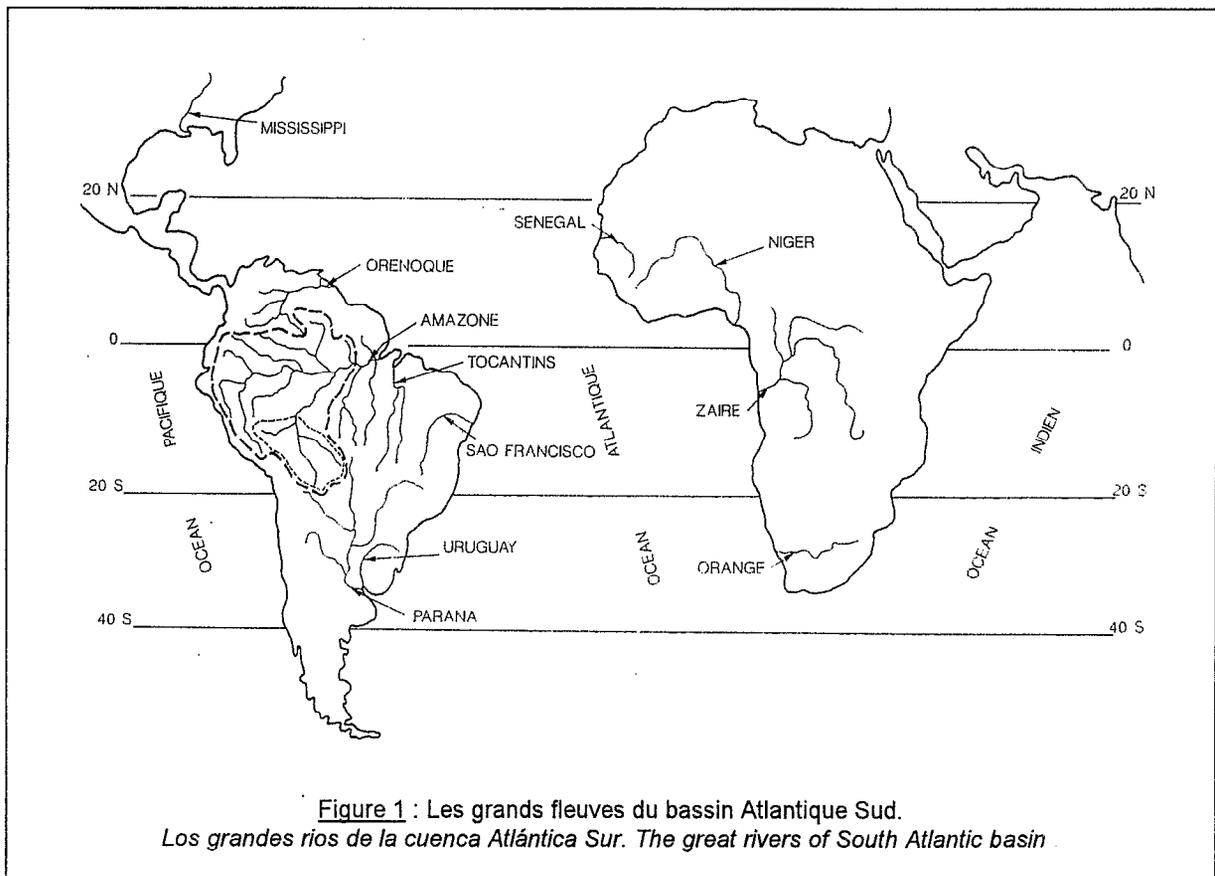
En 1804, le célèbre savant allemand, le baron Friedrich Heinrich Alexander von Humboldt, accompagné de son ami médecin et naturaliste français Aimé Bonpland, explore, au Venezuela, le cours de l'Orénoque. En remontant le Casiquiare il débouche finalement dans le Rio Negro, et apporte ainsi la preuve que l'Amazone et l'Orénoque sont hydrographiquement liés (Humboldt, 1814-1825).

A la suite de ces deux grands précurseurs, de nombreux naturalistes européens sillonnent, explorent, étudient avec minutie ce monde nouveau : l'Amazonie. Parmi ceux-ci les allemands Von Spix et Von Martius (Sioli, 1984), ainsi que le français Alcides d'Orbigny qui parcourt l'Amazonie bolivienne en 1830-1831 (d'Orbigny, 1835-1847). Les naturalistes anglais (Alfred Russel Wallace, Henry Walter Bates) arrivés à Belem en 1848, se lancent dans l'étude et la récolte systématique de la faune amazonienne. Leurs travaux, notamment sur le mimétisme, influenceront les recherches de Charles Darwin sur l'évolution. Un autre anglais, Richard Spruce se passionnera pour la flore amazonienne. Le français Auguste de Saint Hilaire parcourt 12000 kilomètres de jungle pour constituer un herbier, alors que son compatriote, Paul Marcoy, effectue un voyage des côtes du Pérou jusqu'à Belem, qui durera 14 ans (Gheerbrant, 1988). Les français Anatole et Olga Coudreau réalisent des documents cartographiques précis des principaux tributaires de l'Amazone alors que Paul Le Coite décrit les lacs adjacents (várzeas) à l'Amazone (Sioli, 1967). L'épopée de l'explorateur anglais Percy Harrison Fawcett terminera cette longue saga (Fawcett, 1953).

## I.B. LE BASSIN DE L'AMAZONE.

### I.B.1. Extension et limites.

Le fleuve Amazone (*Rio Marañón, Rio Solimões, Rio Amazonas*), dont le bassin s'étend entre le 5° de latitude Nord, et le 20° de latitude Sud, débouche dans l'Océan Atlantique au niveau de l'équateur (Figure 1).



## 1. Le bassin amazonien.

Le bassin Amazone-Tocantins est de loin le plus grand bassin hydrographique du monde avec une superficie de 7 millions de km<sup>2</sup> à son embouchure, dont 6.0 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> pour l'Amazone proprement dit et 1.0 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> pour le bassin Pará-Tocantins (d'après la carte au 1/10,000,000<sup>ème</sup>, South America, Ed. Bartholomew, Edinburgh, 1978). Ce bassin géant occupe 5% des terres émergées.

Deux études récentes portant sur les flux continentaux de matières dissoutes et particulières aux océans (Probst, 1990), ainsi que sur les flux mondiaux de carbone organique (Degens & al., 1991), permettent de situer la taille du bassin amazonien parmi les grands bassins fluviaux du monde (Tableau I). Le bassin de l'Amazone est incontestablement le plus grand, et la superficie du second bassin, le Zaïre, correspond sensiblement à la moitié du bassin amazonien.

**Tableau I :** Superficie des 20 plus grands bassins fluviaux du monde.  
*Superficie de las más grandes cuencas del mundo. World greatest drainage basins Area.*

	Bassin <i>Degens &amp; al., 1991</i>	Superficie (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	Bassin <i>Probst, 1990</i>	Superficie (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )
1	Amazone	6.0	Amazone	6.0
2	Zaïre (Congo)	3.5	Zaïre (Congo)	3.7
3	Mississippi	3.2	Mississippi	3.3
4	Nil	3.0	Parana	2.9
5	Ob	3.0	Ienisseï	2.6
6	Parana	2.8	Lena	2.4
7	Ienisseï	2.5	Ob	2.3
8	Lena	2.4	Amour	1.9
9	Changjiang (Yangtze)	2.0	Nil	1.9
10	Mackenzie	1.8	Changjiang (Yangtze)	1.8
11	Gange + Brahmapoutre	1.5	Gange + Brahmapoutre	1.7
12	Volga	1.5	Mackenzie	1.6
13	Niger	1.2	Niger	1.6
14	Indus	1.2	Zambèze	1.4
15	Saint Laurent	1.2	Murray	1.1
16	Orénoque	1.0	Saint Laurent	1.1
17	Orange	1.0	Orénoque	1.0
18	Yukon	0.8	Tigre + Euphrate	0.9
19	Danube	0.8	Indus	0.9
20	Mékong	0.8	Mékong	0.9

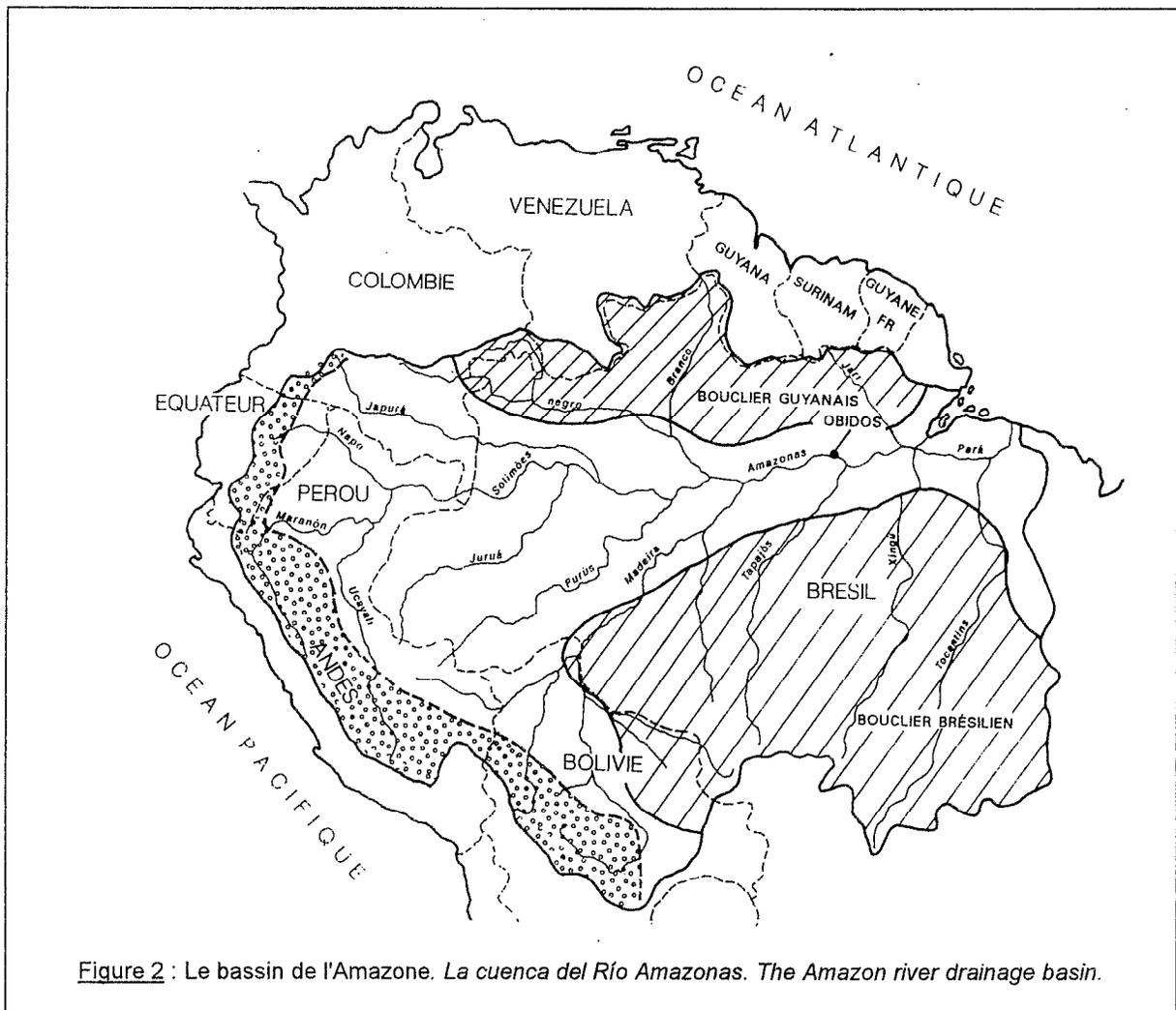
Le bassin de l'Amazone s'étend sur 7 pays (la Bolivie, le Brésil, la Colombie, l'Equateur, la Guyana, le Pérou et le Venezuela), et touche 2 autres territoires : le Surinam et la Guyane Française (Figure 2). Le Brésil représente à lui seul 68% de la superficie de ce grand bassin, vient ensuite le Pérou (14%) et la Bolivie (10%), les 4 pays restant ne totalisant que 8%.

Le bassin de l'Amazone est limité au Nord par les reliefs du bouclier guyanais, à l'Ouest par la chaîne des Andes (*Cordillera de los Andes*) où l'Amazone prend sa source, au Sud par le plateau du bouclier brésilien, et à l'Est par la côte Atlantique.

Entre les Andes et les zones de boucliers anciens, les limites du bassin hydrographique ne sont pas très marquées, et des phénomènes de diffluence sont observés. Au Nord, l'Orénoque se divise en deux bras : le premier forme le cours inférieur de l'Orénoque (*Río Orinoco*), alors que le second (*Braso Casiquiare*) rejoint le cours du Rio Negro, affluent septentrional de l'Amazone (Humboldt, 1814-1825). Au Sud, il existe une zone de diffluence, uniquement en période de hautes eaux, qui relie le Rio Guaporé (formateur du Rio Madeira, affluent méridional de l'Amazone) au Rio Paraguay, tributaire du Rio Paraná (Matos, 1937 *In* Sioli, 1967). En Bolivie, un phénomène similaire a été observé au niveau d'une zone marécageuse (*Bañados del Izozog*) alimentée par un cours d'eau andin : le Rio Parapeti. Lors de la saison des pluies, l'écoulement s'effectue en partie vers le Rio Guaporé (bassin amazonien), et en partie vers le Rio Paraguay.

### I.B.2. Les grandes unités morpho-structurales.

Le bassin amazonien est divisé en trois unités morpho-structurales (Figure 2), héritées de l'histoire géologique du bassin : le bouclier ancien (bouclier guyanais au Nord, bouclier brésilien au Sud), la chaîne des Andes et la plaine amazonienne qui occupent respectivement 44%, 11 % et 45% de la superficie du bassin versant.



#### I.B.2.a. Histoire géologique du bassin amazonien.

La formation du bassin amazonien doit être très ancienne. Les sédiments les plus âgés reposant sur le socle sont probablement du Cambrien. Ils sont recouverts par des sédiments de mer peu profonde (Paléozoïque). Du Mésozoïque au Tertiaire, l'ensemble du bassin est soumis à des phases d'érosion et de sédimentation en milieu continental (Bigarella, 1973; Putzer, 1984). Dans sa partie occidentale, à l'Ouest de l'arc d'Iquitos, le drainage du bassin s'effectue vers l'Ouest (vers le Pacifique). Les cataractes du Rio Madeira sont une relique de l'ancienne ligne de partage des eaux (Grabert, 1967, 1971). A partir de l'Oligocène supérieur - Miocène inférieur, l'érection des Andes va couper le drainage occidental du bassin (Katzer, 1903 *In* Fittkau, 1974), et forcer les cours d'eau à s'écouler vers l'Est. Ensuite, les variations eustatiques du niveau des océans au cours du Pliocène-Pléistocène, vont conditionner des phases de sédimentation et de dépôts dans l'actuel bassin amazonien (Sombroek, 1966; Tricart, 1975, 1977; Klammer, 1976, 1984; Irion, 1976, 1984).

### **I.B.2.b. Les boucliers guyanais et brésilien.**

Le grand bassin intra-cratonique de l'Amazonie doit son origine à une ancienne zone de faiblesse du socle précambrien, qui s'est ouvert en deux, formant au Nord le bouclier guyanais, et au Sud le bouclier centre-brésilien. Ces cratons sont constitués de roches cristallines, plissées et métamorphisées au cours de nombreuses orogénèses anciennes (Putzer, 1984).

Ces plates-formes très érodées, aux altitudes modestes voisines de 150 mètres, supportent des sédiments variés (du Précambrien au Mésozoïque). Dans le bouclier guyanais, ces ensembles sédimentaires génèrent des reliefs de 800 km de long (Roraima, Pacaraima et Parima) qui culmine à plus de 3000 mètres au Pico da Neblina (Klammer, 1984). Il n'existe pas de telles altitudes dans le bouclier brésilien, où le point culminant est observé à la limite du bassin amazonien avec le bassin du Rio Paraguay (Serra do Aguapei : 1150 m.).

### **I.B.2.c. Les Andes.**

La chaîne des Andes forme une cordillère de plus de 10000 km de long. Elle a été engendrée par la rencontre de la plaque continentale d'Amérique du Sud avec la plaque océanique de Nazca, qui confère à cette chaîne montagneuse ses caractéristiques morphologiques et géochimiques propres (Isacks, 1988).

Sur la bordure occidentale du bassin amazonien, les Andes s'étirent sur près de 4000 km, du Nord au Sud, et de nombreux pics dépassent 6000 mètres d'altitude. Le point culminant est situé au Pérou (Huascarán : 6768 m.). La largeur de la chaîne montagneuse varie de 200 km (en Equateur), à plus de 600 km dans la zone de virgation en Bolivie (Aubouin, 1973). L'ossature de la Cordillère des Andes est constituée de matériaux précambrien et paléozoïque plissés, qui serviront de support à l'orogénèse andine. Cette chaîne où prédominent des séries continentales ou néritiques, s'édifie en plusieurs phases tectoniques brèves, du Crétacé au Pliocène. L'évolution magmatique apparaît clairement liée à la présence d'une zone de subduction. La chaîne andine doit donc ses principaux caractères au fait qu'elle est située à la fois sur un continent sialitique et en bordure d'un océan avec zone de subduction (Audebaud & al., 1973).

L'érection de cette chaîne montagneuse a engendré d'importants phénomènes d'érosion sur de grandes étendues, notamment au Pérou et en Bolivie. Le matériel détritique est exporté vers la plaine amazonienne où une partie de celui-ci va sédimenter (Sioli, 1975).

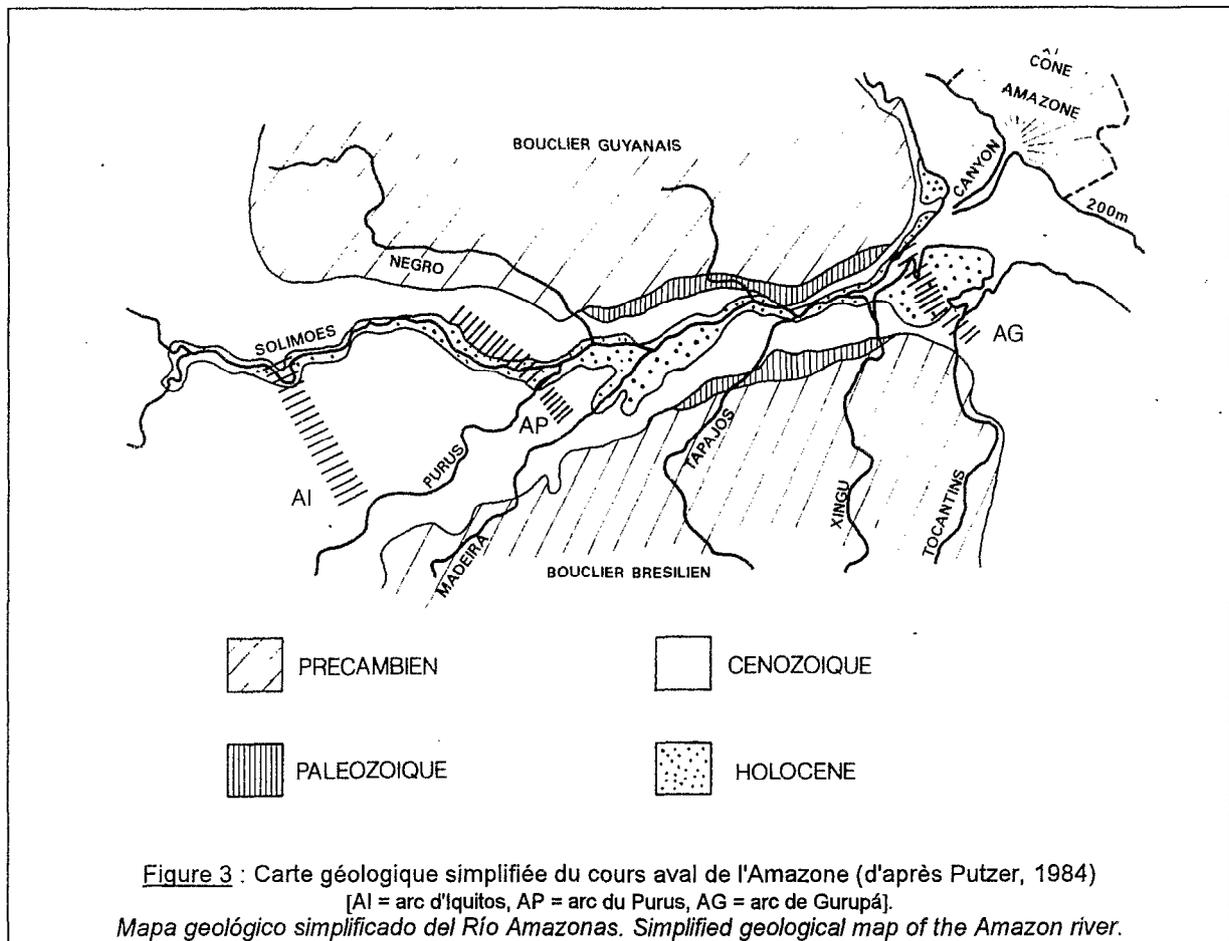
Au niveau des Andes centrales du Pérou et de la Bolivie, la chaîne est divisée en deux rameaux (Cordillère occidentale et Cordillère orientale) qui surplombent l'Altiplano, haut plateau de 4000 mètres d'altitude moyenne où est conservée une épaisse série sédimentaire continentale tertiaire.

### **I.B.2.d. La plaine amazonienne ou Llanos.**

La plaine amazonienne est une vaste dépression très plate, dans laquelle s'écoule le fleuve Amazone, depuis le piedmont de la Cordillère des Andes, jusqu'à l'Océan Atlantique. La pente de l'Amazonie est très faible, de 1 à 2 cm.km<sup>-1</sup> (Sioli, 1967). Dans sa moitié aval, cette plaine est bordée au Nord et au Sud par les reliefs des boucliers guyanais et brésilien. Elle est entièrement recouverte de sédiments du Cénozoïque et du Quaternaire. Ces dépôts sont liés aux fluctuations du niveau de base de l'océan Atlantique, dont l'amplitude de variation a dépassé 300 mètres depuis le Pliocène (Klammer, 1984).

On y distingue traditionnellement : des zones inondables lors des hautes eaux (*várzeas*) constituées de sédiments holocènes, et des zones non affectées par les inondations (*terra firme*), constituées de sédiments cénozoïques (Sioli, 1964). Les *várzeas* ont une superficie de l'ordre de 50 à 60000 km<sup>2</sup> (Sioli, 1984). Plus de 8000 lacs ont été répertoriés dans cette région (Melack, 1984).

Sous l'épaisse couverture sédimentaire, des mouvements du socle précambrien ont fait apparaître trois arcs (Figure 3), mis en évidence par géophysique et sondages : l'arc d'Iquitos, l'arc de Purus et l'arc de Gurupá. Ces arcs, constitués de roches cristallines correspondant à des zones de soulèvement, ont séparé de temps en temps des parties du bassin les unes des autres, jouant ainsi un rôle dans la distribution des faciès sédimentaires. Des phénomènes de subsidence, portant sur de très longues périodes, ont ainsi permis l'accumulation d'une épaisse pile de sédiments : de 3000 à 4000 m dans le haut bassin (à l'Ouest de l'arc d'Iquitos), environ 7000 m dans la zone centrale, et plus de 11000 m au large, au niveau du cône de l'Amazonie (Putzer, 1984).



En dehors de ces arcs, qui sont des accidents majeurs, le rejeu des fractures affectant le socle, ainsi que la flexion du bouclier à l'approche des Andes (Lyon-Caen & al., 1985), entraînent des perturbations dans la géométrie de la couverture sédimentaire sus-jacente, même non consolidée, comme le montrent les alignements structuraux observés sur le réseau de drainage de certains cours d'eau (Sternberg, 1950; Sternberg & Russel, 1952), ou encore sur la géométrie de certains lacs en Amazonie bolivienne (Plafker, 1964; Allenby, 1988).

La conséquence de cette structure sous-jacente, sera l'existence de trois grands domaines distincts, aux caractéristiques géomorphologiques et hydrographiques propres (Sioli, 1964, 1967, 1975, 1984; Mertes, 1985)

Le haut bassin de la plaine amazonienne correspond à la partie située entre le piedmont des Andes et l'arc du Purus (ou la confluence avec le Rio Negro). Cette zone, appelée "Llanos ou Llanura" au Pérou et en Bolivie, est drainée par les grands cours d'eau issus des Andes (Rio Marañón, Rio Ucayali, Rio Madeira), transportant vers l'aval les produits de l'érosion de la chaîne montagneuse.

Les fleuves de cette région présentent de nombreux méandres, et se déplacent latéralement au cours du temps, créant de nombreux lacs en forme de croissant (*Oxbow lakes*) correspondant aux méandres abandonnés. Le déplacement latéral de ces cours d'eau s'effectue par des phénomènes d'érosion sur la rive concave (*terras caídas*) accompagnés de phénomènes de sédimentation sur la rive opposée (Sternberg, 1975).

Cette érosion latérale qui est un facteur de rajeunissement permanent des surfaces du haut bassin, traduit une situation continuellement instable, liée à la géodynamique de l'avant-pays andin (Baker, 1978; Campbell & Frailey, 1984; Salo & al., 1986; Räsänen & al., 1987, 1990; Dumont, 1988; Dumont & al., 1990; Räsänen, 1991). D'autre part, les variations du climat, au cours du Quaternaire dans le bassin amazonien, faisant alterner saisons sèche et humide (Tricart, 1974, 1977; Servant & Villarroel, 1979; Servant & al., 1981; Colinvaux, 1987; Colinvaux & al., 1985; Absy & al., 1991), sont également des facteurs d'instabilité.

La zone centrale du bassin amazonien, comprise entre l'arc du Purus (ou le Rio Negro) et l'arc de Gurupá (ou le Rio Xingú), est bien délimitée au Nord et au Sud par les reliefs des boucliers guyanais et brésilien. Il s'agit du domaine du grand fleuve Amazone ayant reçu les apports de tous ses tributaires andins. Le fleuve ne méandre quasiment plus, et c'est le domaine typique des várzeas.

La particularité de la várzea, temporairement inondée, en relation ou non avec un fleuve andin, en fait un écosystème original où se développe une activité biologique considérable, donnant à ce milieu aquatique une grande fertilité (Junk, 1982, 1984).

Dans cette région les tributaires de l'Amazone (Rio Negro, Rio Tapajós, Rio Xingú), issus des boucliers brésilien et guyanais, ont des vallées très larges, aux contours déchiquetés, évoquant la forme des plans d'eau de réservoirs. Ces fleuves-lacs (*rias*) correspondent à d'anciennes vallées, aujourd'hui submergées, qui ont été creusées lors de la dernière glaciation (Würm) alors que les niveaux marins se situaient 130 mètres plus bas que le niveau actuel des océans (Tricart, 1975; Irion, 1976). C'est pour cela que des profondeurs de 100 mètres sont fréquemment observées dans ces cours d'eau (Sioli, 1967). Ceci explique également la présence d'un canyon dans le lit de l'Amazone à Manacapuru (Jacon & al., 1987, 1988) ainsi que dans le plateau continental, au large de l'estuaire (Damuth & Kumar, 1975).

Drainant des séries anciennes aplanies, les affluents de l'Amazone transportent très peu de matériel sédimentaire, et celui-ci se dépose rapidement à l'amont des rias, en bancs rectilignes, alors que dans le cours de l'Amazone, le colmatage de l'ancienne vallée semble terminée grâce aux apports issus des Andes (Irion, 1976; Sioli, 1984).

L'estuaire de l'Amazone correspond à la partie située à l'Est de l'arc de Gurupá (ou confluence du Rio Xingú). Dans l'estuaire, la zone de dépôt atteignant jusqu'à 80 km de largeur est une vraie várzea (Sioli, 1984). Une partie des eaux de l'Amazone est déviée vers le Rio Pará, par le détroit de Breves (*Estreitos de Breves*) au Sud de l'île de Marajó. Cette île, constituée de terra firme, est soumise à l'érosion océanique sur sa côte Nord.

Les sédiments exportés par l'Amazone se déposent dans l'Atlantique, vers le Nord, le long de la côte guyanaise, en raison du courant Atlantique Nord équatorial, qui empêche la formation d'un vrai delta (Sioli, 1984; Nittrouer & al., 1986). Mais sous le niveau de la mer, les apports sédimentaires de l'Amazone ont créé un cône de déjection, recoupé par un profond canyon. La sédimentation cyclique observée sur ce cône est liée aux variations eustatiques (Manley & Flood, 1988). Quand le niveau marin est élevé, les sédiments restent piégés sur le continent, et lorsque le niveau marin est au plus bas (Wisconsin), des taux de sédimentation de 30 cm par  $10^3$  ans sont mesurés sur le cône de déjection de l'Amazone (Damuth & Kumar, 1975; Damuth & Flood, 1984). Un bilan approximatif de la sédimentation sur le plateau continental ( $900 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ ) a montré des résultats du même ordre de grandeur que ceux relatifs au flux de matières particulaires exportées par l'Amazone (Kuehl & al., 1982).

L'influence de l'Amazone sur la sédimentation océanique est prédominante au large de la Guyane (Eisma & Van der Marel, 1971; Jouanneau & Pujos, 1987, 1988; Pujos & al., 1988; Djuwansah & al., 1992; Krook, 1992), et demeure encore nettement perceptible dans la mer des Caraïbes, quelques 2500 km au Nord-Ouest de l'embouchure du fleuve (Bowles & Fleischer, 1985).

### I.B.3. Les sols et la végétation.

La forêt tropicale amazonienne (*tropical rain-forest* ou *Hylea*) s'étend sur près de 5 millions de  $\text{km}^2$  (soit 70% de la superficie du bassin versant), correspondant pratiquement à l'ensemble de la plaine amazonienne, où elle laisse place à quelques îlots de savane appelés *Campos* (Kohlhepp, 1978).

Malgré cette apparente unité de la couverture végétale, la distribution des types de sols en Amazonie montre une certaine hétérogénéité (Sombroek, 1966, 1984). La majorité des sols observés présentent un bon drainage. Dans la partie orientale, les sols développés sur quatre terrasses plio-pléistocènes sont profonds, bien drainés, très acides, jaune-bruns, friables et poreux. Ils sont essentiellement limoneux à sableux, et la kaolinite prédomine largement dans la fraction argileuse, avec un léger pourcentage d'oxydes de fer. Bien que chimiquement pauvres, ces sols supportent une forêt fermée (*Canopy Forest*). Dans la partie occidentale, les sols dérivent des formations sédimentaires récentes d'origine andine provenant de l'érosion des formations du Paléozoïque et du Mésozoïque, moins altérées. Ces sols sont jaune-bruns, acides, et souvent moins bien drainés que dans la partie orientale. Ils sont essentiellement silteux et la fraction argileuse contient un

pourcentage appréciable d'illite, en plus de la kaolinite et des sesquioxydes. Ces sols sont généralement couverts d'une forêt ouverte.

Dans certaines régions de la plaine amazonienne, les sols sont mal drainés. Des sols avec cuirasse se développent sur les basses terrasses et les interfluves, en présence d'une nappe peu profonde affectée de variations saisonnières, dans des sédiments pas trop sableux, comme cela est le cas dans les Llanos de Bolivie (Cochrane, 1973). Ces sols supportent soit une forêt basse et dispersée, soit une végétation arbustive, soit encore une savane, notamment dans les parties centrales de ces terrains. Enfin, les podzols se développent sur des sédiments sableux provenant de l'érosion du bouclier cristallin (Klinge, 1965), notamment dans la partie septentrionale de la plaine centrale. Ils sont couverts de savanes (*Campina*) ou forêts (*Caatinga*).

Dans la plaine d'inondation (zone de várzea), les sols alluviaux sont souvent très mal drainés. Leurs caractéristiques dépendent de l'origine des matériaux sédimentaires et des conditions locales des inondations. Le long des cours d'eau d'origine andine, les fluvisols qui présentent un drainage lié à leur stratigraphie sédimentaire fluviale, sont non-acides, quelquefois calcaires, et présentent un assemblage argileux à base d'illite et de montmorillonite.

D'une manière générale, la fraction argileuse des sols de la plaine amazonienne se distribuent suivant deux types antagonistes en région tropicale. Les sols bien drainés développeront des profils à kaolinite, alors que les sols mal drainés favoriseront la formation de montmorillonite (Irion, 1983, 1984; 1991).

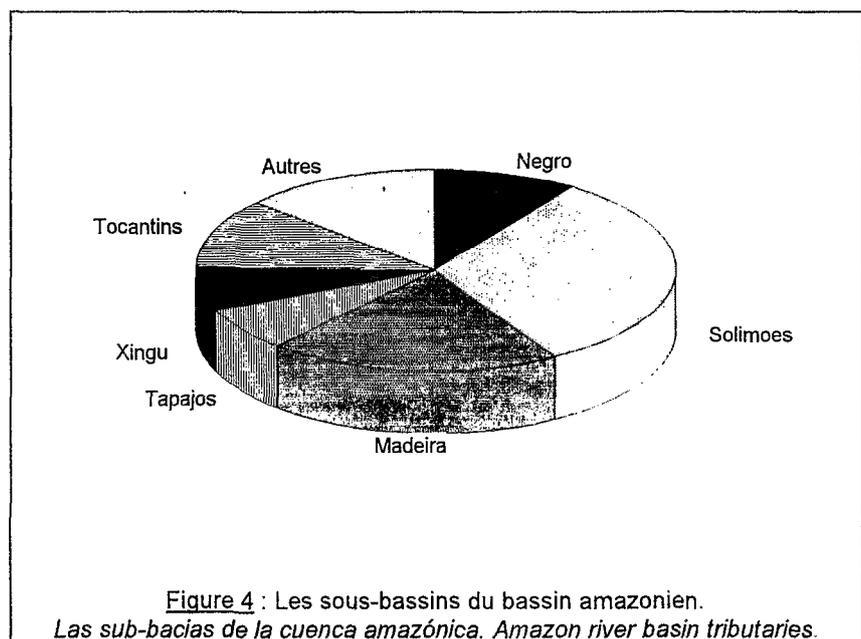
#### **I.B.4. Les grands bassins hydrographiques.**

Le bassin de l'Amazone est classiquement divisé en 6 sous-bassins (Figure 2 & Figure 4), qui sont :

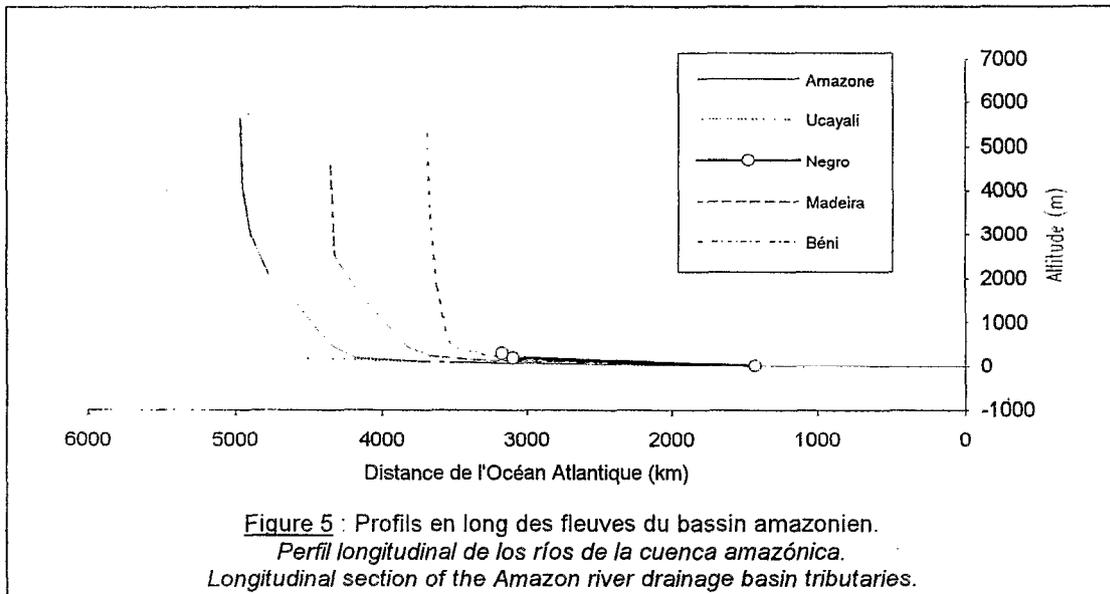
- \* le Rio Solimões à la confluence avec le Rio Negro ( $2.24 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ )
- \* le Rio Negro à la confluence avec le Rio Solimões ( $0.68 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ )
- \* le Rio Madeira à la confluence avec le Rio Amazonas ( $1.37 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ )
- \* le Rio Tapajós à la confluence avec le Rio Amazonas ( $0.48 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ )
- \* le Rio Xingú à la confluence avec le Rio Amazonas ( $0.51 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ )
- \* le Rio Tocantins à la confluence avec le Rio Pará ( $0.77 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ )

Les bassins du Rio Tocantins ( $0.8 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ) et du Rio Pará ( $0.2 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ) ne sont pas toujours considérés comme partie intégrante du bassin de l'Amazone, qui dans ce cas voit sa superficie ramenée à  $6.0 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ . Enfin, certaines études sur l'Amazone ne considèrent que la superficie du bassin versant à Obidos ( $4.67 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ), qui est la dernière station hydrométrique avant l'influence des marées.

Les bassins des deux fleuves d'origine andine (Rio Solimões et Rio Madeira) représentent 52% de la superficie totale du bassin amazonien, mais c'est uniquement la partie montagneuse de leur bassin (11% de la



1. Le bassin amazonien

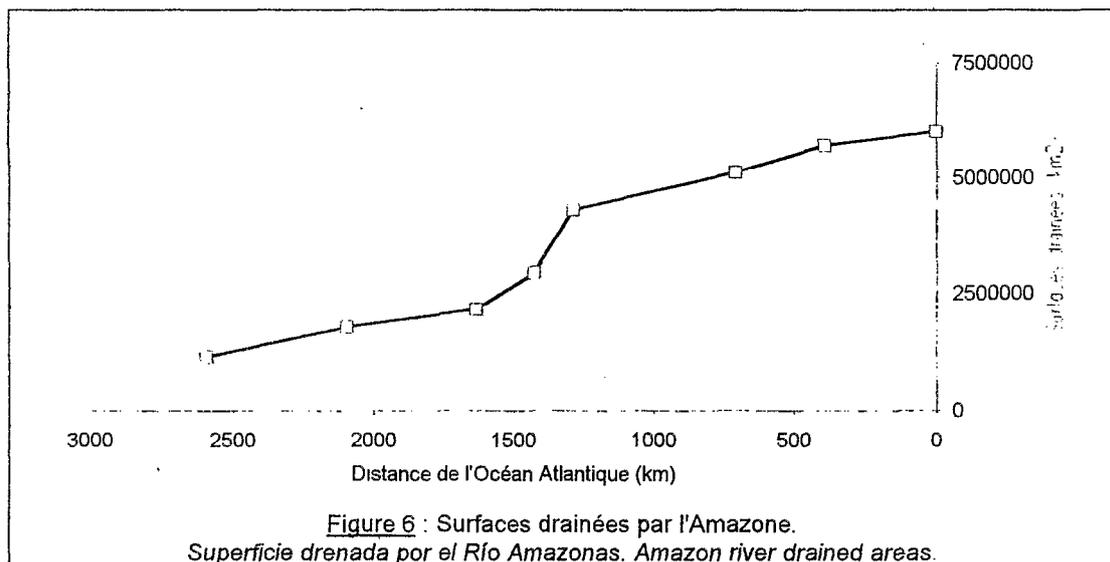


superficie totale) qui leur confère leurs caractéristiques. Le Rio Solimões draine 65% de la partie andine du bassin amazonien ( $0.70 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ), et le Rio Madeira 35%.

Le Rio Negro draine une partie du bouclier guyanais, alors que les fleuves Tapajós, Xingú et Tocantins sont issus du bouclier brésilien, également drainé par le Rio Madeira. Le Rio Madeira est le seul grand fleuve du bassin amazonien qui draine à la fois la Cordillère des Andes, le socle précambrien, et traverse les dépôts sédimentaires de la plaine amazonienne (Goulding, 1979). Cette originalité, héritée de l'histoire géologique du bassin, lui donne certains caractères propres. Dans les Andes, les formateurs du Rio Béni (ríos La Paz et Luribay) drainent une partie de l'Altiplano bolivien (environ 3%).

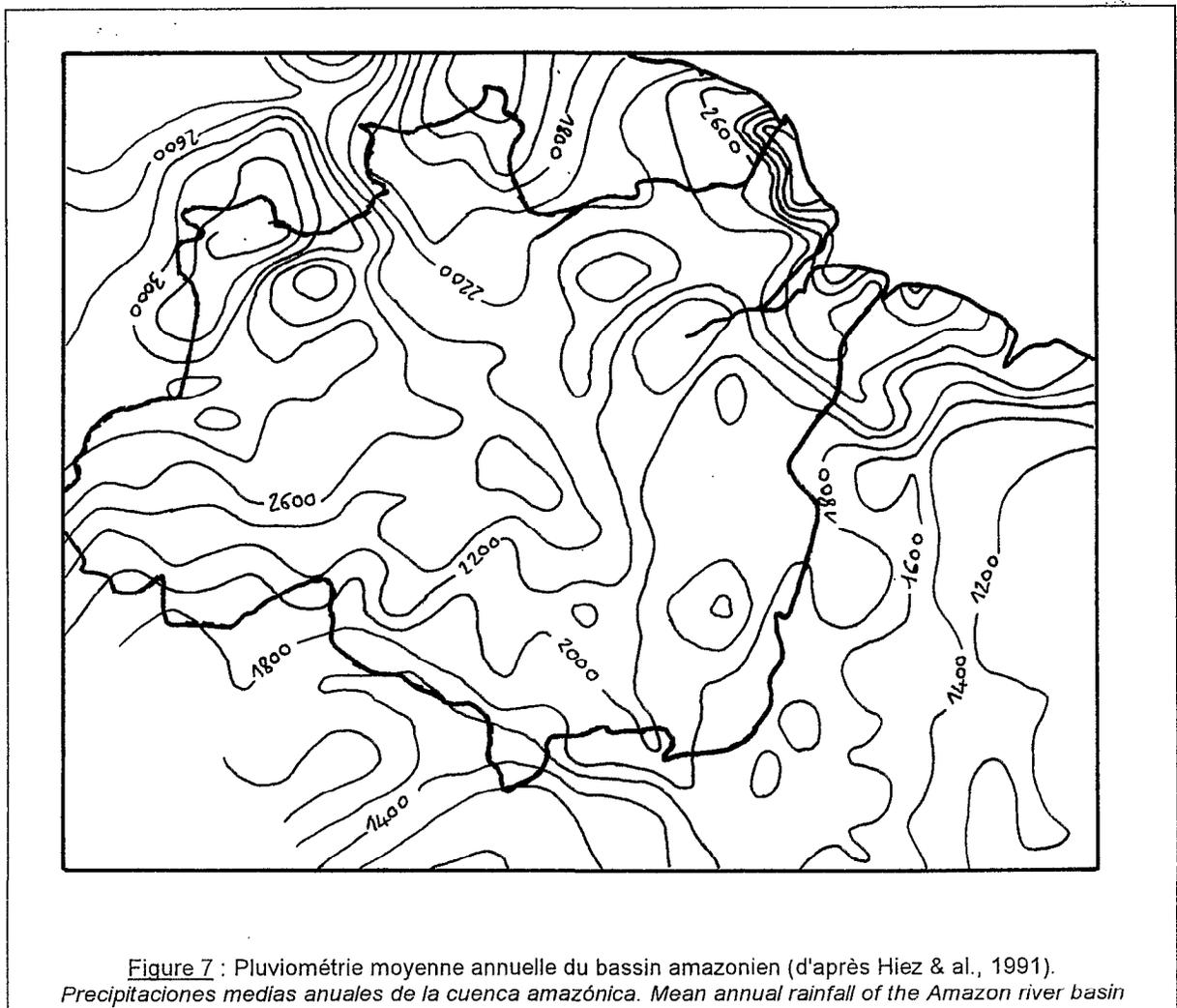
Le profil en long des principaux fleuves d'Amazonie (Figure 5) permet de situer l'apport des Andes le long du cours de l'Amazone. Les bassins du Haut-Madeira (Rio Béni et Rio Mamoré) sont les bassins andins situés le plus près de l'embouchure de l'Amazone dans l'Océan Atlantique.

L'augmentation des surfaces drainées par l'Amazone le long de son cours (Figure 6), montre l'importance des bassins des rios Negro et Madeira qui confluent aux environs de Manaus, à 1300-1400 km de l'embouchure de l'Amazone dans l'Océan Atlantique. La convergence de ces deux grands tributaires aux caractéristiques hydrologiques différentes, va perturber l'écoulement de l'Amazone dans cette région.

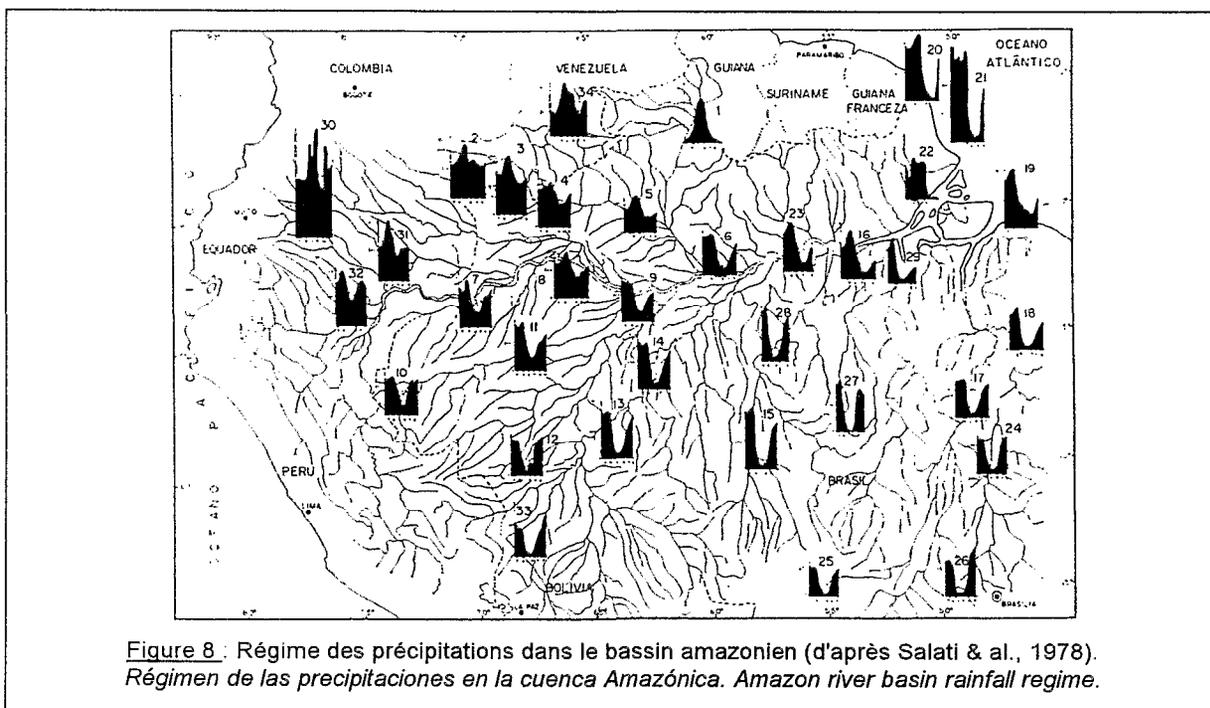


### I.C. LE CLIMAT DU BASSIN AMAZONIEN.

La climatologie générale de l'ensemble du bassin amazonien, tout au moins dans sa partie brésilienne, a fait l'objet de nombreuses études (Johnson, 1976; Ratisbona, 1976; Snow, 1976; Villa Nova & al., 1976; Salati & al., 1978; Dall'Olio & al., 1979; Salati & al., 1979; Nimer, 1979; Marques & al., 1980; Salati & Matsui, 1981; Jordan & Heeveldop, 1981; Salati & Marques, 1984; Costa Barros & al., 1985; Roche & Rocha, 1985; Roche & Fernandez, 1988; Hiez & al., 1991, 1992). Il en ressort que les précipitations sont presque uniquement d'origine atlantique et que la plaine amazonienne reçoit de grandes quantités de pluie, estimées à 2200 mm.an<sup>-1</sup> pour le bassin brésilien (Figure 7). La moitié du volume de ces précipitations retourne dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau, du fait de la très forte évapotranspiration de la forêt amazonienne. Ainsi, la lame d'eau précipitée correspond pour environ 50% à de la vapeur d'eau recyclée (Salati & Marques, 1984). La forêt amazonienne joue donc un rôle fondamental dans l'équilibre climatique du bassin. Une déforestation à grande échelle pourrait entraîner des perturbations climatiques et écologiques irréversibles (Fränzle, 1979; Franken & Leopoldo, 1984; Nobre, 1991).



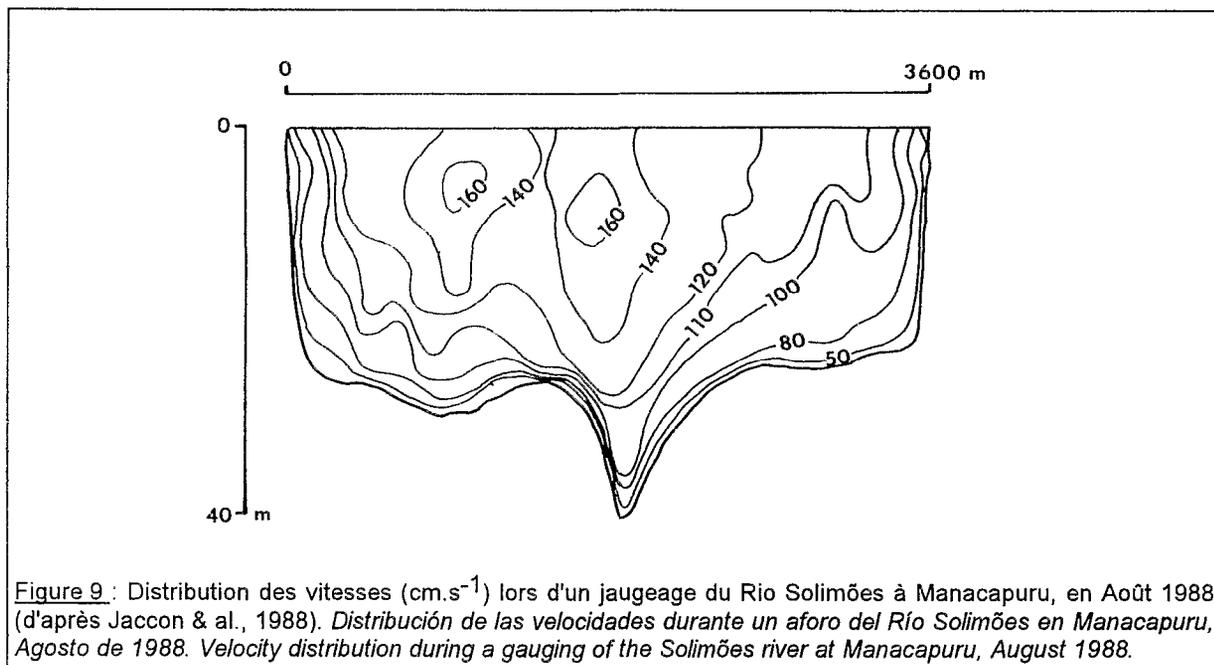
La distribution saisonnière des précipitations (Figure 8) permet d'individualiser trois grands domaines. La partie méridionale est caractérisée par l'existence d'une saison sèche très marquée, avec un minimum des précipitations hivernales en juin-juillet. Ce minimum est moins marqué à l'Ouest qu'à l'Est. Dans la partie septentrionale du bassin, de l'Océan Atlantique à 60° W, la quantité d'eau reçue est plus grande et la majeure partie des précipitations se produit entre novembre et juillet. Plus à l'Ouest, la pluviométrie est caractérisée par une série de maxima et minima, sans saison sèche bien marquée (Salati & al., 1978).



**I.D. L'HYDROLOGIE DE L'AMAZONE.**

Les premières estimations du débit de l'Amazone datent du siècle dernier (Reclus, 1880; Siemens, 1896; Katzer, 1897). Pardé estime ensuite ce débit à 90-100000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, à partir de calcul de bilan hydrique et des observations de Le Cointe (Le Cointe, 1935; Pardé, 1936, 1955). Les premiers jaugeages de l'Amazone, réalisés en 1963-64 à Obidos par l'U.S. Geological Survey (Davis, 1964; Oltman & al., 1964; Pardé, 1965, 1966; Oltman, 1967) indiquent un débit moyen annuel de 157000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. L'apport à l'Océan Atlantique est estimé à 175000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

Malgré une pente très faible (de 0.001 à 0.002% respectivement en basses et en hautes eaux), les vitesses mesurées sur l'Amazone sont fortes : de 0.5 à 3 m.s<sup>-1</sup> (Sioli, 1984). Des mesures isotopiques (<sup>18</sup>O) des eaux ont permis d'estimer les apports relatifs des rios Negro (43%) et Solimões



(57%) à l'Amazone (Matsui & al., 1972, 1976; Salati & Matsui, 1981). Ces observations sont du même ordre de grandeur que les premières mesures réalisées par l'U.S. Geological Survey (Oltman & al., 1964). Par contre, les résultats récents du programme HIBAM (DNAEE/CNPq/ORSTOM) indiquent que les contributions relatives des rios Solimões et Negro sont respectivement de 79% et 21% (Molinier, 1992).

Depuis 1972, le département national de l'eau et de l'énergie électrique du Brésil (DNAEE), gère un réseau de plus de 400 stations hydrométriques sur le bassin brésilien de l'Amazone (Fernandes, 1987). Après une tentative de mise en place d'un réseau de télémesures par transmission satellitaire géostationnaire (Václav & Serrano, 1983), le DNAEE en coopération avec l'ORSTOM, a installé sur son réseau en 1985, 20 stations de télétransmission ARGOS permettant le suivi en temps réel de l'hydrologie des principaux formateurs de l'Amazone (Callède & al., 1986, 1987).

Les stations du cours principal de l'Amazone sont caractérisées par des courbes d'étalonnage non univoques (Meade & al., 1991). Des jaugeages de l'Amazone par exploration complète du champ des vitesses ont été réalisés dans le cadre d'un cours international d'hydrométrie des grands fleuves, à Manacapuru (Figure 9) et à Obidos (Jacon, 1983, 1987; Jacon & al., 1984, 1985, 1986, 1987; 1988). Ces résultats ont permis d'établir pour la première fois des courbes d'étalonnage fiables des stations du cours principal de l'Amazone, basées sur la méthode du gradient limnimétrique (Guimarães & Jacon, 1983; Jacon, 1983, 1986; Jacon & Cudo, 1987). L'étude du bilan hydrologique du bassin amazonien a débuté en 1990 (Molinier & al., 1991, 1992).

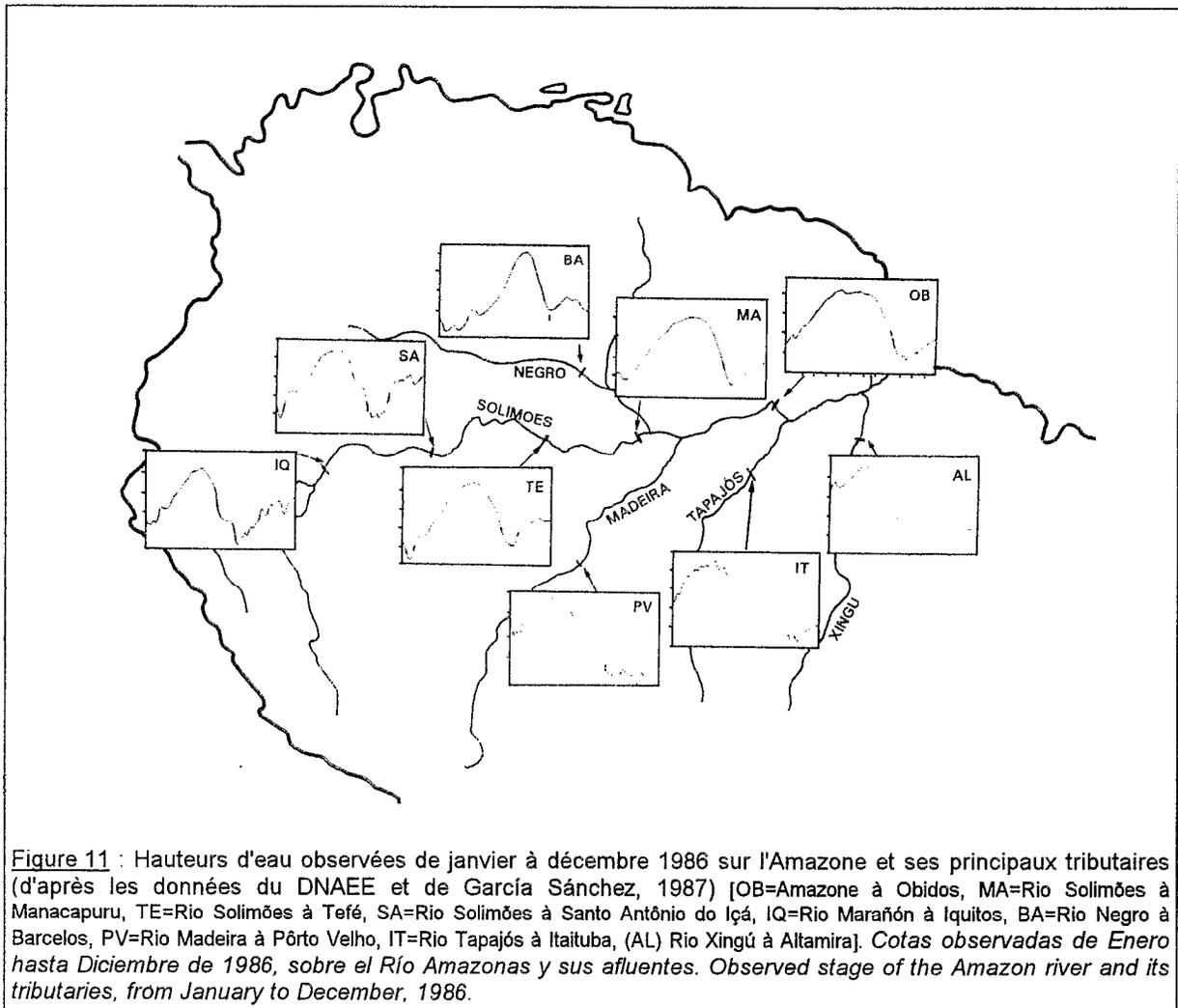
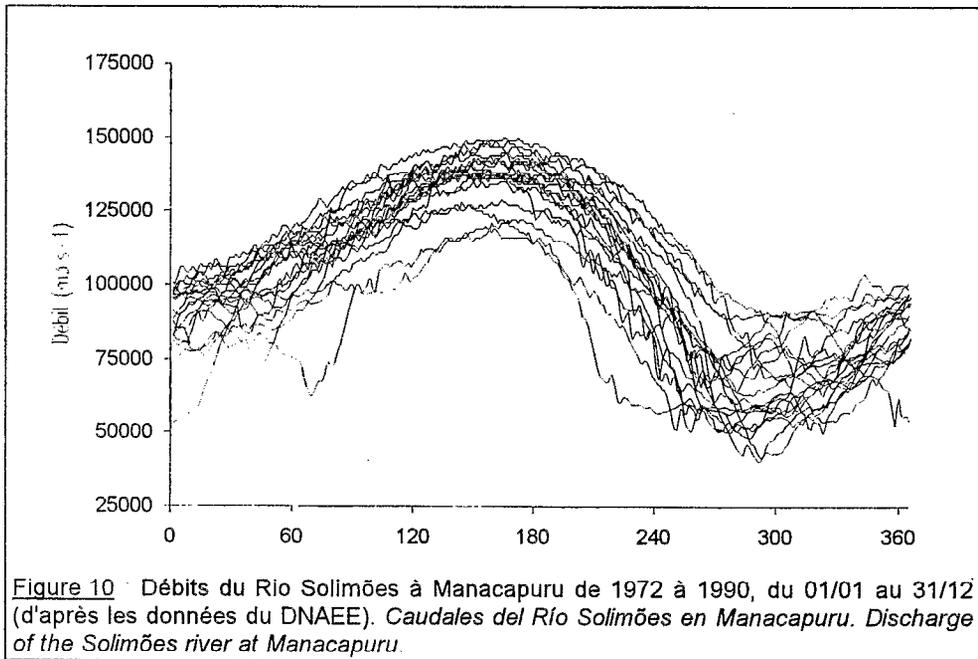
Le débit moyen interannuel de l'Amazone est aujourd'hui estimé à 205000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (Molinier & al., 1992), ce qui le place très largement en tête des plus importants fleuves du monde en termes de débit (Tableau II). L'Amazone contribue pour environ 20% aux apports mondiaux d'eau douce aux océans.

Tableau II : Débits de 20 grands fleuves mondiaux.  
Caudales de 20 grandes ríos del mundo. Discharge of 20 great rivers of the world.

	Bassin <i>Degens &amp; al., 1991</i>	Débit (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup> )	Bassin <i>Probst, 1990</i>	Débit (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup> )
1	Amazone	5780	Amazone	6300
2	Zaïre (Congo)	1300	Zaïre (Congo)	1300
3	Orénoque	1100	Orénoque	1100
4	Gange + Brahm.	971	Gange + Brahm.	971
5	Yangtze	925	Yangtze	928
6	Mékong	666	Mississippi	580
7	Ienisseï	555	Ienisseï	562
8	Lena	505	Lena	533
9	Parana	470	Mékong	530
10	Ob	433	Parana	470
11	Irrawaddy	428	Irrawaddy	428
12	Saint Laurent	413	Ob	419
13	Mississippi	410	Saint Laurent	413
14	Mackenzie	249	Amour	325
15	Volga	243	Xijiang	302
16	Indus	238	Columbia	251
17	Xijiang	222	Mackenzie	249
18	Magdalena	215	Indus	238
19	Yukon	210	Magdalena	237
20	Danube	198	Zambèze	223

Malgré une certaine disparité régionale du régime des précipitations, le régime de l'Amazone (Figure 10) présente une nette alternance de hautes eaux (de mai à août) et de basses eaux (de septembre à décembre), qui permet l'existence de zones temporairement inondées : les várzeas.

1. Le bassin amazonien.



La crue annuelle se propage de l'amont vers l'aval en plusieurs mois, en raison de la longueur du fleuve et de l'extension des várzeas par lesquelles transitent 30% du volume d'eau de l'Amazone (Richey & al., 1989). En 1986, le Rio Marañón à Iquitos (Pérou) est en maximum de crue vers le 10 mai (García Sánchez, 1987). A Manacapuru (à proximité de Manaus, Brésil), le Rio Solimões atteint son plus haut niveau à la mi-juillet (d'après les données du DNAEE). Le déphasage observé entre Iquitos et Manacapuru est de 65 jours pour un parcours de 2000 km (Figure 11). A Obidos, l'Amazone présente un limnigramme avec un étalement du maximum sur plusieurs mois, correspondant au cumul des apports des rios Solimões, Negro, et Madeira.

L'évolution du débit moyen annuel du Rio Solimões à Manacapuru de 1973 à 1990 (Figure 12) montre une certaine irrégularité, avec un minimum observé en 1980. La courbe des hauteurs d'eau moyennes du Rio Negro à Manaus présente pour la même période une évolution similaire. Le limnigramme du Rio Negro peut donc être utilisé comme un bon indicateur du ruissellement de l'Amazone, le niveau des eaux du Rio Negro à Manaus étant plus lié au niveau des eaux du Rio Solimões qu'à son propre débit (Nordin & Meade, 1982). L'analyse spectrale des débits reconstitués de l'Amazone avec l'indice d'oscillation australe (ENSO) indique que les variations de l'hydrogramme sont couplées aux cycles climatiques du Pacifique tropical (Richey & al., 1989). Des observations similaires sur le Rio Trombetas, ont démontré l'influence de phénomènes de type El Niño sur l'hydrologie de certains cours d'eau du bassin amazonien (Molion & Moraes, 1987; Molion, 1991).

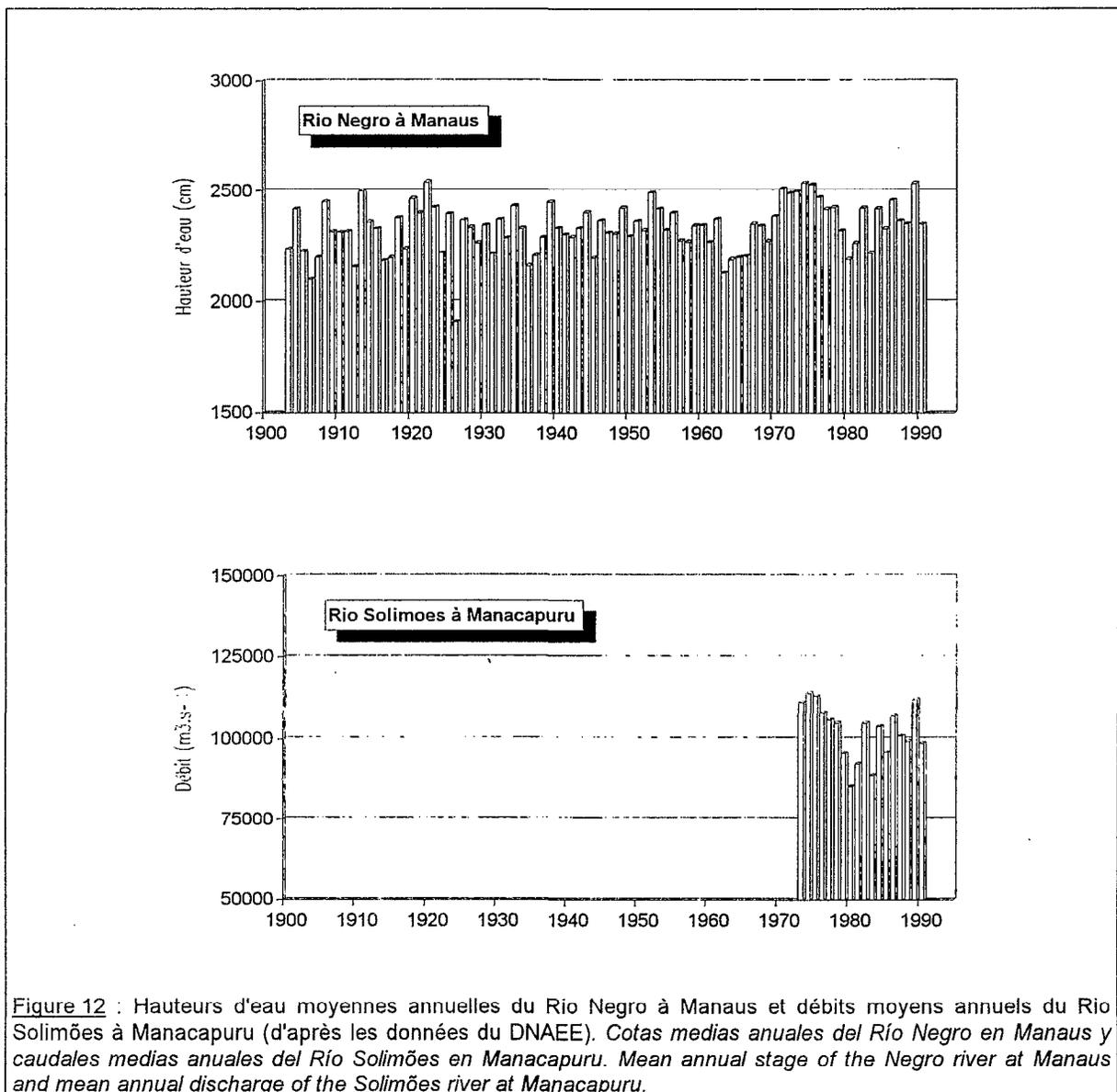


Figure 12 : Hauteurs d'eau moyennes annuelles du Rio Negro à Manaus et débits moyens annuels du Rio Solimões à Manacapuru (d'après les données du DNAEE). *Cotas medias anuales del Río Negro en Manaus y caudales medias anuales del Río Solimões en Manacapuru. Mean annual stage of the Negro river at Manaus and mean annual discharge of the Solimões river at Manacapuru.*

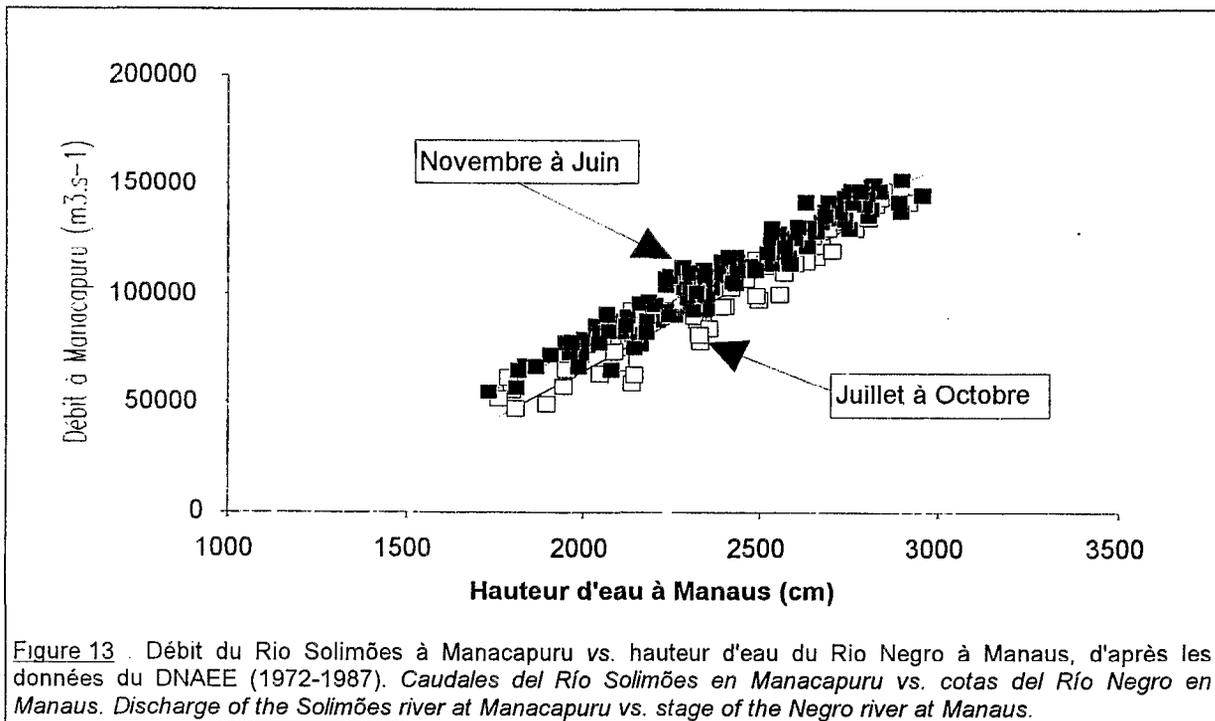


Figure 13 . Débit du Rio Solimões à Manacapuru vs. hauteur d'eau du Rio Negro à Manaus, d'après les données du DNAEE (1972-1987). *Caudales del Río Solimões en Manacapuru vs. cotas del Río Negro en Manaus. Discharge of the Solimões river at Manacapuru vs. stage of the Negro river at Manaus.*

Si les hauteurs d'eau du Rio Negro à Manaus ne peuvent pas expliquer de manière univoque les débits instantanés du Rio Solimões à Manacapuru (Jacon & al., 1987, 1988), les valeurs moyennes mensuelles de ces deux variables sont bien corrélées (Richey & al., 1989). La meilleure corrélation (Figure 13) est obtenue en distinguant les mois de montée de crue (de Novembre à Juin) des mois de décrue (de Juillet à Octobre). Ainsi les débits du Rio Solimões à Manacapuru peuvent être reconstitués pour la période 1903-1987 (Tableau III).

Tableau III : Débit moyen mensuel (en  $m^3.s^{-1}$ ) du Rio Solimões à Manacapuru (d'après les données du DNAEE) [A = 1972-1987, B = 1903-1987 données reconstituées]. *Caudales medias mensuales del Río Solimões en Manacapuru. Monthly mean discharge of the Solimões river at Manacapuru.*

	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy.
A	97000	99600	108000	123000	135000	140000	134000	115000	89100	73100	74300	85400	106000
B	85600	97500	107000	120000	132000	138000	128000	114000	84700	55600	65700	74000	100000

Enfin, l'influence de la déforestation des bassins sur l'augmentation des crues de l'Amazonie ou de ses tributaires est l'objet de controverses (Gentry & López Parodi, 1980; Nordin & Meade, 1982; Sternberg, 1987). En marge du bassin amazonien, des expériences réalisées en Guyane Française par le programme Ecerex ont montré que le défrichement mécanisé entraîne une augmentation du ruissellement (Roche, 1981, 1982) dans des proportions allant de 66 à 200% (Fritsch, 1983, 1987, 1990).

## I.E. LES MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES.

### I.E.1. Les types d'eau.

Les premiers explorateurs du bassin amazonien avaient déjà été frappés par la présence de deux types de cours d'eau : ceux qui charriaient de la boue, et pour cela avaient une couleur blanc-jaunâtre, et les fleuves aux eaux transparentes, mais de couloir noire, comme de l'encre (Rio Negro). Les très nombreux travaux de H. Sioli ont permis de préciser cette première classification des eaux du bassin amazonien, notamment en fonction de leur acidité (Sioli, 1950, 1954, 1957, 1965). Cet auteur distingue :

\* les eaux blanches (Whitewater Rivers) : cours d'eau turbides, de couleur jaunâtre à ocre, avec une faible transparence (0.1 à 0.5 m sur le disque de Secchi), et des valeurs de pH de 6.2 à 7.2

\* les eaux claires (Clearwater Rivers) : de couleur jaune-vert à olive-vert, limpides, avec une transparence de 1 à 4.3 m, et un pH de 4.5 à 7.8

\* les eaux noires (Blackwater Rivers) : de couleur olive-brun à café, quelquefois rouge-brun, légèrement turbides avec une transparence de 1.3 à 2.3 m, et des valeurs de pH comprises entre 3.8 et 4.9.

Les eaux blanches proviennent des haut-bassins montagneux des Andes (Rio Marañón-Solimões, Rio Madeira), les eaux claires sont issues de reliefs plus atténués (Rio Tapajós, Rio Xingú) du bouclier brésilien, alors que les eaux noires (Rio Negro) viennent de la plaine ou du bouclier, mais d'un type de podzol particulier (Sioli, 1975, 1984).

### I.E.2. Les matières dissoutes.

A la suite des travaux de Sioli et de son précurseur Katzer qui effectua la première analyse (Katzer, 1897), de très nombreuses études sur l'hydrochimie des cours d'eau du bassin amazonien ont été réalisées, surtout au Brésil, dans la région de la plaine centrale (Région de Manaus). Un grand nombre de ces travaux se sont focalisés sur le suivi des caractéristiques physico-chimiques des rios Solimões, Negro et Madeira (Gessner, 1960; Gibbs, 1967; Oltman, 1967; Ungemach, 1967; Williams, 1968; Geisler, 1969; Ungemach, 1972; Schmidt, 1972; Gibbs, 1972; Furch, 1976; Furch & al., 1982; Stallard & Edmond, 1983; Furch, 1984; Ferreira & al., 1988; Mortatti & al., 1989, 1992). Certaines études se sont plus particulièrement portées sur les composés organiques dissous, et aussi particulières, de ces grands fleuves (Williams, 1968; Richey & al., 1980; Wissmar & al., 1980; Leenheer, 1980; Richey, 1981, 1982; Hedges & al., 1986; Ertel & al., 1986; Devol & al., 1987; Richey & al., 1988, 1990, 1991; Paolini, 1992).

De la même manière, les lacs du bassin amazonien central ont été largement étudiés, notamment les lacs de várzea qu'ils soient en relation ou non avec l'Amazone (Marlier, 1965, 1967; Schmidt, 1972, 1973; Furch, 1976; Rai, 1978; Rai & Hill, 1980; 1981; Boechat Lopes & al., 1982; Furch, 1982; Furch & al., 1983; Devol & al., 1984; Furch, 1984; Furch & Junk, 1985; Forsberg & al., 1988; Vital & al., 1992).

Les petits cours d'eau (rivières et ruisseaux) ont également été observés et leur qualité physico-chimique décrite en Amazonie centrale (Brinkmann, 1970; Schmidt, 1972; Junk & Furch, 1980; Furch, 1986; Forti & Moreira-Nordemann, 1991; Neal & al., 1992), ou en bordure du bassin (Thornes, 1969; Edwards & Thornes, 1970; Green, 1970; Vegas Vilarrúbio, 1988; Godot & al., 1990). Certains composés en solution dans l'estuaire de l'Amazone ont fait l'objet d'études particulières (Milliman & Boyle, 1975; Fox & al., 1986), ainsi que dans les estuaires de la côte Guyanaise (Lointier, 1986; Lointier & Roche, 1989).

Enfin, quelques études ont été réalisées sur les isotopes (Reis & al., 1977; Key & al., 1985), les éléments traces en solution (Gibbs, 1973, 1977), mais aussi sur les précipitations (Ungemach, 1972; Stallard & Edmond, 1981; Jordan, 1982; Furch, 1984).

L'information ainsi obtenue sur la qualité des eaux du bassin de l'Amazone a été interprétée en fonction des caractéristiques géologiques des bassins drainés (Gessner, 1960; Gibbs, 1967, 1970, 1972; Sioli, 1968, 1969; Fittkau, 1974; Stallard & Edmond, 1983, 1987; Stallard, 1985, 1988), du sol et de la végétation (Sioli & Klinge, 1961, 1962; Klinge & Ohle, 1964; Klinge, 1967; Furch & Klinge, 1978, 1989; Brinkmann, 1983). Enfin, le rôle des caractéristiques physico-chimiques des eaux sur l'activité biologique dans les lacs et cours d'eau, a fait l'objet de nouvelles études (Fittkau, 1964; Furch & Junk, 1980; Junk & Furch, 1985; Richey & al., 1980, 1990). Celles-ci ont montré que toutes les eaux du bassin amazonien sont pauvres en électrolytes par rapport à la moyenne mondiale, et les différences observées apparaissent être liées à la géochimie des bassins. Les cours d'eau issus de la région périphérique occidentale (Andes et avant-pays andin), ainsi que les lacs de várzea alimentés par ces mêmes fleuves, présentent généralement les plus fortes salinités, et plus particulièrement pour les éléments :  $\text{HCO}_3$ , Ca, Mg, Na, K, Ba, Sr. Ces fleuves sont de type bicarbonaté-calcique (Furch, 1984).

Les massifs précambriens du Nord et du Sud produisent des eaux chimiquement très pauvres, avec un pH faible. Certaines séries du Pliocène-Pléistocène (Série de Barreiras, formation Pará) présentent des eaux encore plus acides et plus pures, alors que d'autres séries du même âge (formation Pebas) ont des eaux plus minéralisées. Dans ces séries, des zones de sables lessivés

## 1. Le bassin amazonien.

(podzol) couvertes d'une végétation particulière, produisent les eaux noires, qui sont les eaux les plus pauvres et les plus acides observées en Amazonie. Ces eaux noires contiennent en grande quantité des substances humiques colorées (Sioli, 1968), une prédominance de métaux alcalins, alors que les alcalino-terreux et les carbonates sont rares. De plus, ces eaux sont riches en éléments traces (Fe et Al), qui peuvent représenter jusqu'à 30% des éléments métalliques (Furch, 1984), ainsi qu'en silice (Stallard et Edmond, 1983).

Dans les pays andins, les études sur les matières dissoutes sont surtout l'oeuvre du programme PHICAB sur le haut bassin du Rio Madeira (Roche & al., 1986, 1991; Roche & Fernandez, 1988; Guyot & al., 1987; 1989; 1991; Guyot, 1992). Quelques études locales ont toutefois été réalisées dans certains pays andins (Hegewald & al., 1976; Pilleri & Gihir, 1977; Hegewald & Runkel, 1981; Magat, 1981).

Les apports en matière dissoute à l'océan Atlantique par l'Amazone sont estimés à  $290 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$  (Gibbs, 1967, 1972), ce qui représente environ 7% des apports mondiaux aux océans (Livingstone, 1963; Corbel, 1964, Alekin & Brazhnikova, 1968; Meybeck, 1976, 1979; Probst, 1990, Degens & al, 1991).

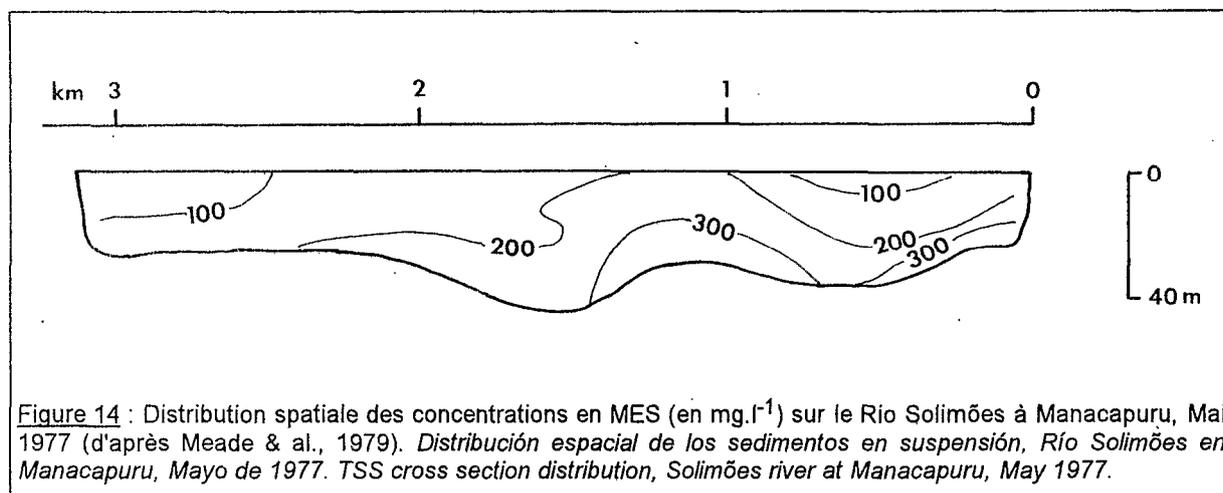
**Tableau IV** : Flux de matière dissoute (MD) de 20 grands fleuves.  
*Flujo de materias disueltas de 20 grandes ríos. TDS yield for 20 great rivers.*

	Bassin ( <i>Degens &amp; al., 1991</i> )	M.D. ( $10^6 \text{ t.an}^{-1}$ )	Bassin <i>Probst, 1990</i>	M.D. ( $10^6 \text{ t.an}^{-1}$ )
1	Amazone	290	Amazone	290
2	Yangtze	202	Yangtze	202
3	Mississippi	142	Gange + Brahm.	151
4	Gange + Brahm.	95	Mississippi	131
5	Indus	79	Irrawaddy	90
6	Saint Laurent	70	Ienissei	73
7	Ienissei	60	Mackenzie	70
8	Mékong	59	Indus	68
9	Lena	56	Danube	60
10	Rhône	56	Mékong	59
11	Volga	54	Parana	56
12	Ob	46	Ob	56
13	Mackenzie	44	Lena	55
14	Xijiang	42	Saint Laurent	54
15	Rhin	40	Orénoque	50
16	Parana	38	Xijiang	45
17	Loire	38	Yukon	43
18	Zaire (Congo)	37	Zaire (Congo)	37
19	Yukon	34	Columbia	35
20	Orénoque	31	Magdalena	28

L'Amazone reste en tête de liste des grands fleuves pour l'exportation de matière dissoute (Tableau IV), malgré des teneurs modestes, en raison de son débit nettement plus élevé que celui des autres fleuves.

### I.E.3. Les matières particulaires.

Après les travaux de Sioli (1957) et la reconnaissance de Oltman (1964, 1967), c'est l'étude de Gibbs (1967) qui donne les premières indications sur les teneurs et la qualité du matériel particulaire transporté par l'Amazone, à partir de deux campagnes d'échantillonnage (en hautes et basses eaux). Schmidt (1972) effectue un prélèvement continu à pas de temps mensuel sur l'Amazone près de Manaus. Sioli (1967, 1984) détecte la présence de dunes sur le lit du cours d'eau, qui se déplacent de l'amont vers l'aval avec une amplitude de 10 à 12 mètres (Mertes & Meade, 1985), notamment en période de crue où elles semblent représenter un part non négligeable du transport de fond.



Les mesures effectuées en 1976 et 1977 (Campagne Alpha Helix) par l'U.S. Geological Survey montrent que les concentrations en matières en suspension (MES) varient latéralement et verticalement (Figure 14), quelle que soit la taille des MES (Curtis & al., 1979; Meade & al., 1979).

Le flux total de MES exporté par l'Amazone est alors estimé à  $930 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ , la moitié provenant du Rio Solimões, et un quart du Rio Madeira (Meade & al., 1979). Un échantillonnage de sédiments du fond a montré que la granulométrie varie peu ( $d_{50}=0.25 \text{ mm}$ ) de l'amont vers l'aval, sur près de 3000 km, depuis Iquitos jusqu'à Obidos (Meade & al., 1979; Nordin & al., 1980; Mertes & Meade, 1985). Une étude soviétique menée en 1983 montre l'évolution amont-aval des MES le long de l'Amazone, dans l'estuaire, et jusqu'au large des côtes de la Guyane (Trimonis & al., 1987).

De 1982 à 1984, le programme CAMREX a permis la réalisation de 8 campagnes d'échantillonnage à différentes périodes hydrologiques (Meade, 1985; Richey & al., 1986; Ferreira & al., 1988). Les résultats obtenus ont mis en évidence des phénomènes de stockage et de re-suspension des sédiments dans le bas-Amazone, au cours du cycle hydrologique (Meade & al., 1985; Meade, 1988). Les flux de MES sont alors estimés à  $1100\text{-}1300 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ .

Tableau V : Flux de matières en suspension (MES) de 20 grands fleuves.  
*Flujo de materias en suspensión de 20 grandes ríos. TSS yield for 20 great rivers.*

	Bassin <i>Degens &amp; al., 1991</i>	M.E.S. ( $10^6 \text{ t.an}^{-1}$ )	Bassin <i>Probst, 1990</i>	M.E.S. ( $10^6 \text{ t.an}^{-1}$ )
1	Gange + Brahm.	1670	Gange + Brahm.	1670
2	Huanghe (Jaune)	900	Huanghe (Jaune)	1080
3	<b>Amazone</b>	<b>900</b>	<b>Amazone</b>	<b>900</b>
4	Yangtze	486	Mississippi	500
5	Mississippi	296	Yangtze	500
6	Irrawaddy	265	Indus	440
7	Magdalena	220	Irrawaddy	265
8	Orénoque	150	Magdalena	220
9	Indus	100	Orénoque	210
10	Danube	83	Mékong	160
11	Parana	80	Colorado	135
12	Zaïre (Congo)	48	Hungho	130
13	Rhône	40	Nil	111
14	Volga	27	Mackenzie	110
15	Niger	25	Tigre + Euphrate	105
16	Zambèze	20	Zambèze	100
17	Ienisseï	15	Godavari	96
18	Columbia	14	Parana	92
19	Ob	13	Yukon	88
20	Lena	12	Xijiang	69

En comparant cette valeur avec celles d'études globales (Schumm, 1963; Corbel, 1964; Mackenzie & Garrels, 1966; Holeman, 1968; Meybeck, 1977; Alekin, 1978; Milliman & Meade, 1983; Meybeck, 1984; Probst, 1990; Degens & al., 1991), l'Amazone exporte vers l'Atlantique de 5 à 9% des apports continentaux de MES aux océans (Tableau V). D'après ce tableau, l'Amazone est en troisième position des exportateurs de matière en suspension. En utilisant les dernières données de Meade (1985, 1988), l'Amazone obtient la seconde place du classement. Cette position reflète en réalité l'importance du débit de l'Amazone, plus que de la charge en sédiments.

Enfin, des études portant sur la géochimie des suspensions de l'Amazone ont été menées par divers auteurs (Gibbs, 1967, 1973, 1977; Sayles & Mangelsdorf, 1979; Martin & Meybeck, 1979; Gordeev & al., 1985; Gordeev & Oreshkin, 1990).

La minéralogie du matériel particulaire a également fait l'objet de quelques études portant sur l'Amazone et ses principaux tributaires (Irion, 1976, 1983, 1984, 1991), mais aussi sur les sédiments de lacs de várzeas (Irion & al., 1983). Les sédiments des cours d'eau andins sont caractérisés par une prédominance de minéraux non altérés, comme les micas et les chlorites riches en fer, alors que dans l'avant pays andin (*foreland*) les MES sont constituées essentiellement de montmorillonite, et dans une moindre mesure de kaolinite. Le matériel érodé dans les Andes se dépose dans les plaines d'inondation de l'avant pays où il est soumis à une altération sous climat tropical humide. Ensuite, la composition des MES évolue sensiblement d'amont en aval jusqu'à l'estuaire, avec un enrichissement progressif en éléments plus altérés, provenant de l'érosion latérale des plaines d'inondation (Franzini & Potter, 1983, 1985; Johnsson & Meade, 1990). Les cours d'eau issus des boucliers guyanais et brésiliens et de la plaine centrale présentent des MES riches en kaolinite et quelquefois en quartz, mais avec des teneurs toujours faibles. La seule exception observée concerne le Rio Madeira d'origine andine, qui présente un cortège de minéraux peu altérés, riches en mica/illite, chlorite et feldspath (Irion, 1984).

Au Brésil, les données obtenues sur le Rio Tocantins, non pris en compte dans les études sur l'Amazone, indiquent un flux de MES de l'ordre de  $57 \cdot 10^9 \text{ t.an}^{-1}$  (Béquio & al., 1983). Un essai de régionalisation de l'érosion au Brésil a été tenté à partir de données rudimentaires existantes (Bordas & al., 1988; Bordas, 1991).

Dans le Rondônia, le programme Polonoroeste a permis de faire la synthèse des résultats sur les transports de sédiments, mais aussi sur la climatologie et l'hydrologie d'une partie du bassin versant brésilien du Rio Madeira (Oliveira & al., 1985; Mortatti, 1988).

Dans les pays andins, il existe assez peu de données sur les transports de MES et l'érosion mécanique, hormis les résultats obtenus dans le cadre du programme PHICAB en Bolivie (Benavidez, 1988; Guyot & al., 1988, 1989, 1990; Bourges & al., 1990; Barragan, 1990). Ailleurs, les données sont peu nombreuses et restent localisées (Low, 1967; NEDECO, 1973 in Irion, 1989; Ritter, 1976, 1977; Burz, 1977; Kleeberg, 1979; ENDE, 1980; Asociación Icla, 1982; Van Vuuren, 1982; Vollmers & Palenque, 1983; Almeida & Trujillo, 1984; GTZ, 1985; Molina, 1986; Custode & Viennot, 1986; De Noni & al., 1986; Llerena, 1987), sauf pour le bassin de l'Orénoque (Meade & al., 1983; Ramirez & al., 1992).

En Guyane Française, après les premiers travaux sur les sédiments des fleuves (Bertois & Hoorelbeck, 1968), les résultats obtenus dans le cadre du programme ECEREX (Roche, 1981, 1982) montrent qu'après défrichement de la forêt amazonienne, les transports en MES augmentent dans un rapport de 20 à 30, et le charriage dans un rapport de 50 à 500 (Fritsch & Sarrailh, 1986).

# Le programme PHICAB dans le haut-bassin bolivien du Rio Madeira.

### RÉSUMÉ :

Le deuxième chapitre replace le bassin du Rio Madeira dans son contexte amazonien, et pose la problématique de l'étude entreprise en Amazonie bolivienne.

Le Rio Madeira, le plus important affluent méridional de l'Amazone ( $1.4 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ), est le seul grand fleuve du bassin amazonien qui draine à la fois la cordillère des Andes, le bouclier brésilien et la plaine amazonienne. A Villabella (frontière boliviano-brésilienne), le bassin du haut-Madeira s'étend sur  $0.9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ , dont 25% dans les Andes, et couvre les 2/3 de la Bolivie.

Résultat d'un accord de coopération entre l'ORSTOM, le SENAMHI et l'UMSA, le programme PHICAB (*Programa Climatológico e Hidrológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia*) a développé des études sur le climat, l'hydrologie, et les flux de matières dissoutes et particulaires en Amazonie bolivienne. Pour cela, il a installé un réseau de 12 stations hydrométriques dans les Llanos de Bolivie, depuis le piedmont andin jusqu'à la frontière brésilienne.

### SOMMAIRE :

II.A. Le Rio Madeira .....	p. 40
II.A.1. Le Rio Madeira dans le bassin amazonien .....	p. 40
II.A.2. Le haut-bassin du Rio Madeira en Bolivie .....	p. 42
II.B. Le Programme PHICAB en Bolivie .....	p. 42
II.B.1. L'hydrologie bolivienne .....	p. 42
II.B.2. Les objectifs du programme PHICAB .....	p. 42
II.B.3. La problématique .....	p. 43
II.B.4. Le partenariat .....	p. 45

## II.A. LE RIO MADEIRA.

### II.A.1. Le Rio Madeira dans le bassin amazonien.

Le bassin du Rio Madeira, avec une superficie de  $1.37 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  est le deuxième grand sous-bassin de l'Amazonie après celui du Rio Solimões (Figure 2 & Figure 4). Il représente 23% de la totalité du bassin amazonien, et 29% du bassin de l'Amazonie à Obidos (Tableau VI). Le Rio Madeira draine 35% de la chaîne andine comprise dans le bassin amazonien. Les principaux tributaires andins du Rio Madeira sont les rios Béni, Madre de Dios et Mamoré qui proviennent de la Cordillère orientale du Pérou et de Bolivie.

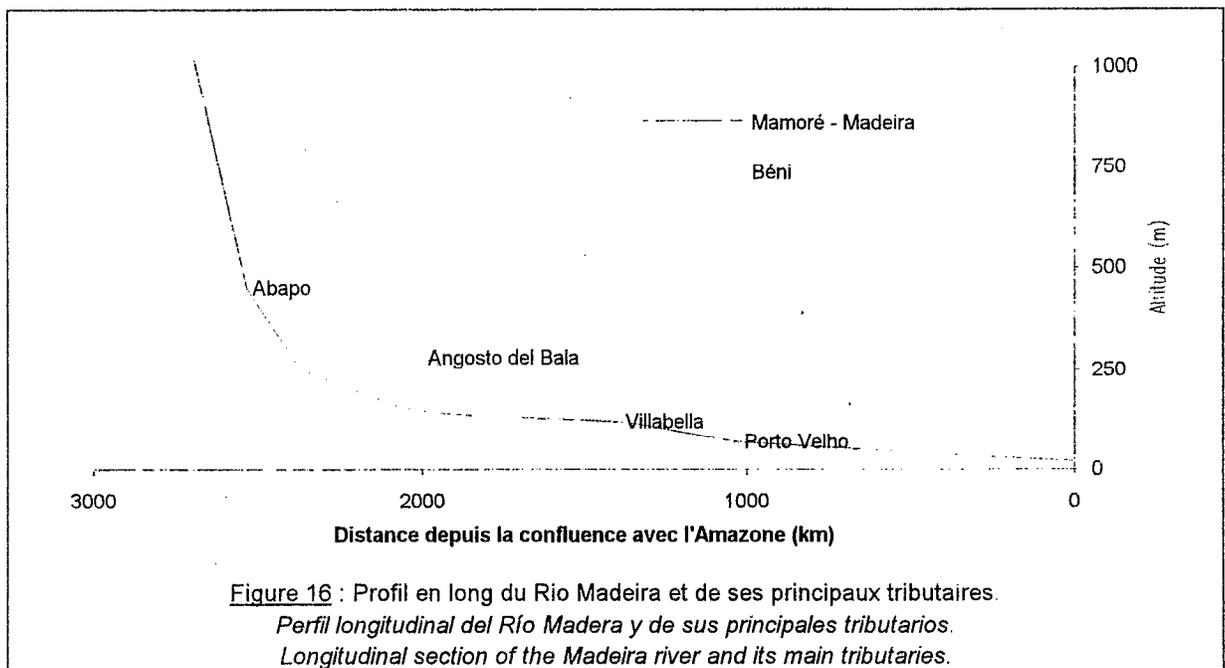
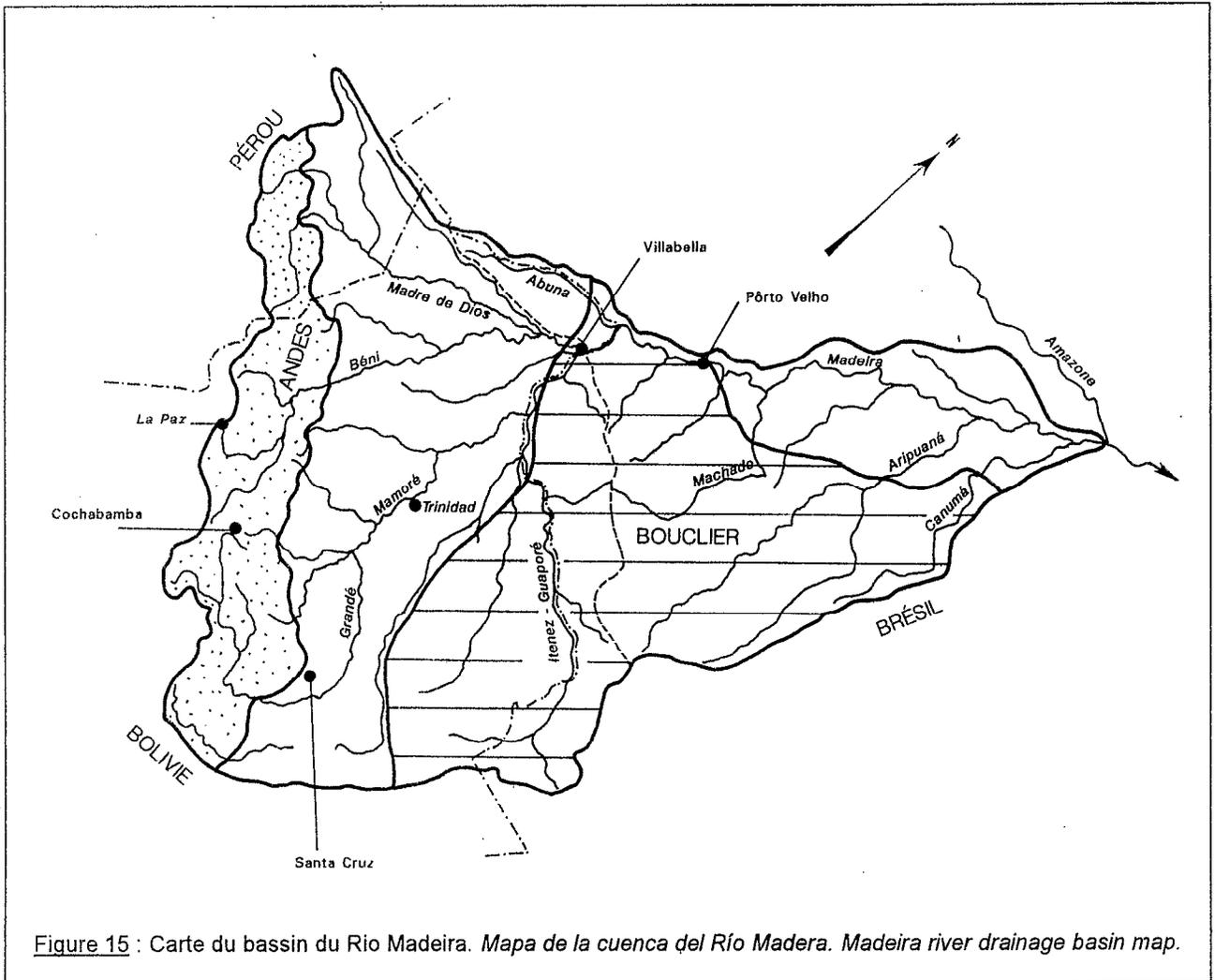
Tableau VI : Le Rio Madeira dans le bassin amazonien.  
*El Rio Madeira en la cuenca amazónica. The Madeira river in the Amazon drainage basin.*

	Superficie ( $10^6 \text{ km}^2$ )	totale du (%)	Madeira (%)	Superficie ( $10^6 \text{ km}^2$ )	des Andes (%)
<b>Amazonie à l'embouchure</b>	<b>6.00</b>	<b>100.0</b>	-	<b>0.70</b>	<b>100.0</b>
Rio Xingú (confluence)	0.51	8.5	-	0.00	0.0
Rio Tapajós (confluence)	0.48	8.0	-	0.00	0.0
<b>Amazonie à Obidos</b>	<b>4.67</b>	<b>77.8</b>	<b>100.0</b>	<b>0.70</b>	<b>100.0</b>
Rio Negro (confluence)	0.68	11.3	14.6	0.00	0.0
Rio Solimões (confluence)	2.24	37.3	48.0	0.46	65.7
<b>Rio Madeira (confluence)</b>	<b>1.37</b>	<b>22.8</b>	<b>29.3</b>	<b>0.24</b>	<b>34.3</b>
Rio Madeira à Villabella	0.90	15.0	19.3	0.24	34.3
Rio Béni à Cach. Esperanza	0.28	4.7	6.0	0.13	18.6
Rio Mamoré à Guayaramerin	0.60	10.0	12.8	0.11	15.7

Le Rio Madeira, le plus important des affluents méridionaux de l'Amazonie, semble jouer un rôle déterminant (Cf. chapitre I) sur l'hydrologie, l'hydrochimie et les matières en suspension de l'Amazonie (Pardé 1966; Gibbs, 1967; Goulding, 1979; Roche & Fernandez, 1988; Richey & al., 1986, 1989; Ferreira & al., 1988; Mortatti & al., 1989).

Le bassin du Rio Madeira s'étend sur 3 pays : la Bolivie, le Brésil et le Pérou qui occupent respectivement 51%, 42% et 7% de sa superficie. Les 3 grandes unités morpho-structurales observées sur l'ensemble de l'Amazonie sont présentes, mais avec cette particularité que le bouclier brésilien coupe la plaine amazonienne en deux ensembles distincts : la plaine amont et la plaine aval (Figure 15). Si la plaine aval fait partie intégrante de la vaste plaine amazonienne, la plaine amont est isolée par les affleurements précambriens du socle brésilien, vestiges d'une ancienne ligne de partage des eaux entre l'Atlantique et le Pacifique (Grabert, 1967, 1971). Ces affleurements jouent encore aujourd'hui le rôle de seuil hydraulique pour les tributaires andins du Rio Madeira, dont l'une des conséquences sera l'existence de vastes zones d'inondation au dessus de 100 mètres d'altitude, à l'amont de ce seuil. Entre Guayaramerin (Rio Mamoré) ou Cachuela Esperanza (Rio Béni) et Porto Velho, le Rio Madeira traverse le bouclier brésilien sur plus de 350 km où une douzaine de rapides (*Cachuelas ou Cachoeiras*) lui font franchir environ 50 m de dénivelé (Palacios, 1844-1847; Keller Leuzinger, 1874).

Les quatre unités morpho-structurales du bassin du Rio Madeira (Andes, plaine amont, bouclier brésilien et plaine aval) occupent respectivement 15%, 33%, 41% et 11% de la totalité du bassin. Les Andes dont les sommets culminent près de 6400 m (Illampu, Illimani), ferment ce bassin vers le Sud-Ouest. Les cours d'eau issus de cette chaîne montagneuse, traversent l'avant pays andin où la géométrie des écoulements est conditionnée par les mouvements récents du socle précambrien. Après le passage des cachuelas, le Rio Madeira va tracer son cours dans les séries sédimentaires de la plaine amazonienne pour rejoindre le cours de l'Amazonie (Figure 16).



### II.A.2. Le haut-bassin du Rio Madeira en Bolivie.

La Bolivie (1.1 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>) est divisée en trois grands bassins hydrographiques (Figure 17) : le bassin endoréique de l'Altiplano (13%), le bassin du Rio de La Plata (21%) qui représente le haut-bassin du Rio Paraguay, et le bassin amazonien (66%) qui correspond au haut bassin du Rio Madeira (Montes de Oca, 1982).

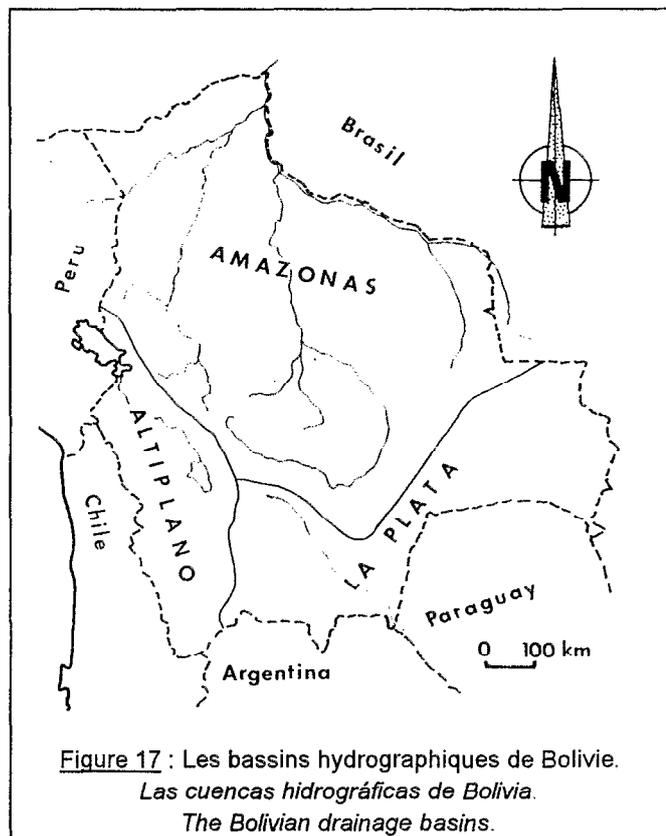
Le bassin amazonien de Bolivie représente donc les 2/3 du pays, et couvre des zones géographiques très diverses, depuis les glaciers des sommets andins jusqu'aux fleuves et lacs de la plaine amazonienne (*Llanos*). On y retrouve les trois grands domaines de l'Amazonie : les Andes, le bouclier ancien et la plaine amazonienne. Le Rio Madeira à Villabella, petite ville située en Bolivie à la confluence des rios Béni et Mamoré, draine une région de 903500 km<sup>2</sup>, correspondant à 66% de la totalité du bassin du Madeira.

## II.B. LE PROGRAMME PHICAB EN BOLIVIE.

### II.B.1. L'hydrologie bolivienne.

En Bolivie, le SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) gère un vaste réseau national de stations climatologiques et hydrologiques. Si les postes climatologiques, qui mesurent essentiellement la température et les précipitations, couvrent assez bien l'ensemble du territoire bolivien, les stations hydrométriques ne concernent que la partie andine du pays. Dans le bassin amazonien, les stations les plus avancées sont situées au piedmont des Andes (Rio Béni à Angosto del Bala, Rio Grande à Abapo), et il n'existait avant le programme PHICAB aucune chronique de hauteurs d'eau des grands fleuves (Rio Béni, Madre de Dios, Mamoré ou Itenez-Guaporé) malgré leur importance cruciale en temps que voie de communication.

Au réseau national du SENAMHI, se superposent d'autres réseaux, moins denses, comme celui de la AASANA (Administración de los Aeropuertos y los Servicios Auxiliares para la Navegación Aérea) qui gère les stations météorologiques et climatologiques des aéroports, le réseau de stations pluviométriques et hydrométriques de ENDE (Empresa Nacional de Electricidad) sur les sites potentiels d'aménagements hydro-électriques, et le réseau hydrométrique d'annonce de crues du SEARPI (Servicio de Encauzamiento de Aguas del Río Piray) sur le bassin andin du Rio Piray.



### II.B.2. Les Objectifs du Programme PHICAB.

Le programme PHICAB (Programa Climatológico e Hidrológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia) a été mis au point entre l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) et plusieurs partenaires boliviens, pour étudier l'hydrologie, la climatologie, et la qualité des eaux du bassin amazonien de Bolivie (Roche & Canedo, 1984; Roche 1986; 1988). Malgré l'importance primordiale de ce haut-bassin du Rio Madeira sur les apports à l'Amazone, il n'existait quasiment aucune information sur l'hydrologie, la climatologie et les transports

de matières dissoutes et particulaires de ses différents tributaires. Le programme PHICAB a débuté en 1983, et s'est poursuivi jusqu'en 1991 au niveau de l'acquisition et du traitement des données.

Le volet climatologie avait pour objectif l'étude des distributions spatiales et temporelles des divers paramètres du climat (température, précipitation, évapotranspiration), ainsi que l'étude des anomalies climatiques en relation avec les situations météorologiques déterminées par les circulations atmosphériques en Amérique du Sud. Le volet hydrologie devait permettre de connaître les régimes hydrologiques des fleuves de l'Amazonie bolivienne, à partir d'un réseau de stations hydrométriques à installer en plaine amazonienne. L'évaluation des termes du bilan hydrique (pluie, évapotranspiration, écoulement) devait se traduire par l'élaboration de cartes thématiques (Roche & al., 1992), réalisées dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) de l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO, 1987). Le volet qualité des eaux, faisant l'objet de ce travail, devait permettre de caractériser d'un point de vue physico-chimique les différents écosystèmes aquatiques de l'Amazonie bolivienne. Ces caractéristiques devant être interprétées en fonction des paramètres biogéographiques des bassins versants.

La mesure aux stations du réseau PHICAB des teneurs et de la qualité des matières dissoutes et particulaires, devait apporter des connaissances sur les variations spatiales et saisonnières des flux transportés par les fleuves, depuis les Andes jusqu'au Rio Madeira. Les bilans globaux, et pour chacun des éléments des phases dissoutes et particulaires, devaient permettre de connaître le rôle de chaque ensemble morpho-structural sur les apports à l'Amazonie, et d'en déterminer les processus. L'évaluation des flux exportés par les Andes devait ainsi donner une estimation de l'érosion actuelle de la chaîne montagneuse, les résultats sur le transport sédimentaire dans les Llanos permettant de mieux comprendre la géodynamique de l'avant-pays andin. L'étude des flux de matières transportées par les fleuves de l'Amazonie bolivienne s'est inscrite naturellement dans un programme plus vaste (Olivry, 1989) d'évaluation et d'étude des apports continentaux des grands bassins fluviaux parvenant à l'Océan Atlantique (PIRAT puis PEGI/GBF).

### **II.B.3. La problématique.**

Pour mener à bien de telles études en Bolivie, il fallait pouvoir disposer de chroniques assez longues de mesures fiables, couvrant l'ensemble du bassin amazonien de Bolivie (724000 km<sup>2</sup> = 1.3 fois la France). Pour la climatologie, l'existence de chroniques anciennes sur les réseaux du SENAMHI et de l'AASANA, ont facilité le travail. Il a fallu ensuite saisir sur informatique l'ensemble des données, les critiquer, et développer ou adapter des outils de traitement de l'information, comme le vecteur régional (Hiez, 1987).

Pour des raisons de qualité de l'information, la période d'étude de la climatologie a été fixée aux années allant de 1968 à 1982. Pour l'étude de l'hydrologie en plaine amazonienne, un réseau hydrométrique d'une quinzaine de stations a été installé (Figure 18 et Tableau VII), depuis le piedmont des Andes sur d'anciennes stations du SENAMHI, jusqu'à la frontière brésilienne (Abasto & al., 1985; Bourges, 1986, 1988). Ce réseau est opérationnel depuis 1983. En raison de problèmes d'observateurs, les stations sélectionnées ont quelquefois été doublées ou déplacées.

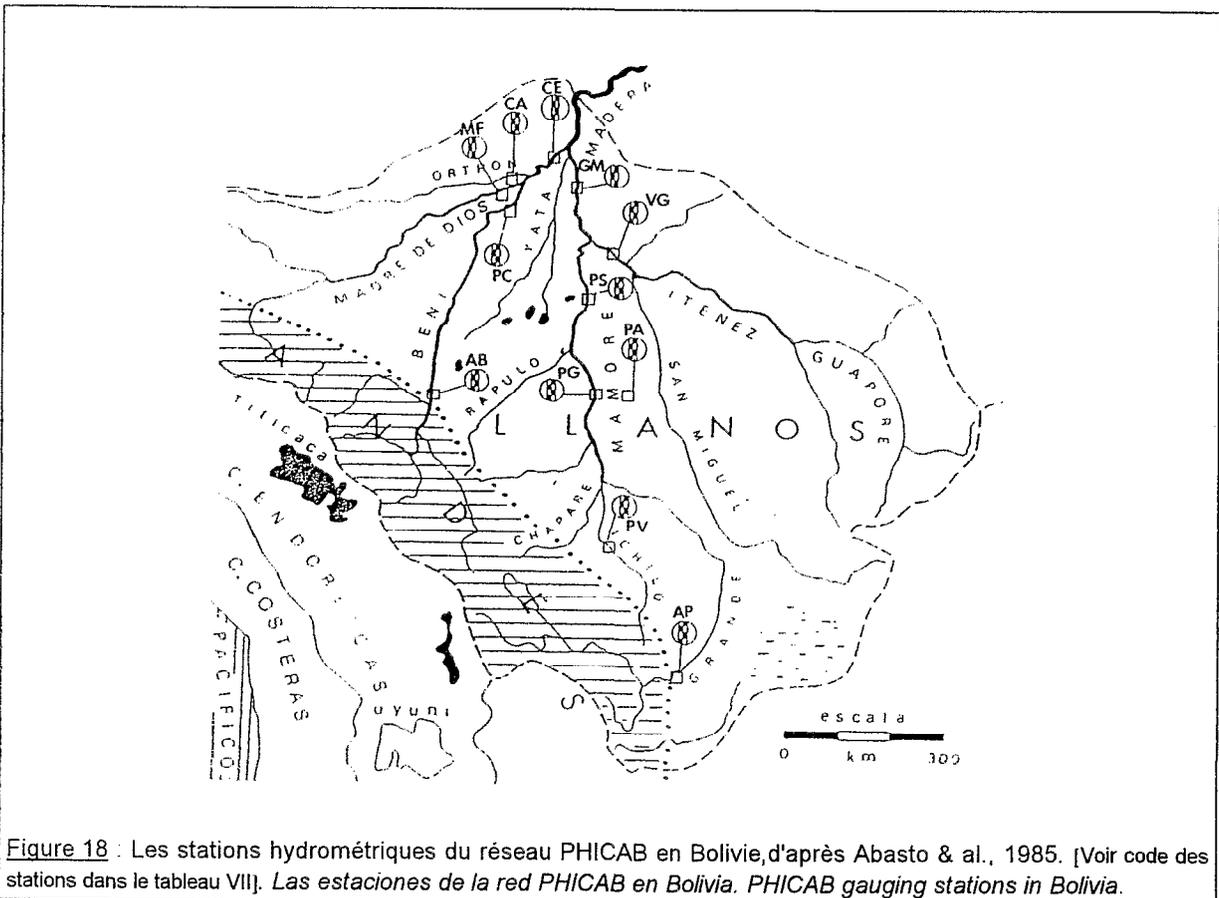
Les superficies indiquées ont été calculées d'après la carte topographique de Bolivie au 1/1,000,000<sup>ème</sup> (IGM, 1980). Ces valeurs correspondent à celles publiées par Roche & al. (1986), sauf pour le bassin de l'Itenez-Guaporé où la superficie du bassin des Bañados de Izozog a été incluse, conformément à la carte hydrographique de Bolivie (IGM, 1985).

L'acquisition de connaissances sur l'hydrologie du bassin amazonien a permis de sélectionner quelques stations clés, afin de maintenir un réseau minimum tenant compte de la variabilité géographique des régimes (Olivry, 1986). Ainsi, depuis 1991, ce réseau a été réduit à 5 stations dont 3 contrôlant les Andes (AB, PV & AP), et les deux stations sur les formateurs du Rio Madeira (CE & GM). Ces 5 stations ont été intégrées à l'opération Grands Bassins Fluviaux (PEGI-GBF) de l'Amazonie, qui a débuté en 1992.

2. Le PHICAB dans le bassin du Río Madeira.

Tableau VII : les stations du réseau PHICAB en Amazonie bolivienne.  
*Las estaciones de la red PHICAB en la Amazonía boliviana.*  
*Bolivian Amazon PHICAB network stations.*

Code	Rio	Station	Distance (km)	Altitude (m)	Sup. (km <sup>2</sup> )	Andes (km <sup>2</sup> )	Llanos (km <sup>2</sup> )	Bouclier (km <sup>2</sup> )
AB	Béni	Angosto del Bala Rurrenabaque	810	280	67500	67500	0	0
PC	Béni	Portachuelo Dos Estrellas Palermo	200	130	119000	71200	47800	0
MF	Madre de Dios	Miraflores	225	130	124200	44000	80200	0
CA	Orthon	Caracoles	170	125	32300	0	32300	0
CE	Béni	Cachuela Esperanza	30	120	282500	115200	167300	0
AP	Grande	Abapo	1725	450	59800	59800	0	0
PV	Ichilo	Puerto Villarroel	1487	170	7600	5400	2200	0
PA	Ibaré	Puerto Almacen	920	140	8300	0	8300	0
PG	Mamoré	Puerto Ganadero Puerto Varador Montevideo	920	140	159100	89300	69800	0
PS	Mamoré	Puerto Siles Cooperativa	436	130	216200	92900	123300	0
VG	Itenez	Campamento Moré Vuelta Grande	365	130	354300	9100	111000	234200
GM	Mamoré	Guayaramerin	55	120	599400	102000	256900	240500
	Madeira	Villabella	0	115	903500	217200	438100	248200



En plus des stations du réseau PHICAB en plaine amazonienne, les données anciennes d'une cinquantaine de stations andines du SENAMHI et de ENDE ont été traitées, à l'aide du logiciel HYDROM 2.0, développé par l'ORSTOM (Raous, 1988).

L'étude de la qualité des eaux nécessite la réalisation d'un échantillonnage approprié sur le réseau PHICAB, ainsi que la collecte des échantillons vers La Paz. Parallèlement à ces activités de terrain, nous avons dû mettre au point une chaîne d'analyse des échantillons d'eau et de matières en suspension en Bolivie et en France, et former des chercheurs boliviens aux analyses hydrochimiques. Des campagnes d'échantillonnage sur l'ensemble du territoire bolivien ont également été organisées plusieurs fois par an, à différentes époques hydrologiques (Guyot & al., 1989).

Par ailleurs, de nombreuses données anciennes inédites concernant le transport particulaire dans une cinquantaine de bassins andins ont été traitées par le PHICAB. La plupart de ces données concernent la période 1976-1982, et ont été obtenues par un programme de mesures de transport solide en Bolivie, réalisé sur un financement du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD).

Un programme de coopération de la Communauté Economique Européenne (CEE) de lutte contre les inondations de la région de Santa Cruz de la Sierra, réalisé par le SEARPI (Servicio de Eucauzamiento de Aguas del Rio Piray) a permis l'obtention de données journalières de transport solide sur un bassin andin, de 1977 à 1983 (Kleeberg, 1979, 1986).

Enfin, d'autres données proviennent d'études de faisabilité de retenues d'eau pour l'irrigation ou la production d'énergie électrique, réalisées par divers organismes (Sofrelec, 1978; Ende, 1980; Asociación Icla, 1982; Lopez, 1984; Asociación Misicuni, 1987).

#### II.B.4. Le partenariat.

L'activité développée par le programme PHICAB est le résultat d'une parfaite collaboration entre les chercheurs de l'ORSTOM et les partenaires boliviens. Pour cela un protocole d'accord a été signé entre l'ORSTOM et le SENAMHI, puis entre l'ORSTOM et l'IHH-UMSA (Instituto de Hidraulica e Hidrologia de la Universidad Mayor de San Andres, La Paz). Ensuite les collaborations se sont étendues à d'autres institutions : AASANA, ENDE, IIQ-UMSA (Instituto de Investigación en Química de la UMSA), SHN (Servicio Hidrográfico Nacional), HAM (Honorable Alcaldía Municipal de La Paz), en fonction des besoins propres à chaque volet de recherche. Les domaines d'intervention de chacun de ces organismes sont les suivants :

\* SENAMHI : Réseau de stations climatologiques, réseau de stations hydrométriques, échantillonnage, tournées hydrologiques, laboratoire technique, laboratoire d'analyses physico-chimiques des eaux, banque de données hydro-climatiques.

\* IHH-UMSA : Recherche en climatologie, recherche en hydrologie, recherche en érosion et transport de sédiments

\* IIQ-UMSA : Laboratoire d'analyses chimiques, recherche en chimie des eaux, échantillonnage.

\* AASANA : Réseau de stations climatologiques.

\* ENDE : Réseau de stations hydrométriques.

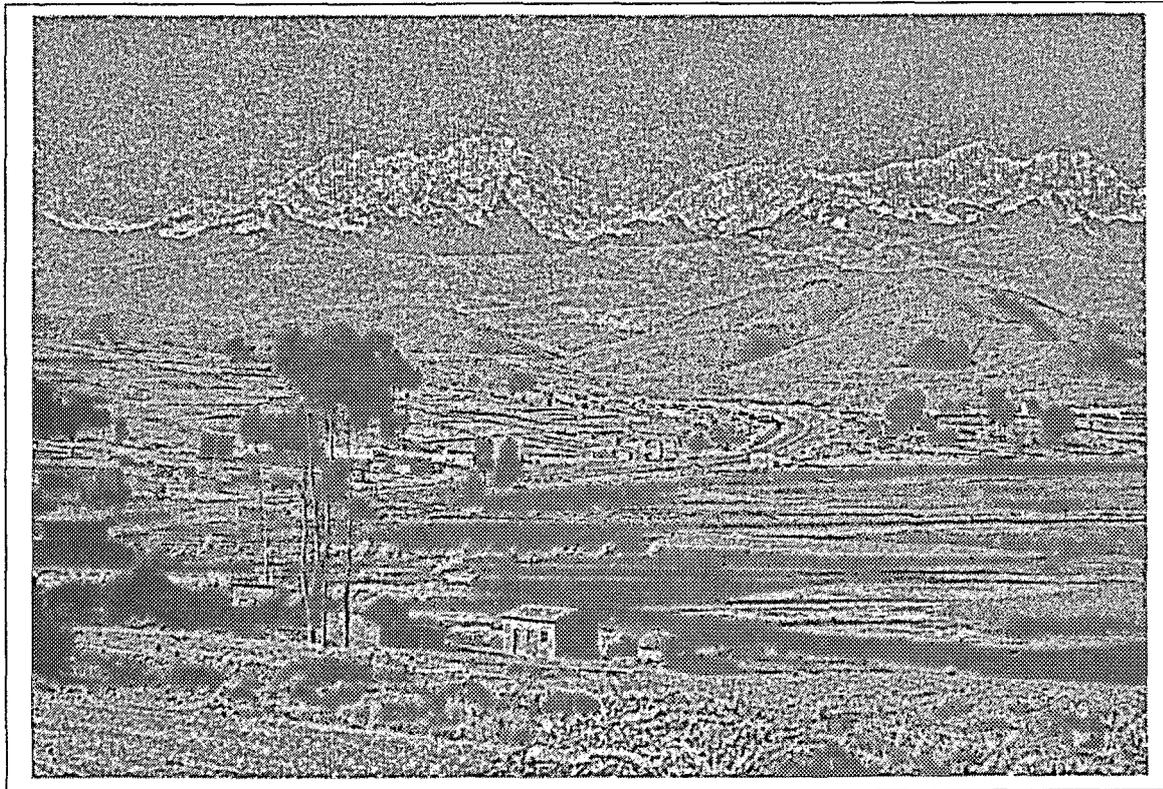
\* SHN : Réseau de stations hydrométriques, échantillonnage, tournées hydrologiques.

\* HAM : Réseau de stations climatologiques, réseau de stations hydrométriques, échantillonnage.

D'autres collaborations ont été sollicitées en France pour des analyses complémentaires avec certains instituts de recherche :

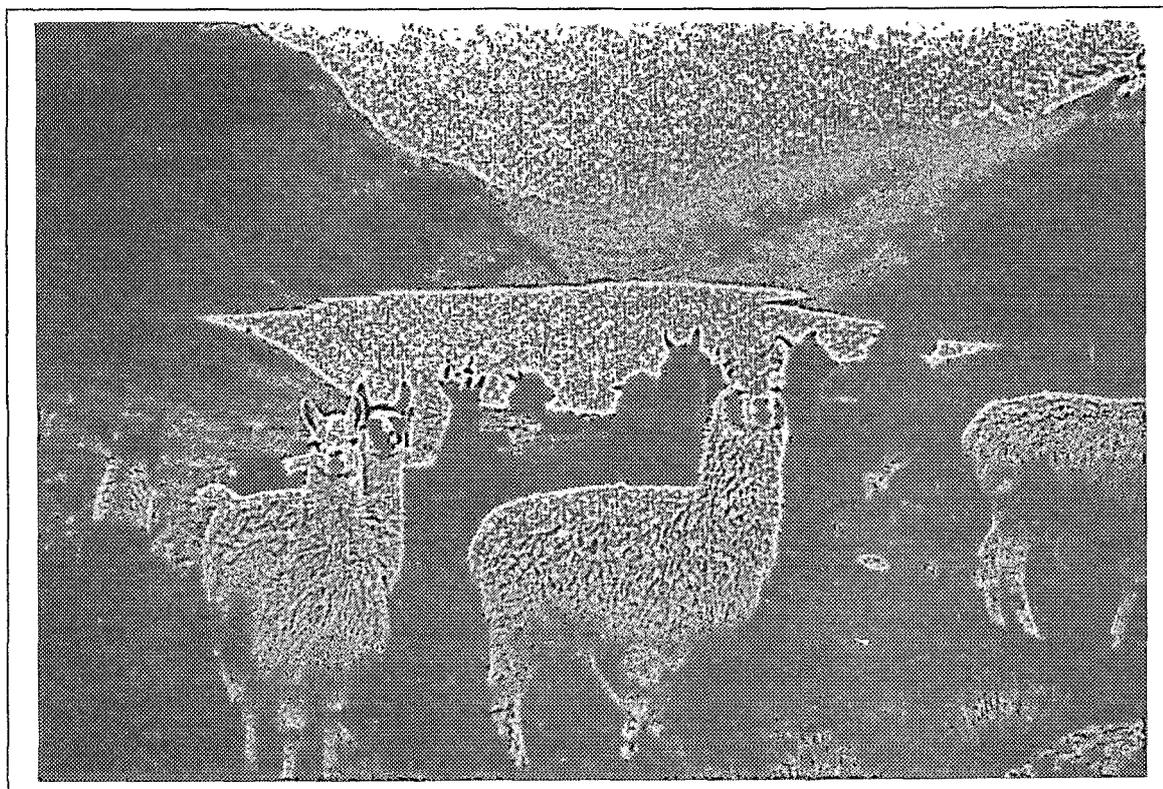
\* CEMAGREF Lyon : Biogéochimie du carbone organique.

\* IGBA - CNRS Bordeaux : Granulométrie, minéralogie et géochimie des suspensions.



↑ Photo 5 : Le lac Titicaca (3810 m) et la Cordillère Royale (Bolivie).  
*El lago Titicaca y la Cordillera Real. The Lake Titicaca and the Real Cordillera*

↓ Photo 6 . La vallée glaciaire d'Hichu Kkota (4600 m) dans la Cordillère Royale (Bolivie)  
*El valle glaciario de Hichu Kkota en la Cordillera Real. The Hichu Kkota glacial valley, Real Cordillera.*



## CHAPITRE III

---

# Le bassin du Rio Madeira à Villabella (Bolivie).

### RÉSUMÉ :

Après une introduction historique, le troisième chapitre décrit le milieu physique du haut-bassin du Rio Madeira (à Villabella en Bolivie), tant d'un point de vue géodynamique, que climatique et hydrologique.

A Villabella, le bassin du Rio Madeira couvre  $0.9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ , dont 25% dans les Andes, 27% dans le bouclier brésilien et 48% dans les Llanos. L'érection de la chaîne andine entraîne un basculement à grande échelle du socle, qui aura pour conséquence la mise en place d'une fosse subsidente au piedmont andin, véritable piège à sédiments, et un soulèvement du bouclier brésilien, qui joue ainsi le rôle de seuil hydrologique des Llanos de Bolivie.

L'utilisation de données hydrologiques anciennes dans les Andes, et l'acquisition de données nouvelles sur une douzaine de stations implantées dans les Llanos de Bolivie, ont permis de connaître l'hydrologie de ce grand bassin fluvial aux caractéristiques climatiques et topographiques contrastées (de 120 m à 6500 m d'altitude, et de  $200 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$  à plus de  $6000 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$  de précipitations suivant les régions), à la géologie variée (du socle précambrien du bouclier brésilien aux séries sédimentaires quaternaires d'altitude), et à la végétation qui passe d'une couverture rase en altitude à la forêt tropicale humide.

### SOMMAIRE :

III.A. Un peu plus d'histoire .....	p. 48
III.B. Limites et extension du bassin .....	p. 50
III.C. Le relief .....	p. 52
III.D. La géologie .....	p. 55
III.E. Les sols et la végétation .....	p. 57
III.F. L'hydrographie .....	p. 58
III.G. Le climat .....	p. 67
III.H. L'hydrologie .....	p. 79

### **III.A. UN PEU PLUS D'HISTOIRE...**

#### **III.A.1. L'époque précolombienne.**

L'histoire précolombienne de cette région est dominée par l'empire Inca qui s'étendait sur plusieurs milliers de kilomètres du Nord au Sud, le long de la côte Pacifique et dans les Andes. L'empire Inca s'est établi sur des sociétés organisées préexistantes dont on ne sait que très peu de choses, comme les Aymaras et la fameuse civilisation de Tiwanaku (Boero Rojo, 1978; Bernand, 1988; Lara, 1990). L'extension de cet empire dans la partie andine du bassin du Rio Madeira est essentiellement l'oeuvre de l'Inca Kapac Yupanqui (4<sup>ème</sup> Inca de la dynastie) et de son successeur l'Inca Roca (Inca Garcilaso de la Vega, 1609).

Malgré l'expédition de l'Inca Yupanqui (le 9<sup>ème</sup> Inca) dans les Llanos, les Incas n'ont jamais réussi à coloniser durablement la plaine amazonienne (Inca Garcilaso de la Vega, 1609). Dans cette région de nombreuses tribus plus ou moins développées coexistaient, dont les fameux Moxos, Mojos ou Musus (d'Orbigny, 1845; Armentia, 1905; Mendizabal, 1932; Chávez Suárez, 1986). Ces populations indigènes avaient édifié d'impressionnants ouvrages de terre pour lutter contre les inondations, permettant le développement de l'agriculture et des voies de communication (Denevan, 1966, 1970).

#### **III.A.2. La conquête des Andes.**

Après la domination du Pérou (1530-1535) par les conquistadores Francisco Pizarro et Diego de Almagro qui s'emparent sans difficultés de l'empire Inca à la tête de 200 hommes d'armes (Kirkpatrick, 1935; Bernand, 1988), une partie des troupes dirigée par Diego de Almagro se dirige vers le Sud pour conquérir le Chili. En route ils traversent toute l'étendue des Andes du bassin du Rio Madeira (Boero Rojo, 1978). De retour du Chili des différents territoriaux opposant Almagro à Pizarro entraîneront une série de guerres civiles entre fractions rivales (Kirkpatrick, 1935). C'est dans ce contexte troublé que va se réaliser la colonisation espagnole du Haut-Pérou (*El Alto Peru*, aujourd'hui la Bolivie) sous l'impulsion de Gonzalo Pizarro (frère de Francisco), avec la fondation des principales villes coloniales de cette région : Chuquisaca (en 1538, qui deviendra successivement La Plata, Charcas et Sucre), Potosi (1546), La Paz (1548), Oropesa (1573, devint plus tard Cochabamba), Tarija (1574) et San Felipe (1606, devint Oruro). En 1573, la ville impériale de Potosi, alors plus peuplée que Londres, Madrid, Rome ou Paris, a fourni à l'Espagne et par voie de conséquence à l'Europe toute entière, une quantité impressionnante d'argent qui en un siècle et demi représenta le triple des réserves européennes (Galeano, 1971). De 1545 à 1824, la production d'argent des mines de la montagne de Potosi (*Cerro Rico*) a été estimée à 35000 tonnes (Arduz Eguía, 1988). Potosi a été déclaré en 1988 patrimoine culturel de l'humanité par l'Unesco (Baptista Gumucio, 1988).

Ñuflo de Chavez, pénétrant cette région depuis l'Atlantique en remontant le Rio de La Plata à la suite des conquistadores Pedro de Mendoza, Juan de Ayolas, Alvar Nuñez Cabeza de Vaca et Domingo Martinez de Irala, va créer la ville de Santa Cruz de la Sierra en 1557 en bordure des Andes, et faire ainsi la jonction avec les expéditions espagnoles organisées depuis le Pérou (Chávez Suárez, 1986).

#### **III.A.3. Les religieux et la pénétration des Llanos.**

De nombreuses tentatives militaires de pénétration des Llanos à partir des Andes (Pedro de Candia en 1538, Pedro Anzures de Campo Redondo en 1539, Juan de Nieto en 1561, Antonio de Gascos en 1562, Diego Aleman en 1563, Luján en 1565, Juan Alvarez Maldonado en 1567, Gomez de Tordoya en 1568 et Pedro de Legui Urquiza en 1615) et à partir de Santa Cruz la Sierra (Lorenzo Suarez de Figueroa en 1580, Juan de Torres Palomino en 1595, Juan Mendoza Mate de Luna en 1602, Martín Vela Granado en 1603, Gonzalo Solis de Holguin en 1617 et 1624) ont été réalisées sans pouvoir installer durablement une présence espagnole dans ces contrées hostiles (Armentia, 1905; Chávez Suárez, 1986).

La colonisation des Llanos est l'oeuvre de religieux franciscains et jésuites qui ont su pacifier ces régions. Après l'entrée du père Gerónimo de Andión en territoire Moxos avec l'expédition de Palomino, les jésuites eurent l'autorisation en 1597 de réduire les infidèles et de fonder des missions.

Après quelques tentatives infructueuses où périrent plusieurs religieux, les jésuites José Bermudo et Juan de Soto entrent en territoire Moxos en 1668, qu'ils parcourent pendant 11 mois en essayant de convertir les indiens, suivis en 1674 par le père José del Castillo. En 1684, la première mission est fondée à Loreto par Pedro Márban, puis Cipriano Baracé fonde Trinidad en 1686 (Chávez Suárez, 1986). Le mouvement d'extension des jésuites vers le Nord va les mettre en contact avec les troupes portugaises. Ils devront abandonner les missions créées en rive droite du Rio Itenez, territoire revendiqué par les portugais (Eder, 1772; d'Orbigny, 1845). Quand les jésuites sont expulsés de Bolivie en 1767, ils ont déjà créé 21 missions (Figure 19) qui regroupent plus de 35000 indiens évangélisés (Denevan, 1966). Le jésuite Eder (1772), d'origine hongroise, donnera la première description du climat, des inondations et du régime des fleuves de cette contrée.

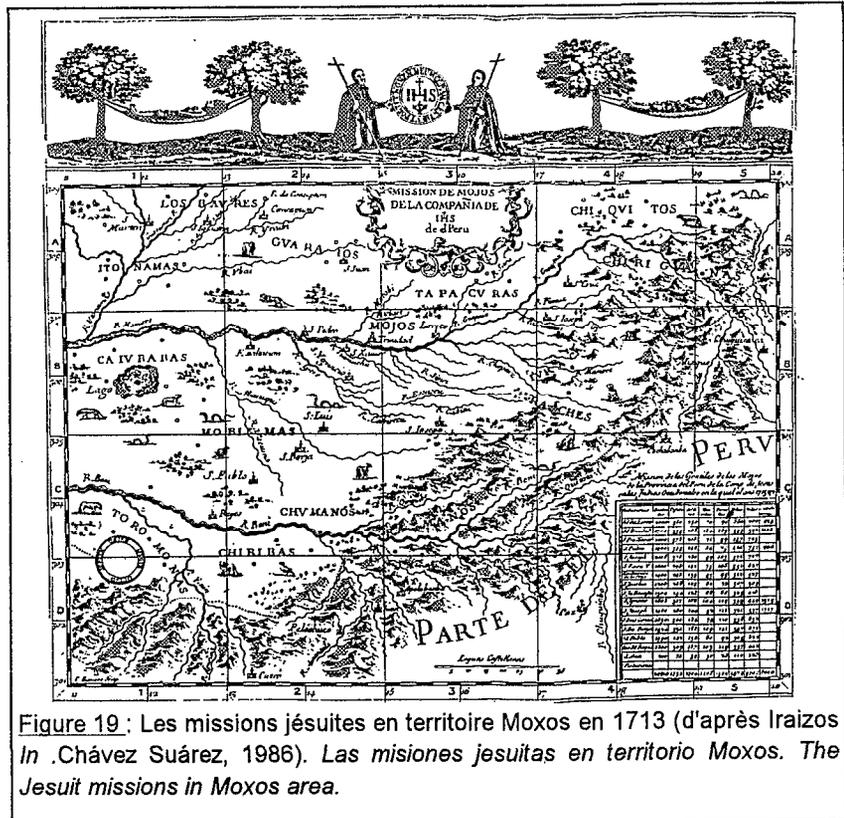


Figure 19 : Les missions jésuites en territoire Moxos en 1713 (d'après Iraizos In Chávez Suárez, 1986). *Las misiones jesuitas en territorio Moxos. The Jesuit missions in Moxos area.*

Dans la partie occidentale des Llanos (territoire de Caupolicán, aujourd'hui département de La Paz), la colonisation a été l'oeuvre de pères franciscains (Figure 20) qui fondèrent à partir de 1750 les missions de Apolo, Aten, Tumupaza, Ixiamas et Cavinatas (Armentia, 1905; d'Orbigny, 1845).

#### III.A.4. Les savants, les explorateurs et l'indépendance.

Après les soulèvements indigènes de Tupac Amaru et Tupac Catari (1780-1781), les idées indépendantistes se répandirent peu à peu dans les colonies espagnoles, encouragées par l'indépendance des Etats Unis d'Amérique (1776) et la révolution française (1789). Il s'ensuivit une période de troubles, aggravée par l'invasion napoléonienne de l'Espagne, qui se termina par la proclamation d'indépendance de la Bolivie en 1825, par le maréchal Sucre, compagnon d'armes de Simon Bolivar (Boero Rojo, 1978). C'est dans cette période agitée, que le premier savant occidental, l'allemand Tadeo Haenke, effectua ses recherches en Amazonie bolivienne (Haenke, 1799).

Après l'indépendance de la Bolivie, de nombreux explorateurs et savants parcourent le versant andin et la plaine du bassin amazonien, comme le célèbre français Alcides d'Orbigny en 1830-1832, qui donnera des informations précieuses sur la géologie, le climat et l'hydrologie du bassin amazonien de Bolivie (d'Orbigny, 1835-1847, 1845). José Agustín Palacios effectue la première descente des Rio Mamoré et Madeira, et ouvre ainsi la route vers l'Atlantique. Il rapporte des indications précises sur les cachuelas des fleuves Béni et Mamoré (Palacios, 1844-1847) qui seront complétées par l'expédition des frères Keller réalisée en 1867-1868 (Keller Leuzinger, 1874). Les très nombreuses expéditions organisées à cette époque se tournent vers les bassins inexplorés des rios Béni, Madre de Dios et Datimacu (aujourd'hui Rio Orthon), Purus et Acre en raison de l'intérêt que représentent ces régions pour la production de caoutchouc. Citons sans être exhaustif

### 3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

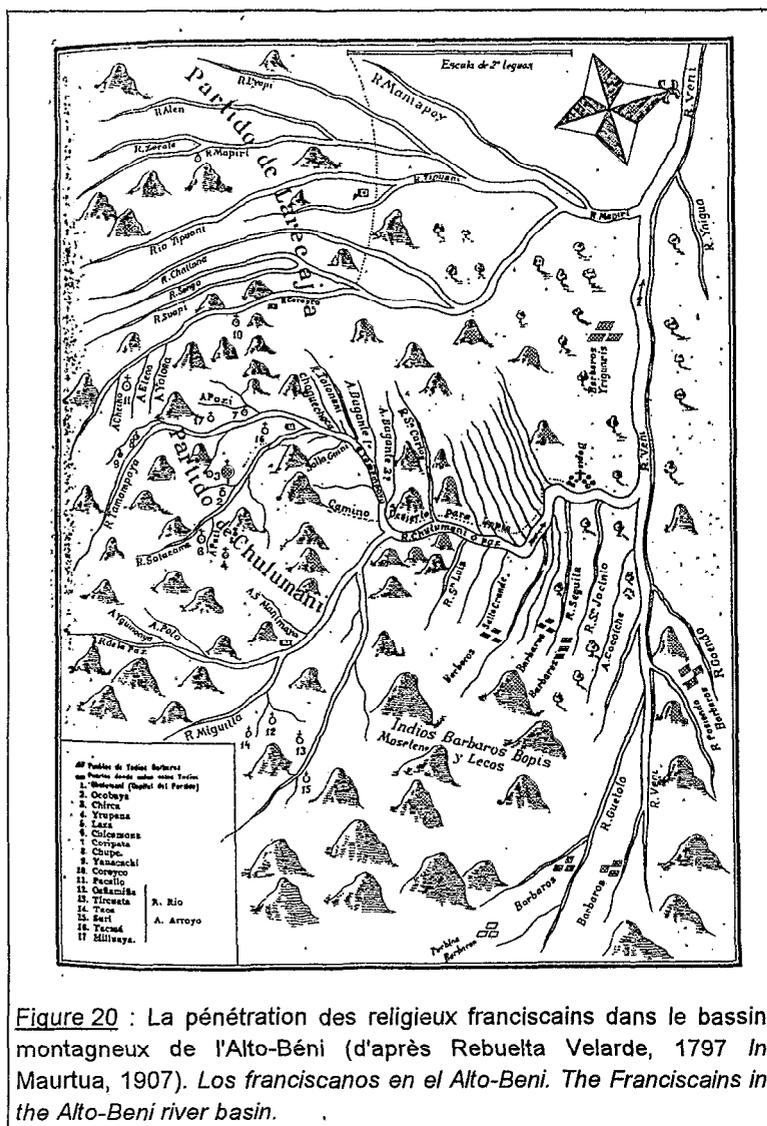


Figure 20 : La pénétration des religieux franciscains dans le bassin montagneux de l'Alto-Béni (d'après Rebuella Velarde, 1797 In Maurtua, 1907). *Los franciscanos en el Alto-Beni. The Franciscans in the Alto-Beni river basin.*

(Chavez, 1926; Díaz Arguedas, 1971; Frontaura Argandoña, 1971) les expéditions de Miller (1835), Espinar (1840), Buza (1846), Bovo de Revello (1851), Gibbon (1852), Markham (1853), Faustino Maldonado (1860), Mancini (1860-1864), Chanless (1862), Raimondi (1864), Gnystron (1868), La Torre (1873), Church (1871-1878), Orthon (1877), Heath (1879-1881), Armentia (1881-1885), Vaca Diez (1886-1897), Labre (1887), Balzan (1891-1892), Santos Mercado (1892), Pando (1893), Fitzcarrald (1894), Suárez (1882-1902), Arnous de Rivière (1900), Varnoux (1909), Fawcett (1906-1925). Il faut également signaler dans les Andes les travaux de Wedell (1853), Conway (1899) et Crespo (1901).

Des différends territoriaux sur le tracé des frontières opposant la Bolivie au Pérou (Maurtua, 1907) seront à l'origine d'explorations et de publications nouvelles qui contiennent une quantité de données sur les bassins des rios Béni et Madre de Dios (Armentia, 1897, 1905; La Combe et al., 1904; Villalta et al., 1904; Stiglich et al., 1907).

### III.B. LIMITES ET EXTENSION DU BASSIN.

Le bassin du Rio Madeira à Villabella (Figures 15 & 21) couvre une superficie de 903500 km<sup>2</sup>, et s'étend sur 3 pays : la Bolivie, le Brésil et le Pérou qui représentent respectivement 74%, 14% et 12% de la totalité du bassin. De forme grossièrement rectangulaire, ce bassin versant est situé entre le 10<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> degré de latitude Sud, et le 59<sup>ème</sup> à 72<sup>ème</sup> degré de longitude Ouest. Il est limité au Sud et à l'Ouest par les reliefs de la cordillère orientale des Andes, et à l'Est par les affleurements du bouclier brésilien.

3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

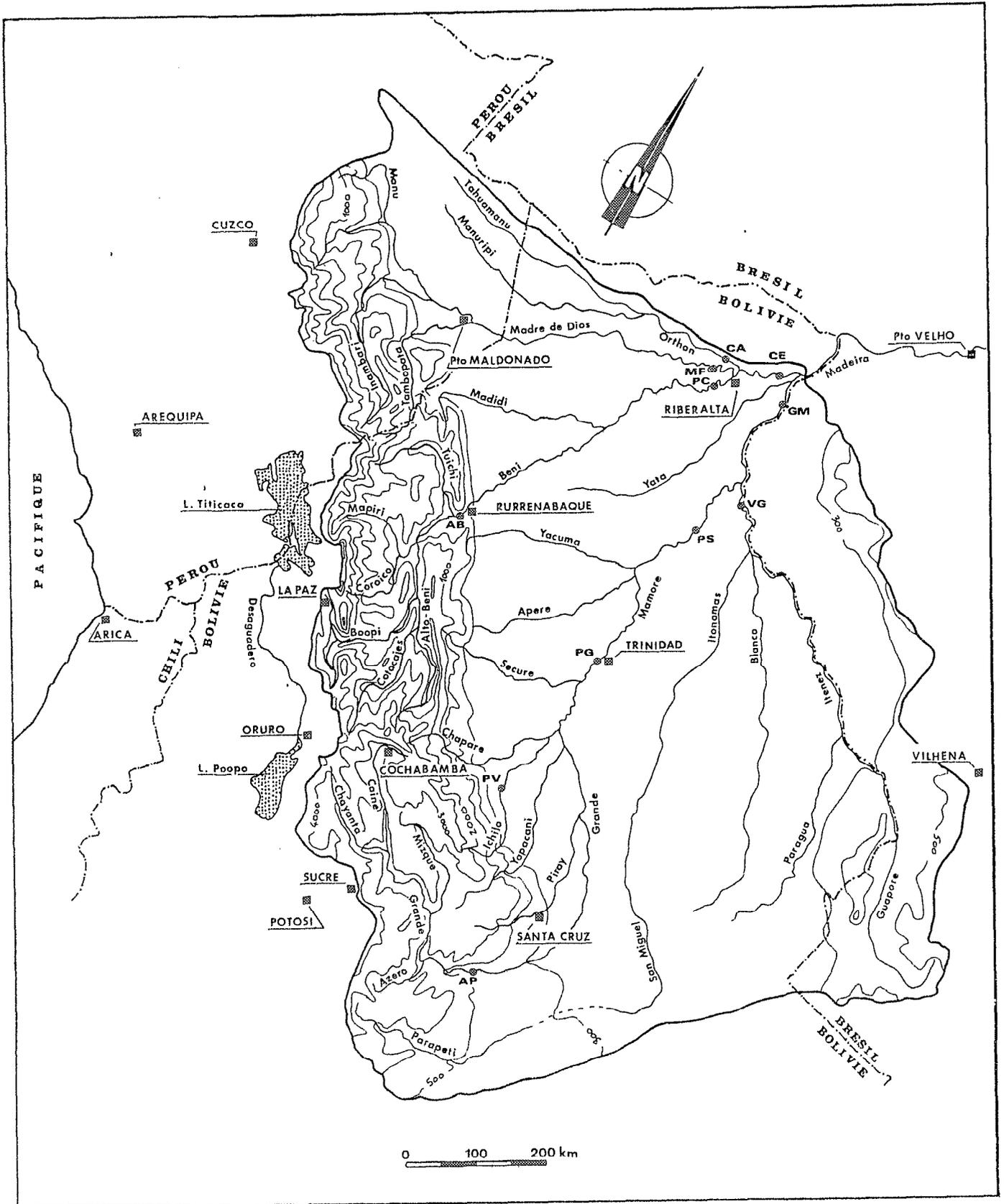


Figure 21 : Bassin du Rio Madeira à Villabella, d'après Bartholomew World Travel Map : Bolivia, Brazil, 1988 (Voir tableau VII pour le code des stations PHICAB). *Cuenca del Río Madera en Villabella. The Madeira river drainage basin at Villabella.*

### III.C. LE RELIEF.

Les grandes unités morpho-structurales du bassin amazonien sont à nouveau représentées dans le bassin du Rio Madeira à Villabella, et elles en conditionnent la topographie. La création d'un modèle numérique de terrain (MNT) à partir de la carte topographique au 1/5,000,000<sup>ème</sup> (Bartholomew, 1988), en utilisant le logiciel DEMIURGE développé au laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM (Depraetere, 1991) permet d'obtenir une vue d'ensemble en trois dimensions du relief de cette région.

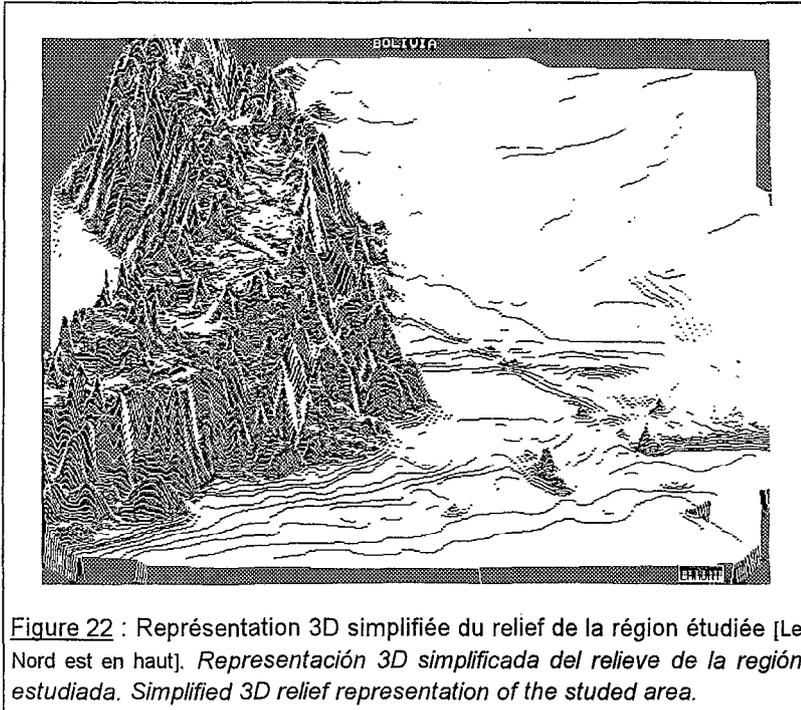


Figure 22 : Représentation 3D simplifiée du relief de la région étudiée [Le Nord est en haut]. *Representación 3D simplificada del relieve de la región estudiada. Simplified 3D relief representation of the studied area.*

À partir du fichier régional MNT (Figure 22), le bassin du Rio Madeira à Villabella a été extrait (Figure 23). Le bouclier brésilien n'apparaît pas, mais les principales vallées andines sont nettement visibles, ainsi que l'Altiplano derrière la Cordillera Real.

Les fichiers dérivés du MNT permettent, entre autre, la construction de la courbe hypsométrique du bassin (Figure 24). Cette courbe individualise nettement le domaine andin (altitude > 500 m) du reste du bassin. Vers 3500-4000 m une bosse apparaît sur la courbe, traduisant l'influence de la partie de l'Altiplano drainée par le Rio Alto-Béni.

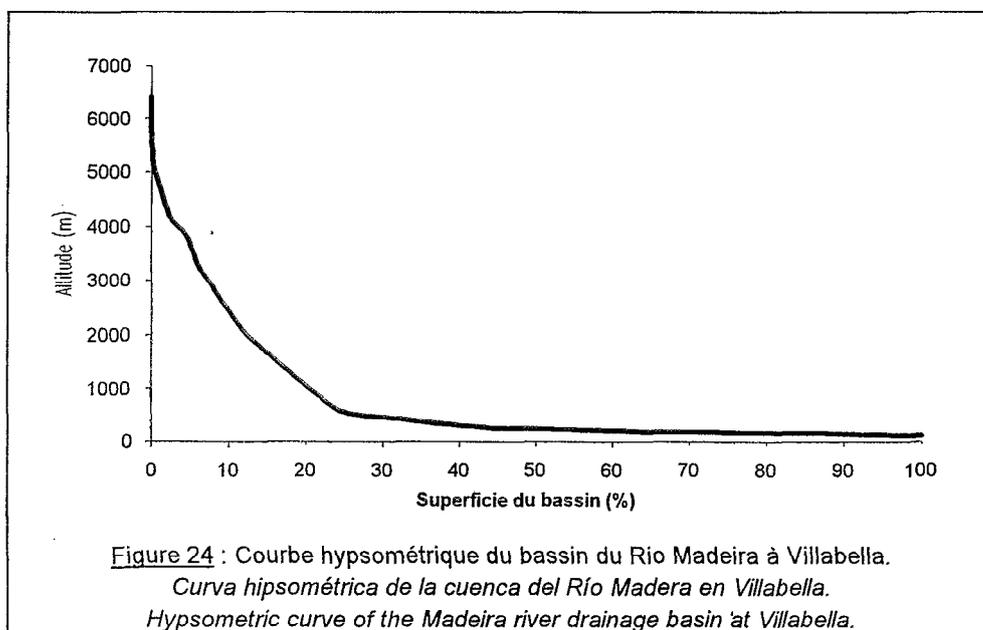


Figure 24 : Courbe hypsométrique du bassin du Rio Madeira à Villabella. *Curva hipsométrica de la cuenca del Río Madera en Villabella. Hypsometric curve of the Madeira river drainage basin at Villabella.*

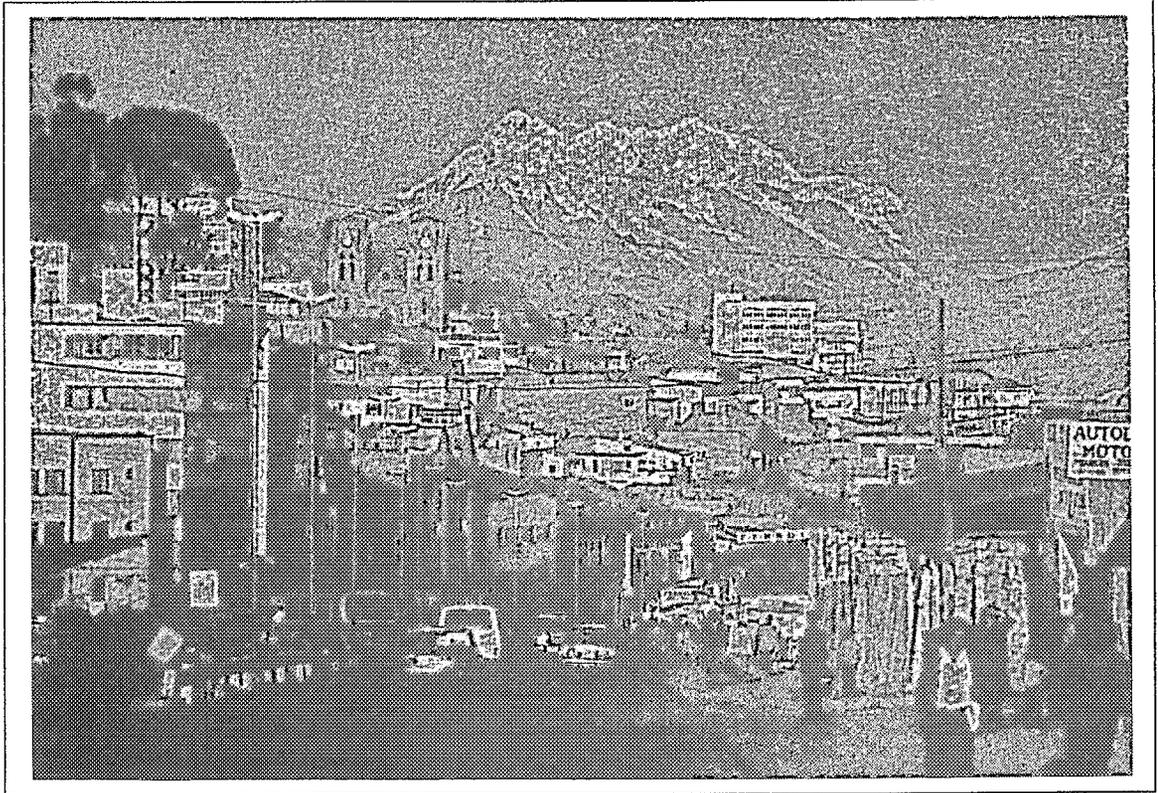


Photo 7 L'Ilillimani (6402 m) surplombe la ville de La Paz (3600 m). *El Ilillimani y la ciudad de La Paz. The Ilillimani and La Paz city.*



Photo 8 La ville de Sorata (2500 m) et la vallée du Rio San Cristobal, au pied de l'Ilillampu (6420 m). *La ciudad de Sorata y el valle del Río San Cristobal, al pie del Ilillampu. Sorata city and the San Cristobal river valley, at the foot of the Ilillampu.*

### 3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.



Figure 23 : Vue 3D simplifiée du relief du bassin du Rio Madeira à Villabella [Le Nord est à droite]. *Visión 3D simplificada del relieve de la cuenca del Río Madera en Villabella. Simplified 3D relief view of the Madeira river drainage basin at Villabella.*

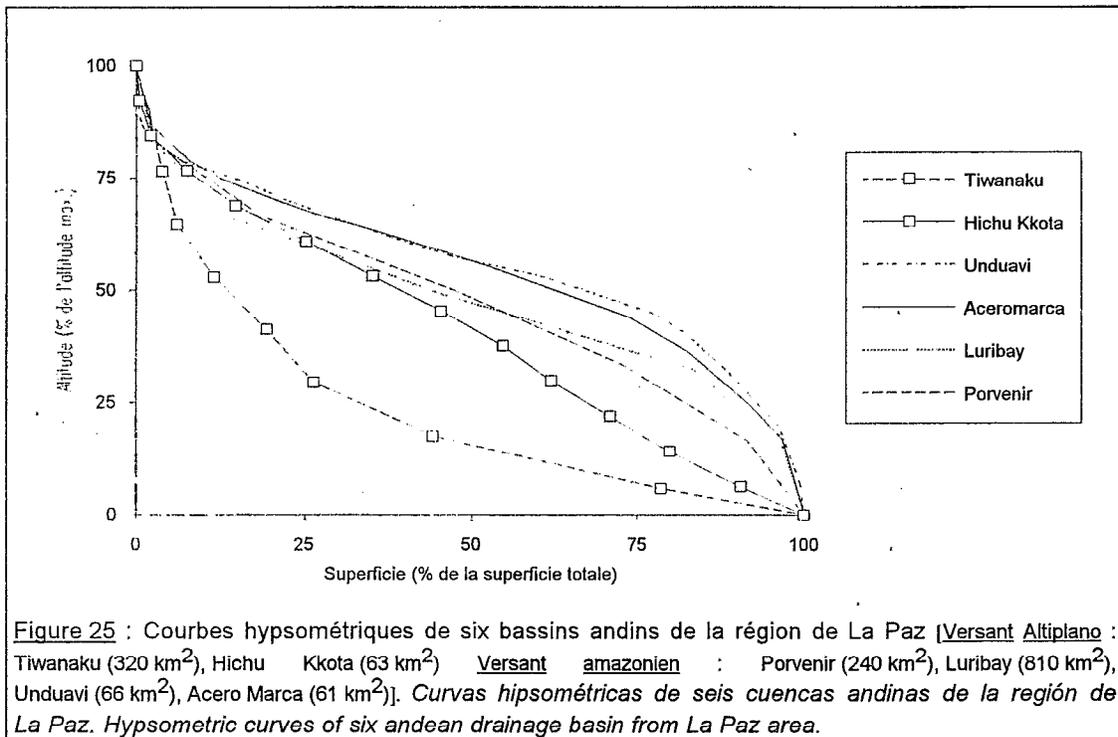
#### **III.C.1. Le bouclier brésilien.**

Le bouclier brésilien (29% de la superficie) correspond au bombement d'une surface d'érosion tertiaire, entaillé sur ses bordures par des vallées alluviales quaternaires. Le relief de cette région est caractérisé par l'existence d'un plateau dont l'altitude maximum est de 550 m, pour atteindre en bordure 150 à 300 m. Par endroit, certaines reliques d'une surface d'érosion plus ancienne, en forme de mesas (*Serrania Huanchaca*), atteignent 950 m d'altitude (Boulangé & Litherland, 1978; Litherland & al., 1986).

#### **III.C.2. Les Andes.**

Le domaine andin qui couvre 23% de la superficie du bassin, s'étend sur 1400 km de long pour une largeur moyenne de 200 km (Figure 21). Il s'agit d'un domaine montagneux escarpé, passant des sommets de la cordillère (6400 m) à la plaine amazonienne de piedmont (500 m), et entaillé de profondes vallées. On distingue classiquement dans les Andes plusieurs sous-ensembles hérités de l'histoire géologique de cette chaîne montagneuse. La cordillère occidentale constituée d'une suite de volcans n'appartient pas au bassin amazonien. Situé entre les cordillères orientale et occidentale, l'Altiplano (Figure 22) est une vaste dépression de plus de 1000 km de long et 250 km de large. Enfin, à l'Est des Andes, on différencie une zone subandine (altitudes inférieures à 2500 m), de la cordillère orientale proprement dite.

L'étude de six bassins versants andins de la région de La Paz, a montré que l'hypsométrie des bassins du versant amazonien est caractérisée par l'existence d'un palier, qui correspond vraisemblablement à une ancienne surface d'érosion. L'infléchissement de la courbe hypsométrique pour les plus faibles altitudes, correspondant à l'encaissement des vallées actuelles, traduit une reprise récente de l'érosion de ce versant (Figure 25). Le même phénomène a été observé dans la Cordillère orientale des Andes péruviennes, sur le haut bassin du Rio Marañón (Garner, 1959).



### III.C.3. Les Llanos.

La plaine du Chaco-Béni, que nous appelons dans cette étude la plaine amazonienne (ou Llanos, 48% de la superficie), s'étend sur un axe Nord-Ouest Sud-Est entre les reliefs des Andes et du bouclier. L'altitude des Llanos passe de 500 m dans les zones de piedmont (Abapo) à 115 m à Villabella.

## III.D. LA GEOLOGIE.

### III.D.1. Le bouclier brésilien.

Le bouclier brésilien est essentiellement composé de roches précambriennes regroupées en trois séries distinctes. Le complexe cristallin *chiquitano* qui correspond à l'essentiel des affleurements est constitué de granites, granodiorites et microgranites. La formation *Petas*, en discordance sur le complexe cristallin, est principalement constituée de gneiss, schistes et micaschistes très affectés par la tectonique. A nouveau en discordance, la formation *Sunsás* est formée de grès et quartzites (Pareja & al., 1978; Litherland & al., 1986).

Le bouclier brésilien s'enfonce sous la couverture sédimentaire quaternaire, et réapparaît localement au niveau de cachuelas (Cf. § VI.B.). Un infléchissement de l'enfoncement du socle sous la couverture alluviale est localisé vers 150 à 200 km de la cordillère orientale (Lyon-Caen & al., 1985).

Les affleurements du socle qui sont à l'origine des cachuelas des rios Béni, Mamoré et Madeira, jouent le rôle de seuil hydraulique. Des images Landsat TSS de la région de San Ramon (bassin du Rio Itenez), montrent clairement que le socle précambrien est entaillé par des paléovallées remplies de matériel sédimentaire quaternaire (Figure 26), ainsi que des lacs qui ont une morphologie de rias (Lagunas Victoria, Negra, Porfía, Colorada, Huachi). Ces observations confirment que le seuil hydrographique est remonté au cours du Quaternaire, ce qui est en accord avec les observations néotectoniques réalisées dans cette région (Litherland & al., 1986).

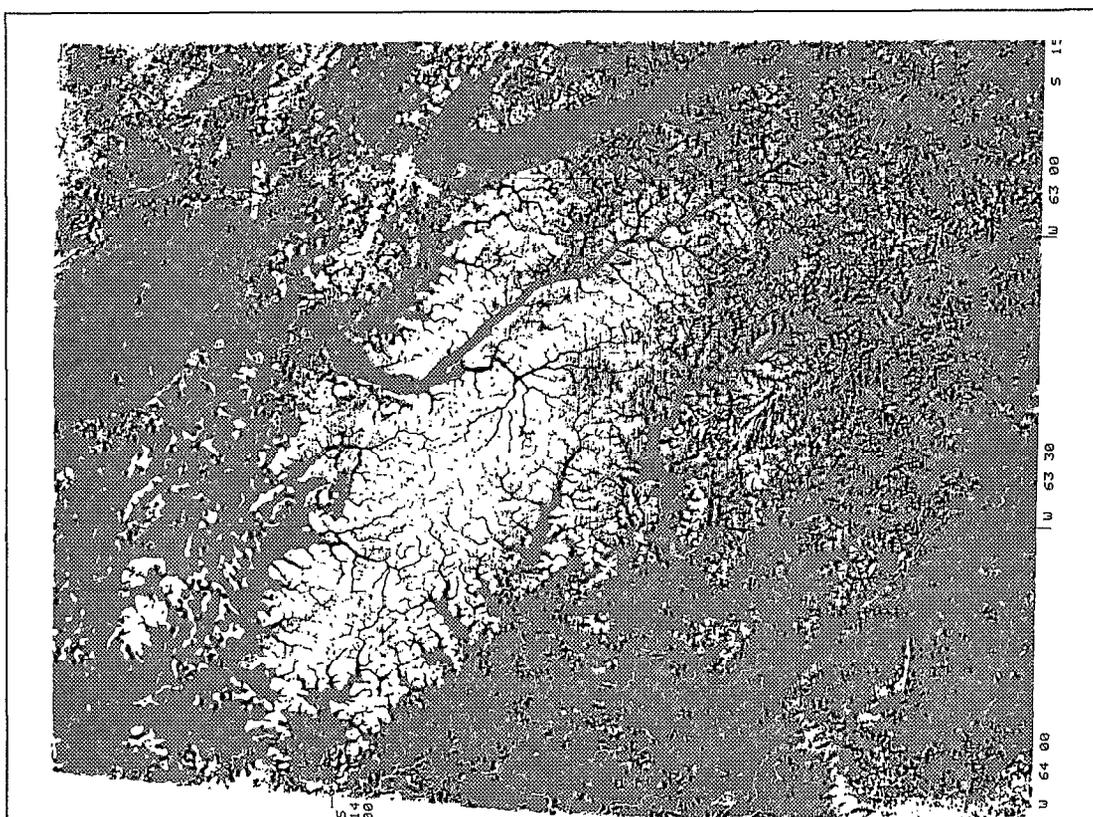


Figure 26 : Vue partielle de l'image Landsat MSS (Canal 7) N° WRS 231-70 du 12/07/1987. Région de San Ramon, bassin du Rio Itenez. *Imagen Landsat MSS, Región de San Ramon, Cuenca del Río Itenez. Landsat MSS Imagery, San Ramon area, Itenez river drainage basin.*

### III.D.2. Les Andes.

Le domaine andin du bassin du Rio Madeira se développe surtout dans la cordillère orientale (zone axiale) et le subandin, mais aussi en partie sur l'Altiplano qui est recoupé par certains cours d'eau du versant amazonien (Rios La Paz et Luribay).

La cordillère orientale est essentiellement constituée de séries sédimentaires détritiques d'âge Paléozoïque, où prédominent largement lutites et arénites, déformées par les phases hercyniennes et andines. Quelques horizons plus grossiers (conglomérats) sont observés, ainsi que, exceptionnellement, des niveaux calcaires (calcaires de *Copacabana*) notamment durant le Permien (Ahlfeld & Branisa, 1960; Pareja & al., 1978). Des lentilles de gypse sont également présentes dans les régions de Sorata, Milluni-La Paz et Cochabamba (Ahlfeld & Schneider-Scherbina, 1964). La série post-hercynienne est réduite à de rares affleurements du Trias et quelques affleurements du Crétacé présentant des niveaux carbonatés et évaporitiques (bassin du Rio Grande). Des phénomènes d'érosion karstique affectent localement les séries carbonatées et gypseuses du Paléozoïque supérieur (Rivas, 1968; Graf, 1984), mais atteignent une plus grande extension dans les séries sédimentaires calcaro-gréseuses du Crétacé, dans la région de Torotoro (Chabert, 1967; Valdivia, 1968; Guyot & al., 1990). D'importants dépôts sédimentaires du Tertiaire sont observés dans le subandin, mais également dans certaines vallées andines (Lavenue, 1986; Hérail & Viscarra, 1988; Carn & al., 1990), favorisant la mise en place d'importants placers aurifères (Hérail, 1986; Hérail & al., 1986, 1988). Une série continentale fluvio-glaciaire épaisse (environ 1000 m) du Plio-Quaternaire est présente en altitude dans la région de La Paz (Ballivián & al., 1978). Cette formation est soumise depuis le dernier maximum glaciaire à une intense érosion (Servant & Fontes, 1984), notamment la partie drainée vers le bassin du Rio Béni (vallée de La Paz) où d'impressionnants glissement de terrains (*derrumbe*) et coulées de boue (*mazamorra*) sont continuellement observés (Cabeza de Vaca; 1586; Dobrovolny, 1969; Malatrait, 1977; Scanvic & Girault, 1989; Scanvic & al., 1990; Diaz & al., 1990).

D'un point de vue structural, la cordillère orientale constitue actuellement un vaste anticlinorium de 100 à 200 km de largeur qui affecte essentiellement des terrains paléozoïques plissés, schistosés, métamorphisés et granitisés au cours des phases hercyniennes. Le tectorogène hercynien est repris par les diverses phases andines de plissement. Dans la branche Nord-Ouest, les massifs plutoniques andins, d'âge Tertiaire, constituent les alignements des sommets les plus élevés (Mégard & al., 1971; Bard & al, 1974; Martinez, 1980). La zone subandine est caractérisée par une déformation faible lors de la tectogénèse hercynienne, par une forte subsidence au cours du Méso-Cénozoïque, l'absence de magmatisme et la présence de structures chevauchantes (Martinez, 1980; Laubacher & al., 1984; Fornari & al., 1987; Baby & al., 1989).

L'évolution récente de la chaîne andine est caractérisée par une succession de six phases tectoniques compressives, de l'Eocène au Quaternaire ancien (Lavenu, 1986; Sébrier & al., 1988), avec une phase tectonique majeure d'âge Oligocène terminal - Miocène inférieur (Sempere & al., 1990). Le soulèvement de la cordillère a été interrompu par deux périodes de relative stabilité, marquées par de grands glacis d'ablation au Miocène supérieur et au Quaternaire moyen à récent (Servant & al., 1989). Des mesures d'âge à partir des traces de fission dans la cordillère orientale de Bolivie, montrent une vitesse d'érection de la chaîne andine de l'ordre de 0.1 à 0.2 mm.an<sup>-1</sup> entre 20 et 40 M.A., qui augmente sensiblement entre 10 et 15 M.A. pour atteindre 0.7 mm.an<sup>-1</sup> il y a 3 M.A. (Benjamin & al., 1987).

### III.D.3. Les Llanos

La plaine amazonienne de Bolivie est essentiellement couverte de dépôts sédimentaires du Quaternaire, produits de l'érosion de la chaîne andine, et plus localement du bouclier brésilien (Ahlfeld & Branisa, 1960; Pareja & al., 1978). Ces séries sédimentaires pourraient avoir deux origines distinctes, une partie provenant des Andes boliviennes (bassin du Rio Mamoré et bassin supérieur du Rio Béni), l'autre partie provenant des Andes péruviennes (bassin du Rio Madre de Dios) aujourd'hui recoupée par le Rio Béni (Campbell & al., 1985). Dans le Pando au Nord, des dépôts du Cénozoïque recoupés par les rios Abuna, Orthon et Madre de Dios, donnent à la région un modelé particulier de terrasses disséquées surplombant les alluvions récentes (Montes de Oca, 1982).

Dans les Llanos, la forme des lacs et des alignements de végétation suivant des axes préférentiels NE-SW et NW-SE, suggèrent que la couverture de sédiments quaternaires est affectée par la fracturation du socle sous-jacent (Plafker, 1964; Allenby, 1988).

### III.E. LES SOLS ET LA VEGETATION.

Pour la partie bolivienne du bassin du Rio Madeira à Villabella (0.7 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>), l'utilisation de la carte de la couverture végétale et de l'occupation des sols (Brockmann, 1978), au 1/1,000,000<sup>ème</sup> permet de discerner les grands traits de la végétation. La forêt couvre de grandes étendues (64%) de la superficie du bassin, alors que les zones cultivées ne représentent que 2% de cette région (Tableau VIII).

Tableau VIII : Distribution de la couverture végétale dans la partie bolivienne du bassin du Rio Madeira (d'après les données de Brockmann, 1978).

*Distribución de la cobertura vegetal en la cuenca boliviana del Río Madera.  
Vegetal land cover of the Bolivian Madeira river drainage basin.*

Type de végétation	%
Prairie et végétation arbustive	27.7
Forêt	64.4
Zones cultivées	1.7
Lacs et zones marécageuses	3.9
Affleurements rocheux et dunes	2.2
Glaciers	0.1

### **III.E.1. Le bouclier brésilien.**

La région du bouclier brésilien est essentiellement couverte de forêt sempervirente tropicale, qui passe vers le Sud à des savanes herbeuses, prolongement des *Cerrados* du Brésil (Unesco, 1981).

Plusieurs niveaux latéritiques ont été observées dans cette région (Cochrane, 1973; Litherland & al., 1986).

### **III.E.2. Les Andes.**

Faisant suite aux glaciers, la végétation herbacée andine constitue la première couverture végétale en altitude. Les versants amazoniens de la cordillère orientale sont ensuite couverts d'une forêt tropicale montagnarde et sub-montagnarde ombrophile. C'est une zone très accidentée où les glissements de terrains sont fréquents (Yungas, Chaparé). Les sols sont dénudés, lessivés, acides, stériles avec de nombreux affleurements rocheux. Ces sols sont généralement peu épais, voire inexistant, à l'exception des altérites épaisses observées sur les replats dans certaines vallées andines (Rios Coroico, Consata, ...). Ces formations, facilement érodées, correspondent à d'anciennes surfaces d'érosion (Figure 25).

Dans la zone semi-aride des Andes (Rio Grande, Rio La Paz), cette végétation passe à une forêt claire xéromorphe épineuse décidue (Cochrane, 1973; Unesco, 1981).

Des profils de sols réalisés sur le versant amazonien de la cordillère orientale ont montré que les minéraux dominants de la fraction argileuse et silteuse sont les muscovites et illites (Wilke & Zech, 1986).

### **III.E.3. Les Llanos.**

Les Llanos sont le domaine de la forêt sempervirente tropicale ou sub-tropicale de basse altitude, qui fait place à une prairie tropicale édaphique sur sols pauvres et hydromorphes, le plus souvent sableux (Cochrane, 1973; Unesco, 1981).

Cette zone de savanes correspond en fait aux vastes plaines inondables (Eder, 1772; d'Orbigny, 1845; Denevan, 1966). L'inondation de ces prairies durant plusieurs mois de l'année empêche le développement de toute végétation boisée, qui n'existe que sur les points hauts du relief appelés îlots de forêt (*Islas de selva*). L'extension des plaines inondables, assimilées aux prairies humides de basse altitude (Ellenberg, 1981), est d'environ 150000 km<sup>2</sup> (Brockmann, 1978; Roche & Fernandez, 1988). Le Rio Mamoré draine 88% de ces zones d'inondation, alors que le Rio Béni n'en draine que 12%, différence sensible qui aura d'importantes répercussions sur l'hydrologie de ces fleuves.

## **III.F. L'HYDROGRAPHIE.**

### **III.F.1. Les bassins hydrographiques.**

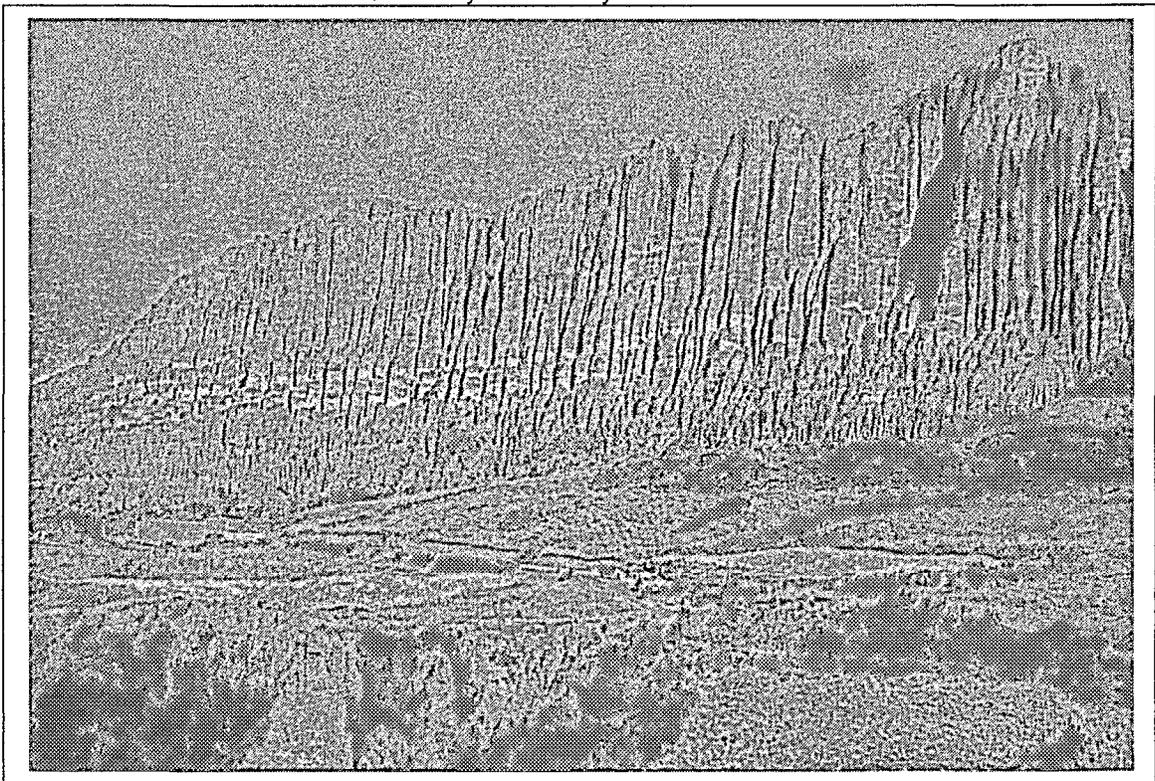
Le Rio Madeira à Villabella draine un bassin de 903500 km<sup>2</sup>, dont 24% en domaine andin et 27% sur le socle précambrien. Les formateurs du Rio Madeira s'individualisent en fonction de leur origine en tributaires andins (Rios Madre de Dios, Béni et Mamoré), en tributaires du bouclier brésilien (Rios Guaporé-Itenez, Blanco, San Martin) et en fleuves de plaine (Rios Orthon, Yata, Ibaré). Le système des rios Mamoré et Itenez représente 69% de la superficie du Rio Madeira à Villabella; les rios Béni, Madre de Dios et Orthon ne totalisent que 31% (Figure 27).



↑ Photo 9 : Entre la Cordillère Royale et la ville de La Paz, la bordure de l'Altiplano formée de sédiments plio-quaternaires (4100 m).

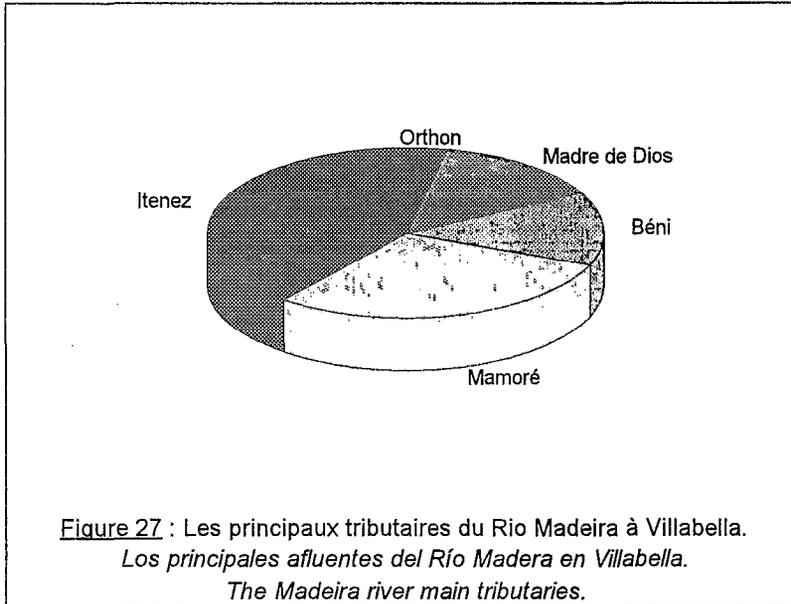
*Entre la Cordillera Real y la ciudad de La Paz, el Altiplano formado de sedimentos del plio-cuaternalio.  
Between the Real Cordillera and La Paz city, the Altiplano margin formed with plio-quaternary sediments.*

↓ Photo 10 : Les séries sédimentaires plio-quaternaires d'altitude (4000 m) dans la région de La Paz.  
*Las series sedimentarias plio-cuaternalias de altitud en la región de La Paz.  
The Plio-Quaternary sedimentary series of the La Paz area.*



### 3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

La partie andine du bassin du Rio Mamoré (102000 km<sup>2</sup>) correspond essentiellement (70%) au bassin du Rio Grande et de ses principaux formateurs (Rios Caine, Chayanta, Mizque, Azero, Piray et Yapacani). Les affluents de rive gauche du Rio Mamoré, drainant les bassins andins orientaux (Roche & al., 1986), apportent le reste de la contribution andine : Rios Ichilo (7%), Chaparé (5%), Securé (5%), Aperé (1%) et Yacuma (3%). Enfin, le Rio Itenez draine par l'intermédiaire des rios Machupo-Itonomas, San Pablo-San Julian et les Bañados de Izozog, le cours andin du Rio Parapeti qui contribue ainsi (9%) au domaine andin du Rio Mamoré à Villabella.



La partie du bouclier brésilien drainée par le Rio Mamoré (247300 km<sup>2</sup>) provient à 95% du Rio Itenez et de ses principaux tributaires (Rios Guaporé, Paragua, Blanco-Baures, et Machupo-Itonomas). Les Llanos alimentant le Rio Mamoré (270800 km<sup>2</sup>) se répartissent pour 41% dans le bassin du Rio Itenez (surtout celui du Rio Machupo-Itonomas : 36%), et pour 59% dans la plaine traversée par le Rio Mamoré depuis le piedmont andin.

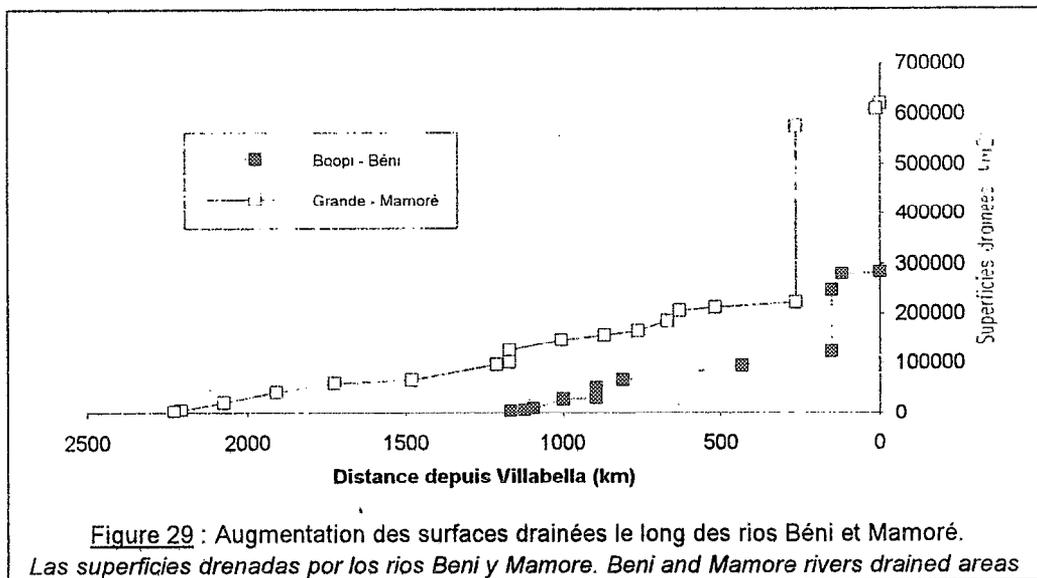
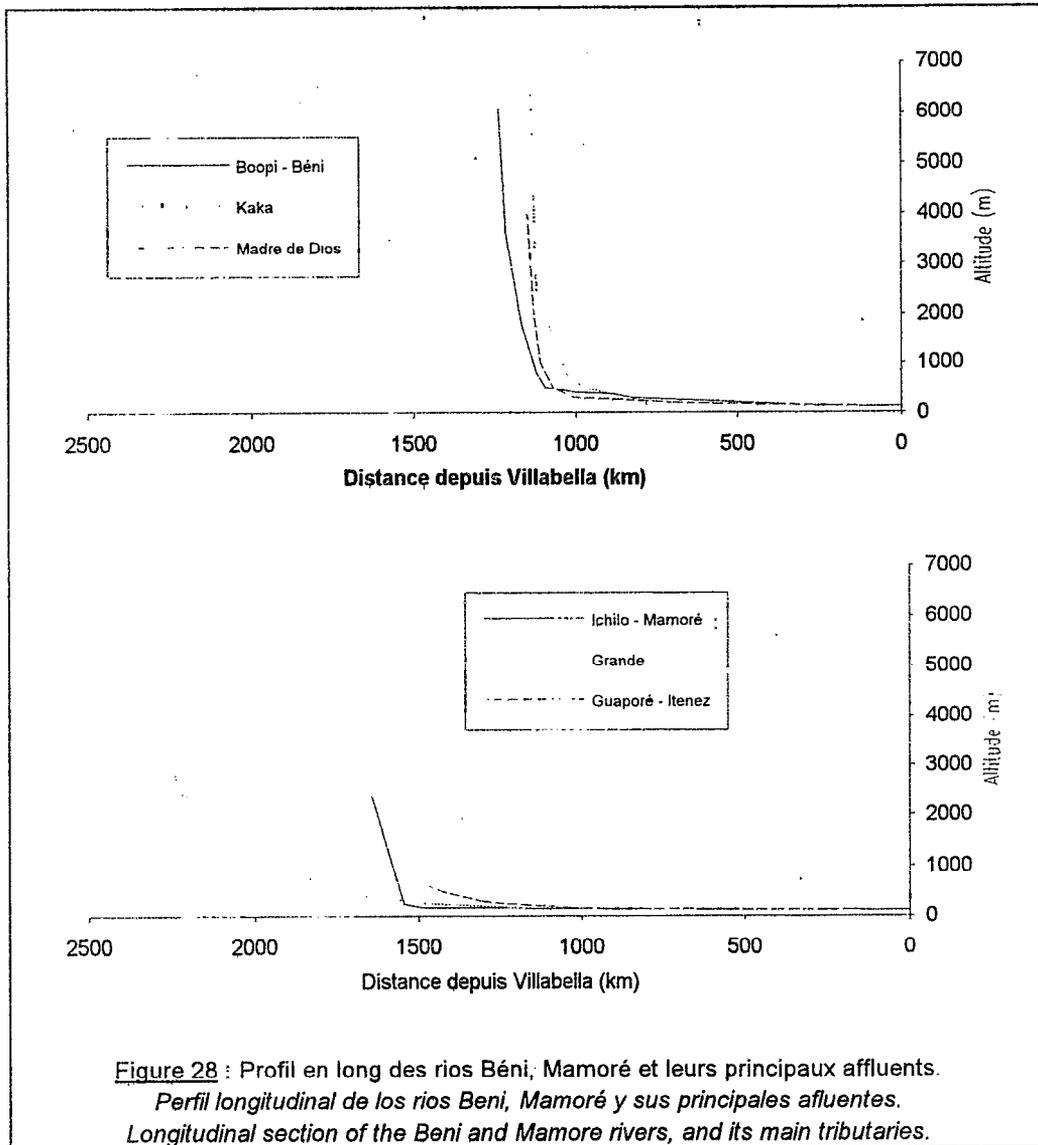
Le Rio Béni à Villabella est un fleuve andin marqué avec 41% de sa superficie situé dans la Cordillère orientale des Andes du Pérou et de Bolivie. Ce

domaine andin (115200 km<sup>2</sup>) est compris à 62% dans le bassin du Rio Béni à Riberalta, et à 38% dans le bassin du Madre de Dios. Le seul Rio Béni à Angosto del Bala avec ses principaux formateurs (Rios La Paz, Luribay, Tamampaya, Miguillas, Boopi, Cotacajes, Santa Elena, Altamachi, Alto-Béni, Coroico, Challana, Tipuani, Consata, Aten, Mapiri, Kaka, Quendeque, Quiquibey et Tuichi) draine 59% du domaine andin du Rio Béni à Villabella. Le principal affluent du Rio Béni à l'aval de Angosto del Bala, le Rio Madidi n'apporte que 2% de contribution au domaine andin. Au Pérou, les principaux tributaires andins du Rio Madre de Dios sont les rios Manu, Inambari, Tambopata et Heath.

Le Rio Béni ne draine quasiment pas d'affleurements du bouclier brésilien, sauf à l'aval de Cachuela Esperanza (0.3% de la superficie du bassin). Les Llanos du bassin du Rio Béni (167300 km<sup>2</sup>) correspondent aux bassins des rios Orthon (19%), Madre de Dios (48%) et Béni (33%).

L'évolution des profils en long des formateurs du Rio Madeira (Figure 28), montre que les bassins andins des rios Béni et Madre de Dios sont les plus proches de Villabella. Les eaux des tributaires andins du Rio Mamoré (rios Grande et Ichilo), devront traverser la plaine amazonienne sur plus de 1500 km (le double que dans le cas du Rio Béni) avant de déboucher dans le Rio Madeira.

L'augmentation des surfaces drainées par ces deux cours d'eau (Figure 29) montre que le Rio Mamoré draine un bassin deux fois plus étendu que celui du Rio Béni, et que les apports sont progressifs au cours de leur traversée des Llanos. Les décrochements observés correspondent aux apports des rios Itenez-Guaporé et Madre de Dios, respectivement pour les rios Mamoré et Béni.



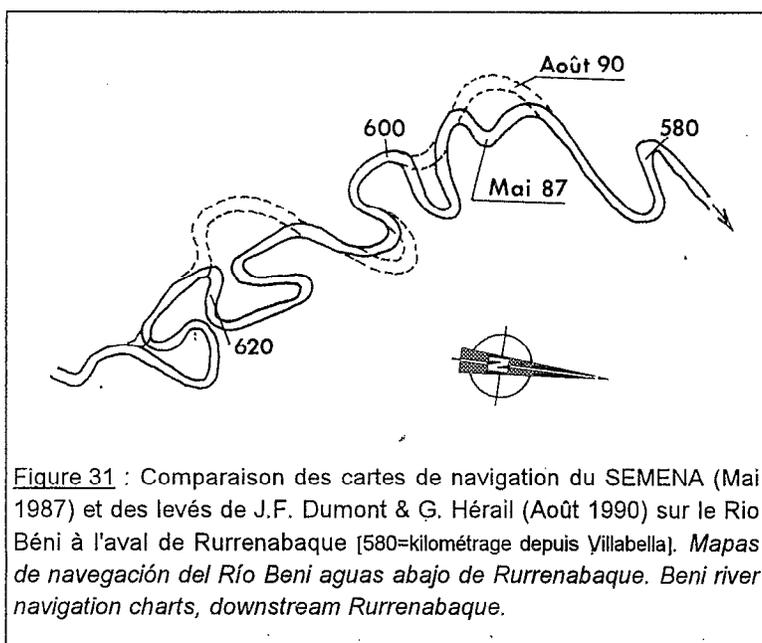
### III.F.2. Les fleuves andins dans la plaine amazonienne.

Les fleuves de la plaine amazonienne s'écoulent sur des formations sédimentaires quaternaires souvent non consolidées, avec parfois des affleurements tertiaires (Miocène supérieur) au pied des berges. Les pentes de fond sont très faibles et varient en moyenne de 3 à 7 cm.km<sup>-1</sup> pour le Rio Ichilo-Mamoré (Cordova, 1988), mais peuvent atteindre localement des valeurs de 30 cm.km<sup>-1</sup> au droit de cachuelas où affleurent les formations du socle (Taborga, 1963). Le Rio Itenez présente sur ses 600 km de cours navigable une pente moyenne de 3 cm.km<sup>-1</sup> (Taborga, 1967). Des mesures effectuées le long du Rio Béni en août 1990 ont donné des pentes variant de 4 à 23 cm.km<sup>-1</sup>. Les pentes moyennes des rios Béni, Madre de Dios et Orthon dans les Llanos sont respectivement de 7, 6 et 2 cm.km<sup>-1</sup> (Taborga, 1964).

Des alignements de lacs, de cours d'eau et de végétation observés dans les Llanos (Plafker, 1964; Allenby, 1988) permettent d'envisager un contrôle tectonique du socle sous-jacent sur la géométrie des écoulements en plaine amazonienne. Une étude récente réalisée d'après photographies aériennes montre une évolution de l'indice de sinuosité le long des fleuves Ichilo-Mamoré (Campos & Dumont, 1991).

L'utilisation de cartes de navigation au 1/10,000<sup>ème</sup> et 1/50,000<sup>ème</sup> dressées par le service d'amélioration de la Navigation en Amazonie (SEMENA, 1988) basé à Trinidad, a permis d'étudier la géométrie des écoulements le long des principaux fleuves de l'Amazonie bolivienne.

Ces cartes de navigation ont été digitalisées à l'aide du logiciel DEMIURGE en segments dont la longueur médiane est d'ordre kilométrique. Un indice de sinuosité a ensuite été calculé comme étant le rapport entre la longueur réelle d'un tronçon du fleuve (prise égale à 50 km pour tenir compte de la longueur d'onde des méandres) et la distance plan séparant les deux points extrêmes. L'évolution de l'indice de sinuosité le long des trois principaux fleuves de l'Amazonie bolivienne (Figure 30) montre que cet indice est maximum dans les zones de piedmont où il peut atteindre 8, puis décroît progressivement d'amont en aval. Cette décroissance est généralement liée à une diminution des teneurs en matières en suspension et/ou une augmentation du débit (Larras, 1977; Schumm, 1977; Vanoni, 1977; Sundborg, 1986). La présence de cachuelas et d'affleurements du socle (Rio Mamoré de 0 à 200 km) entraîne une diminution nette de cet indice qui présente alors ses valeurs minimum (de 1.2 à 1.5), due à une augmentation du gradient hydraulique (Taborga, 1963). Le même phénomène est observé sur le Rio Solimões au Brésil (Mertes, 1985), où l'indice de sinuosité varie de 1.2 à 1.4 (Holtz & Baker, 1979). L'influence des apports des différents tributaires, andins ou non, sur les variations de cet indice en dehors des zones de cachuelas n'apparaît pas clairement. Vers l'amont dans l'avant-pays andin, les variations fortes de la sinuosité en dehors de toute influence hydrologique, laissent envisager l'existence de zones à subsidence plus active.



Ainsi sur le Rio Béni à l'aval de Rurrenabaque, une telle zone à forte subsidence a été décrite (Dumont & al., 1991). Dans cette région, la forêt est en train de mourir en raison des inondations et des dépôts alluviaux qui recouvrent sur plus d'un mètre de haut le sol et les racines des arbres. Le cours du fleuve est ici en perpétuel mouvement, et des modifications notables du tracé de navigation ont été observées entre la carte dressée par le SEMENA en Mai 1987, et nos observations en Août 1990 (Figure 31).

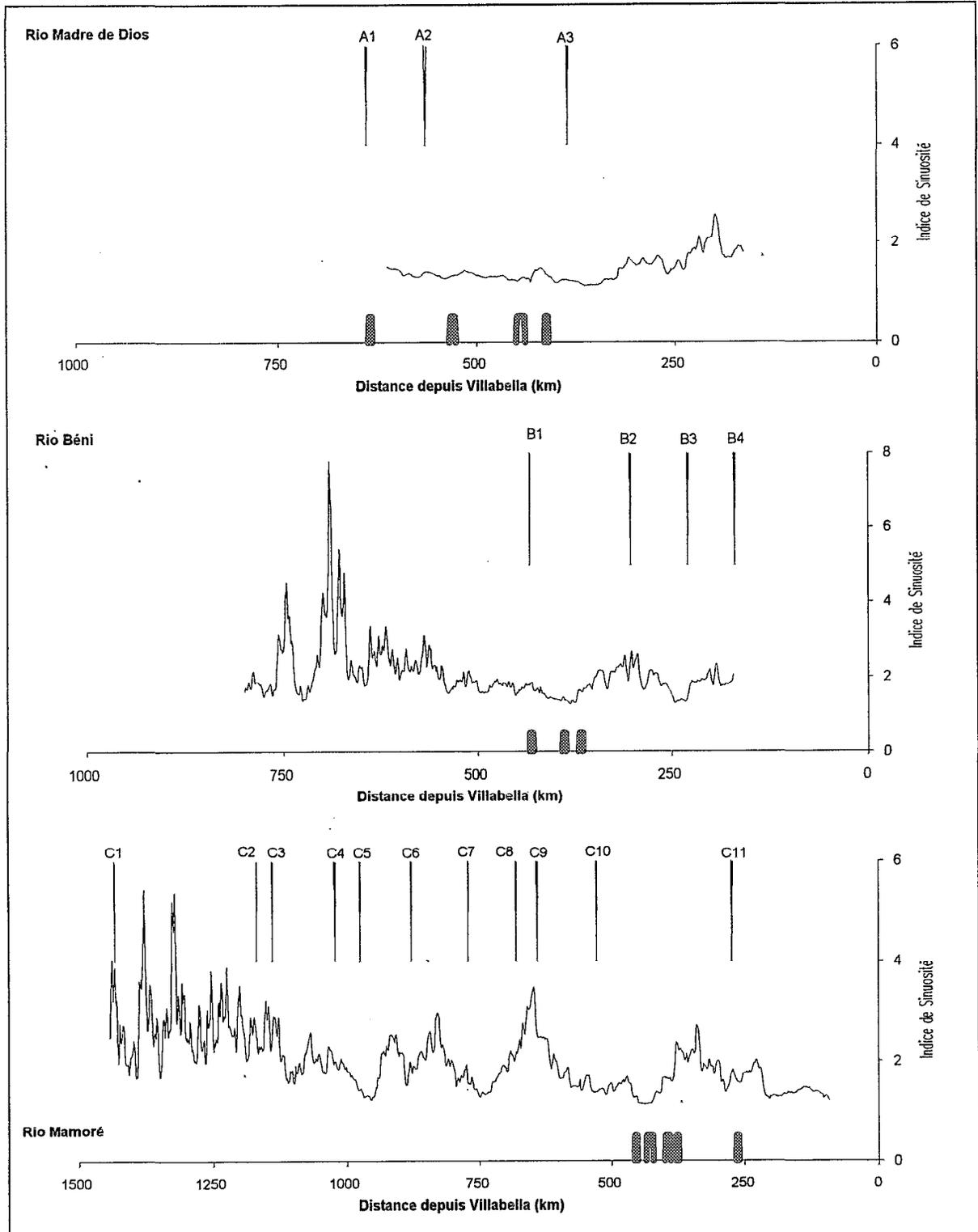
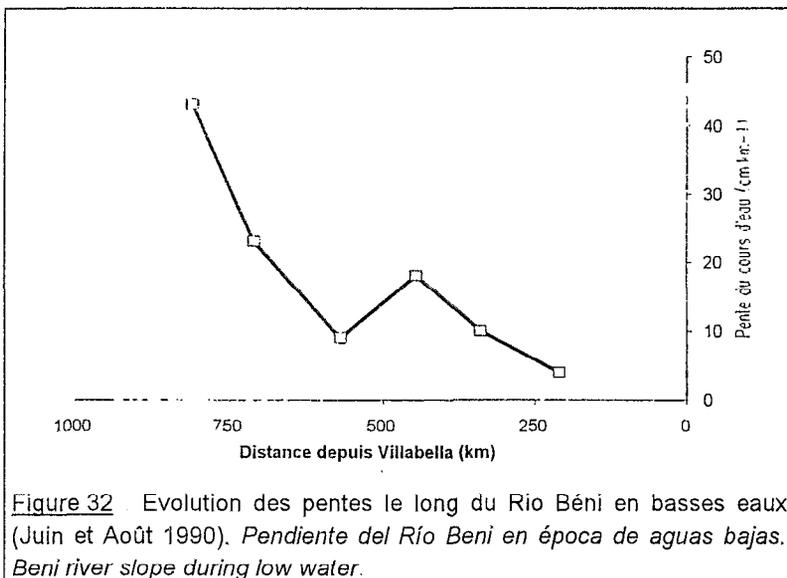


Figure 30 : Distribution de l'indice de sinuosité le long des rios Madre de Dios, Béni et Ichilo-Mamoré, d'après les cartes de navigation du SEMENA [Les traits gras du bas des graphiques indiquent la localisation des cachuelas, les traits fins du haut représentent les principaux affluents : A1=Rio Heath, A2=Rio Toromona, A3=Rio Manuparé, B1=Rio Madidi, B2=Rio Biata, B3=Rio Geneshuaya, B4=Rio Ivon, C1=Rio Chimoré, C2=Rio Chaparé, C3=Rio Grande, C4=Rio Pojige, C5=Rio Sécuré, C6=Rio Ibaré, C7=Rio Tijamuchi, C8=Rio Aperé, C9=Rio Yacuma, C10=Rio Iruyane, C11=Rio Itenez-Guaporé]. Índice de sinuosidad de los rios Madre de Dios, Beni y Ichilo-Mamore. Sinuosity index for the Madre de Dios, Beni and Ichilo-Mamore rivers.



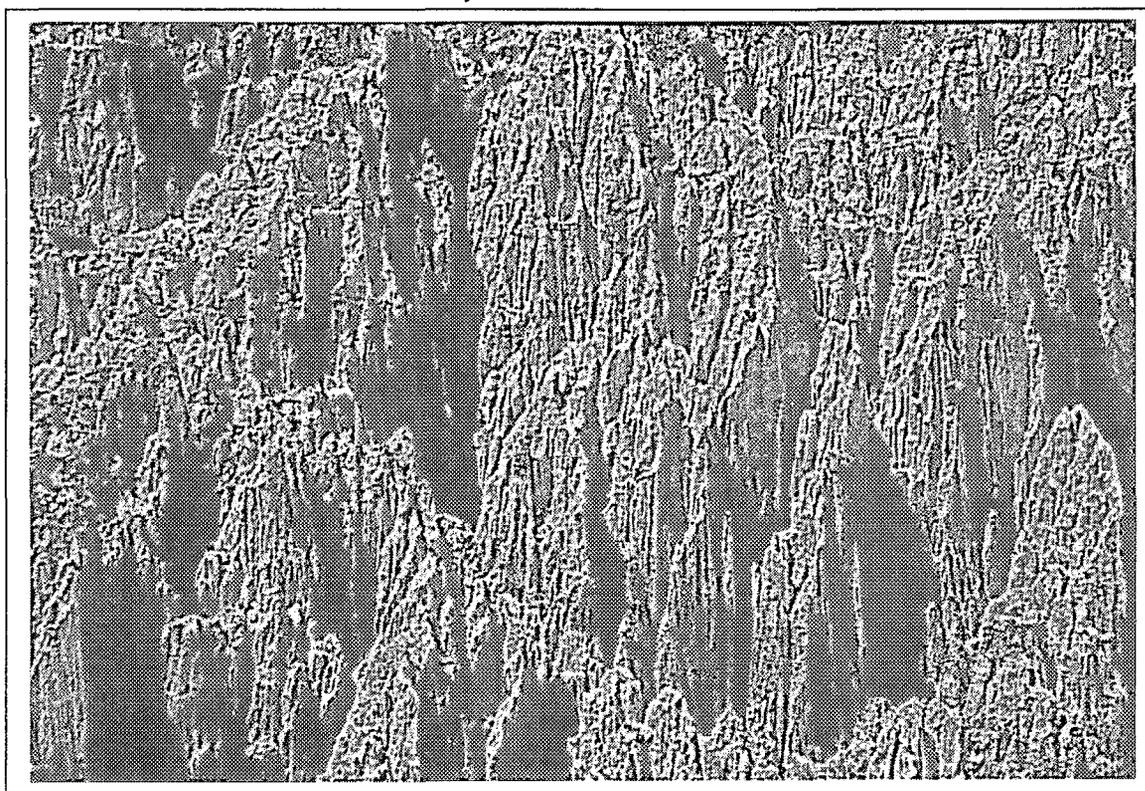
Des mesures de pente effectuées le long du Rio Béni (Juin et Août 1990) montre que cette zone subsidente (de 550 à 650 km de Villabella) correspond à des pentes plus faibles, avec un gradient de 9 cm.km<sup>-1</sup>, située à l'amont d'une zone de rapides (près de l'embouchure du Rio Madidi) où ce gradient passe à 18 cm.km<sup>-1</sup> (Figure 32).

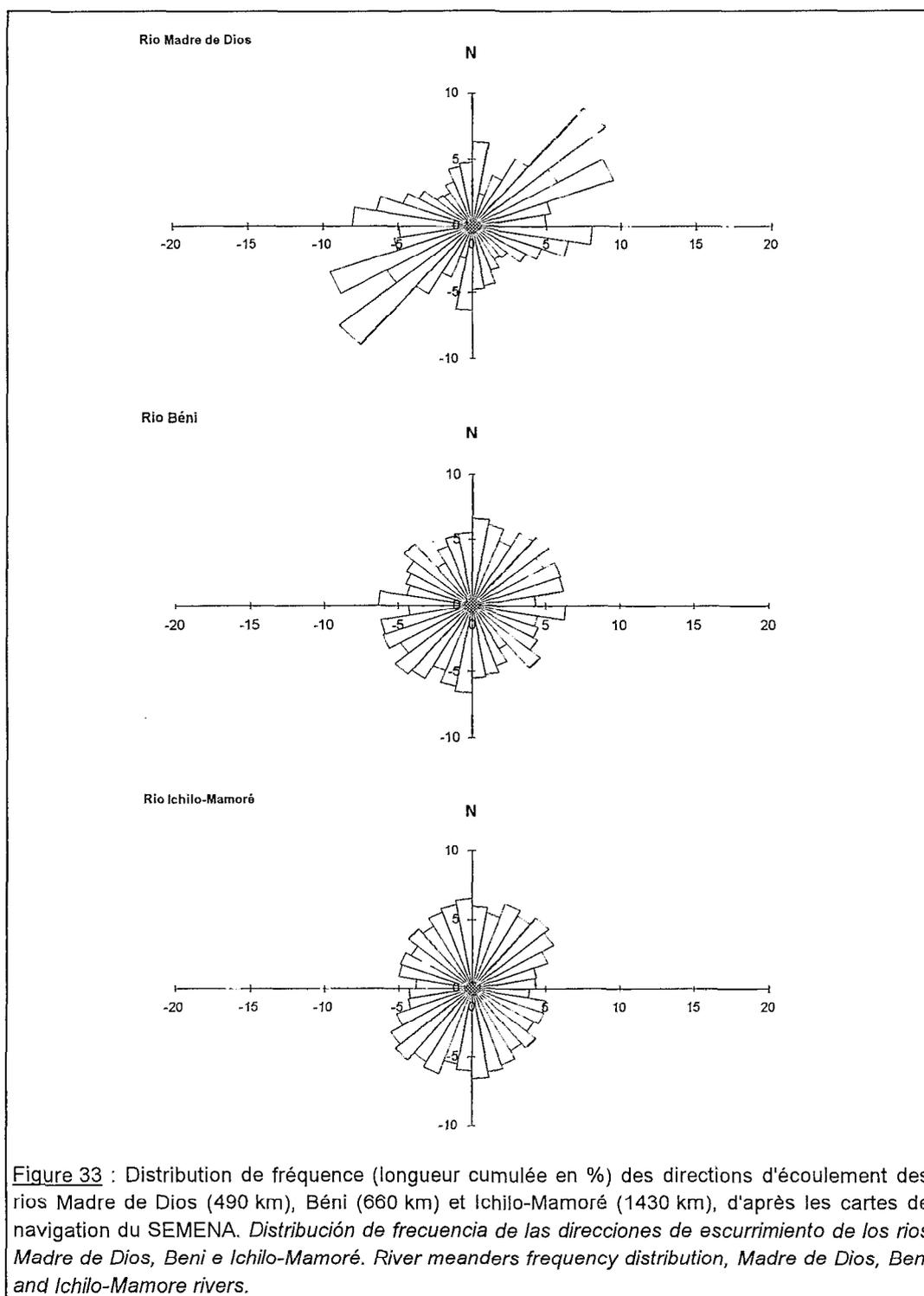
Les distributions de fréquence des directions d'écoulement (en longueur cumulée) pour les trois grands cours d'eau du bassin amazonien (Figure 33) ne permettent pas d'individualiser

clairement des familles préférentielles. Contrairement aux observations de Plafker (1964) et Allenby (1988) sur les lacs et alignements de végétation, les familles N40-50 et N130-140 ne s'individualisent pas. Dans le cas du Rio Madre de Dios, la première famille (N40-50) apparaît, mais elle correspond en fait à la direction générale de l'écoulement du fleuve.

Dans les Llanos, les cours d'eau d'origine andine déposent de grandes quantités de matériel sédimentaire, et se déplacent latéralement à l'intérieur de la ceinture alluviale. Cependant, certains changements de cours peuvent être de grande envergure, comme cela semble être le cas pour le Rio Béni à l'aval de Rurrenabaque.

↓ Photo 11 : Formes d'érosion dans les séries plio-quaternaires de la région de La Paz.  
*Formas de erosión en las series plio-cuaternarias de la región de La Paz.*  
*Plio-Quaternary erosional forms in the La Paz area.*





A la sortie des Andes, le Rio Béni se dirige aujourd'hui vers le Nord pour rejoindre le Rio Madre de Dios, mais il est probable que les grands lacs situés sur une ligne NE-SW, depuis Rurrenabaque jusqu'au Rio Mamoré, sont associés à d'anciens cours du Rio Béni (Denevan, 1966; Dumont & al., 1991). Cette hypothèse est également soutenue par la forme du réseau de drainage du Rio Béni où n'apparaît aucun affluent important de rive droite. Les mouvements affectant le socle précambrien induisent un découpage des Llanos en compartiments aux comportements hydrodynamiques différents (pente, sinuosité), liés à des phénomènes de subsidence active. Par contre, la distribution des directions d'écoulement des grands fleuves ne semble pas être affectée par la fracturation du socle sous-jacent, comme cela est observé pour les petits cours d'eau et les lacs (Plafker, 1964; Allenby, 1988).

3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

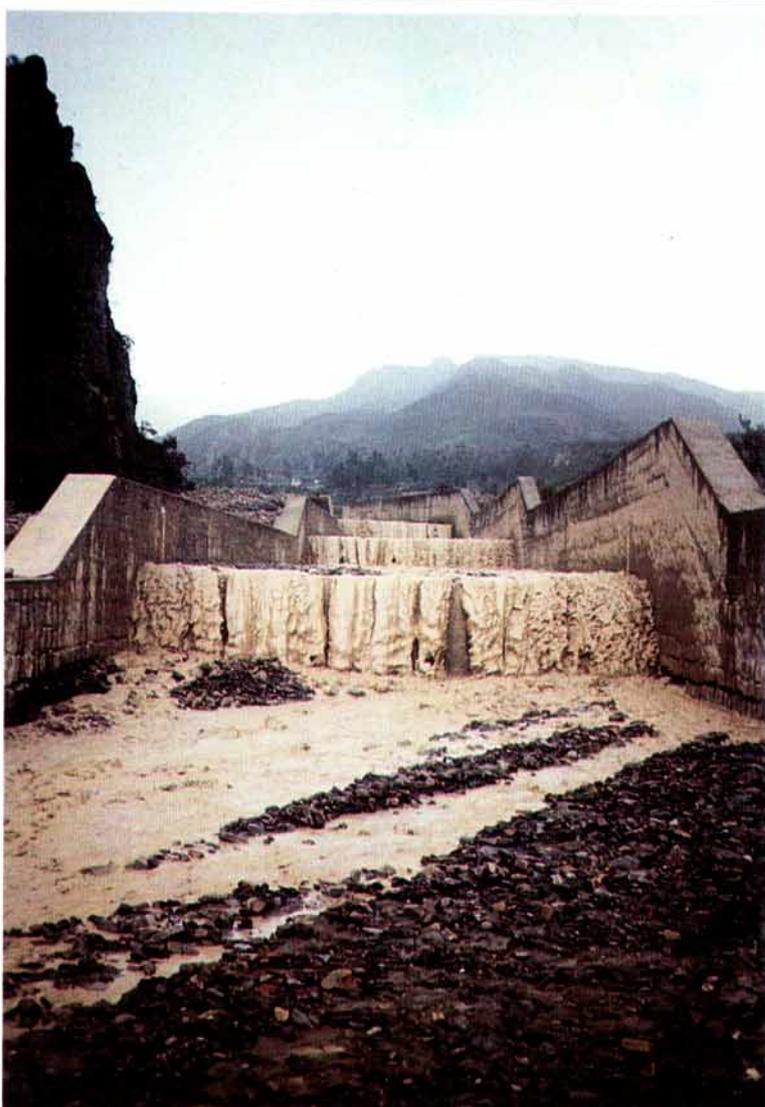


Photo 12 : Le Rio Achumani (3600 m) à La Paz, en période de hautes eaux. *El Río Achumani en La Paz, época de aguas altas. The Achumani river at La Paz, high water.*

Photo 13 : Le Rio La Paz à Rio Abajo (3000 m) traverse la coulée sédimentaire quaternaire qui occupe le fond de la vallée (à droite). *El Río La Paz en Río Abajo. The La Paz river at Rio Abajo.*



### III.G. LE CLIMAT.

#### III.G.1. Les données paléoclimatiques.

De nombreux travaux réalisés dans les Andes de Bolivie, basés sur des observations stratigraphiques concernant les lacs de l'Altiplano (Kessler, 1963; Servant & Fontes, 1978; Lavenu & al., 1984; Hastenrath & Kutzbach, 1985; Wirrmann, 1987; Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987) ou les cours d'eau du versant amazonien (Servant & al., 1981; Servant & Fontes, 1984), ont montré l'existence de profonds changements climatiques au cours du Quaternaire. Des périodes à averses pluvieuses orageuses et estivales ont alterné avec des périodes à précipitations neigeuses assez bien distribuées au long de l'année. Les datations par la méthode du  $^{14}\text{C}$  indiquent que ces changements du régime climatique s'opèrent à une échelle de temps de 2 à 3000 ans (Servant & al., 1981). Cette instabilité millénaire du climat affectera largement la forêt dense du bassin amazonien (Servant & al., 1981). Ces observations ont été confirmées par l'étude des diatomées (Servant-Vildary, 1978; Roux & Servant-Vildary, 1984; Pierre & Wirrmann, 1986), des pollens (Graf, 1981; Ybert, 1982, 1984), des ostracodes (Mourguiart & al., 1986) et des tourbières à partir desquelles les oscillations des glaciers au cours du Quaternaire ont été datées (Gouze & al., 1986).

#### III.G.2. Les précipitations.

Les nombreuses études sur le climat actuel de la partie montagneuse de Bolivie ont débuté à la fin du siècle dernier avec les premières expéditions scientifiques dans les Andes et sur l'Altiplano, souvent plus particulièrement tournées vers le bassin du lac Titicaca (Agassiz, 1876; Ward, 1898; Neveu-Lemaire, 1904; Bandelier, 1905; Monheim, 1956; Gilson, 1964; Kessler, 1966, 1970; Kessler & Monheim, 1968; Richerson & al., 1975; Cihak & Kessler, 1976; Kittel & Richerson, 1978; Carmouze & al., 1978; Boulangé & Aquize Jaen, 1981; GTZ, 1981; Carmouze & al., 1983; Antunez de Mayolo, 1983; Francou & Pizarro, 1985; Künzel & Kessler, 1986; Roche & al., 1992).

Dans la partie andine du bassin amazonien, un certain nombre d'études climatologiques locales ont été réalisées, généralement liées à des projets d'aménagements divers (Martin, 1977; Kleeberg, 1979; ENDE, 1980; 1985; Asociación Misicuni, 1987). Quelques travaux ont porté plus particulièrement sur les glaciers de la cordillère orientale (Melbourne, 1960; Hastenrath, 1971; 1985; Jordan, 1979).

Après les observations des premiers missionnaires (Eder, 1772) et les travaux de d'Orbigny (1845), la climatologie de la plaine amazonienne a été abordée par les différents ouvrages du service d'hydrographie navale de Bolivie qui a établi la première carte des précipitations du pays (*In* Taborga, 1963, 1964, 1967).

Mais les premières études sérieuses sur la climatologie du bassin du Rio Madeira ont été réalisées dans le cadre du PHICAB pour la période 1968-1982 (Espinoza, 1985; Garcia, 1985; Ronchail, 1985, 1986, 1988, 1989; Roche, 1986; Roche & Fernandez, 1986, 1988; Roche & al., 1986; 1990, 1992; Abasto, 1987; Cruz, 1987; Herbas, 1987; Carvajal, 1988). Les autres bassins versants de Bolivie ont également été étudiés par le PHICAB dans le cadre du PHI de l'Unesco, comme l'Altiplano (Lozada, 1985; Mariaca, 1985) et le haut bassin du Rio Paraguay (Arellano, 1988; Frias, 1989).

L'ensemble du bassin du Rio Madeira à Villabella est soumis au même régime de précipitation d'origine atlantique (Ronchail, 1985, 1986), caractérisé par l'alternance d'une période humide (de novembre à avril) et d'une période sèche (Johnson, 1976; Montes de Oca, 1982). Cette variation saisonnière du climat est déterminée par les mouvements de la Zone Intertropicale de Convergence (ZITC) et les mouvements des anticyclones atlantique et pacifique entre lesquels se maintient fréquemment une vallée de basses pressions sur la Bolivie (Roche & al., 1986).

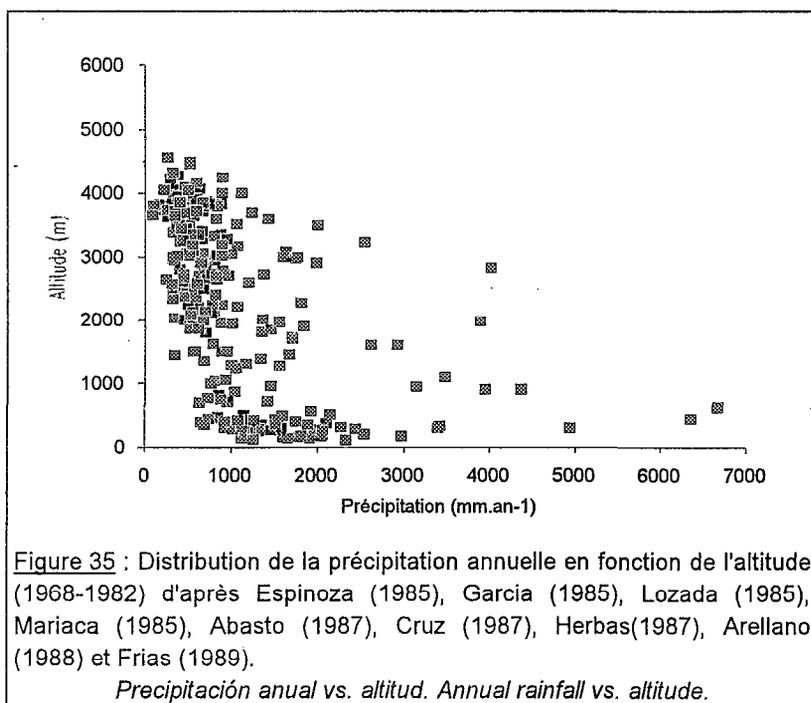
Pendant l'hiver austral, saison sèche caractérisée par une meilleure stabilité de l'air, des intrusions d'air du Sud (*Surazos*) d'origine polaire se produisent parfois. L'été austral correspond à la saison des pluies qui détermine la distribution spatiale des précipitations (Figure 34). Les Alizés venus du Nord-Est et du Nord maintiennent sur le bassin amazonien une masse d'air, dont l'humidité est recyclée à partir de la plaine amazonienne, et qui vient rencontrer les Andes, étant ainsi déviée vers le Sud-Est. Dans ces régions, elle se trouve en contact avec une masse d'air plus sèche venue du Sud, parfois véritable masse polaire qui génère un front froid. Cet air du Sud s'insinue dans la

### 3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

plaine amazonienne, entre les Andes et les reliefs du bouclier brésilien. L'influence de cette masse d'air, très marquée dans le Sud de la Bolivie, avec des précipitations inférieures à  $600 \text{ mm.an}^{-1}$ , diminue progressivement vers le Nord de la plaine amazonienne où les précipitations atteignent plus de  $2000 \text{ mm.an}^{-1}$ .

La déviation de l'air humide le long des Andes, et son blocage dans les "baies" du relief au contact des premiers contreforts, déterminent de fortes précipitations dans des zones comme le Chaparé ou le haut Madre de Dios au Pérou où les pluies dépassent  $6000$  à  $7000 \text{ mm.an}^{-1}$ . Au contraire, le blocage de l'air humide par les sommets de la Cordillère met à l'abri d'autres régions des Andes telles que celles de Cochabamba ou de Luribay, et la majeure partie du bassin du Rio Grande (Roche & al., 1986; Roche & Fernandez, 1988).

A partir des études du bilan hydrique par bassin (Espinoza, 1985; Garcia, 1985; Abasto, 1987; Cruz, 1987) et des cartes de précipitation (Roche & Rocha, 1985; Roche & al., 1990, 1992) réalisées par le PHICAB, la pluviométrie des différents bassins a pu être estimée pour la période 1968-1982.



Ainsi, le bassin du Rio Madre de Dios reçoit des précipitations importantes, de  $2500$  à  $7000 \text{ mm.an}^{-1}$  sur le versant andin, et de  $1800$  à  $2500 \text{ mm.an}^{-1}$  dans la plaine. Le bassin du Rio Béni dans sa partie andine reçoit de l'ordre de  $800$  à  $1000 \text{ mm.an}^{-1}$  sur les sommets, et plus de  $4000 \text{ mm.an}^{-1}$  à la partie supérieure des vallées chaudes (*Yungas*). Les hauteurs de pluies dans les zones les plus abritées de ces vallées sont de l'ordre de  $1500 \text{ mm.an}^{-1}$ . Les zones très protégées car situées à l'Ouest des crêtes de la cordillère orientale, comme la vallée du Rio La Paz et Luribay, ont des précipitations comprises

entre  $300$  et  $500 \text{ mm.an}^{-1}$ . La pluie sur le bassin andin est estimée à  $1630 \text{ mm.an}^{-1}$ . Les pluies dans l'Alto-Béni varient entre  $1500$  et plus de  $2000 \text{ mm.an}^{-1}$ , tandis que celles de la plaine sont comprises entre  $1650$  et  $2000 \text{ mm.an}^{-1}$ . La pluviométrie moyenne sur le bassin de la plaine est évaluée à  $1800 \text{ mm.an}^{-1}$ , et  $1930 \text{ mm.an}^{-1}$  sur l'ensemble du bassin du Rio Béni (Roche & al., 1986, 1992).

Le bassin du Rio Mamoré peut être subdivisé en trois zones. 1) Le bassin du Rio Grande dans sa partie supérieure est semi-aride, avec des valeurs minimum de l'ordre de  $480 \text{ mm.an}^{-1}$  dans la région de Cochabamba. Une zone à forte pluie, avec un maximum de  $1700 \text{ mm.an}^{-1}$  sur les premiers reliefs des Andes, est à noter à l'Ouest d'Abapo. La pluie moyenne sur le bassin est évaluée à  $750 \text{ mm.an}^{-1}$ . 2) Les bassins andins des affluents du Rio Mamoré, situés entre ceux du Rio Grande et ceux du Rio Alto-Béni, sont les plus arrosés de Bolivie avec des hauteurs de pluies comprises entre  $2000$  et  $6000 \text{ mm.an}^{-1}$ , le maximum se situant sur les deux formateurs du Rio Chaparé (les rios Esperitu Santos et San Mateo), et sur les haut-bassins des rios Sécuré, Chimoré et Sajta. La précipitation moyenne sur cet ensemble est estimée à  $3000 \text{ mm.an}^{-1}$ . 3) Enfin, la plaine amazonienne présente une pluviométrie comprise entre  $800 \text{ mm.an}^{-1}$  sur le Rio Grande,  $3000 \text{ mm.an}^{-1}$  sur le Rio Ichilo, et  $1900 \text{ mm.an}^{-1}$  au début du Rio Madeira. L'augmentation des hauteurs de pluie s'observe vers le Nord ( $800$  à  $1900 \text{ mm.an}^{-1}$ ) et vers l'Ouest ( $1000$ - $1900$  à  $2000$ - $4000 \text{ mm.an}^{-1}$ ). La pluie moyenne en plaine est évaluée à  $1690 \text{ mm.an}^{-1}$  et  $1800 \text{ mm.an}^{-1}$  pour l'ensemble du bassin du Rio Mamoré. De son côté, le Rio Itenez reçoit des précipitations comprises entre  $900 \text{ mm.an}^{-1}$  au Sud,  $1800 \text{ mm.an}^{-1}$  à l'Est et  $1900 \text{ mm.an}^{-1}$  au Nord-Est (Roche & al., 1986).

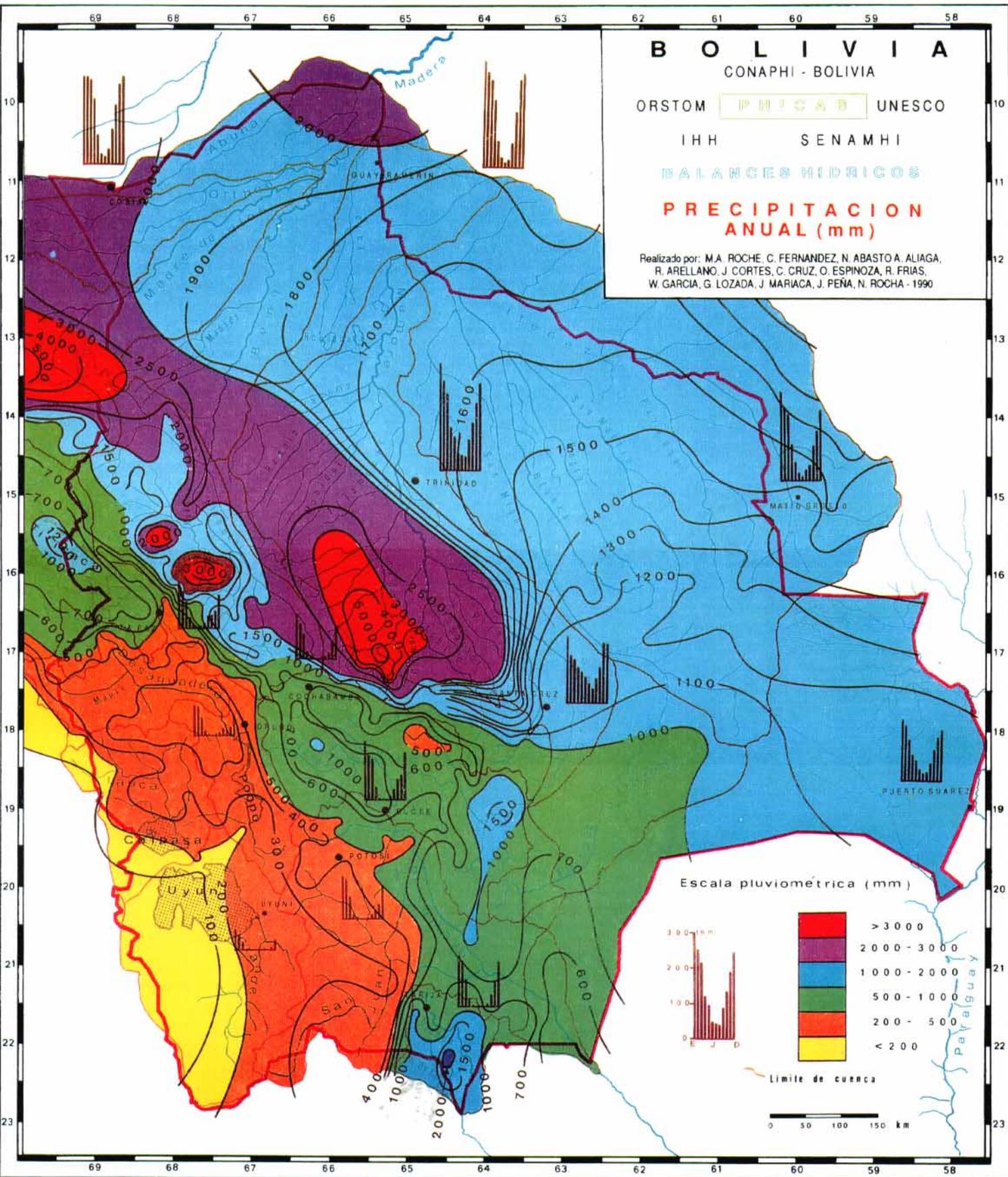
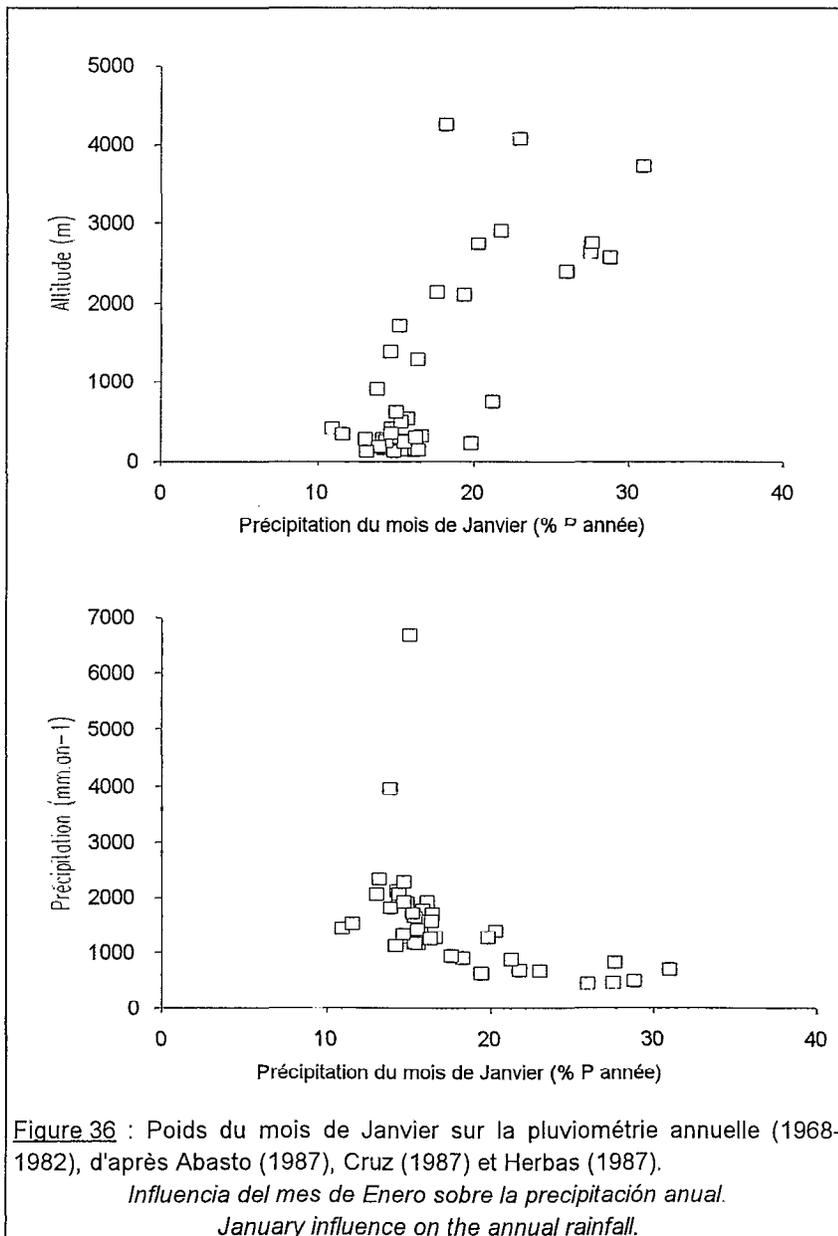


Figure 34 : Carte des précipitations moyennes annuelles de Bolivie (d'après Roche & al., 1990).  
Mapa de las precipitaciones medias anuales de Bolivia. Mean annual rainfall map of Bolivia.

Dans les Andes, il n'existe pas de relation générale entre précipitation et altitude. Après les zones de piedmont, la pluviométrie tend à décroître et le blocage fréquent de l'air oriental par la Cordillère met à l'abri de vastes zones à l'intérieur des Andes. Ces zones semi-arides se développent plus vers le Sud, comme les vallées de Cochabamba (rios Rocha, Tapacari et Arque), du Rio Grande, du Rio La Paz et du Rio Luribay (Roche & al., 1990). La distribution des précipitations en fonction de l'altitude présente donc un ensemble de points très étalés (Figure 35), fonction complexe des facteurs météorologiques et orographiques. Toutefois, les plus fortes précipitations (>5000 mm.an<sup>-1</sup>) sont observées en plaine dans les zones de piedmont (altitude<1000 m). La gamme de variation annuelle de la pluviométrie diminue avec l'altitude.

La distribution saisonnière des précipitations montre que les 6 mois de saison humide sont responsables de 60 à 95% de la pluviométrie annuelle (Johnson, 1976). Ce taux, voisin de 70% dans les Llanos, augmente dans les Andes où le maximum est atteint sur l'Altiplano. Dans le bassin du Rio Madeira à Villabella, les trois mois les plus pluvieux (de Décembre à Février) représentent de 30% (en plaine) à 70% (à Cochabamba) du total annuel des précipitations (Abasto, 1987; Cruz, 1987, Herbas, 1987). Le seul mois de Janvier, généralement le plus pluvieux, est responsable de 10 à 30% du volume annuel des pluies. Ce pourcentage du mois de Janvier sur la pluviométrie annuelle, traduisant l'irrégularité du régime, augmente avec l'altitude et diminue avec le total annuel précipité (Figure 36).



L'intensité de la pluie est un paramètre fondamental pour l'estimation de l'érosion. Malheureusement, il n'existe pas en Bolivie de relevés pluviographiques suffisants à l'échelle du bassin étudié, pour permettre d'évaluer l'intensité de la pluie. Par contre, la précipitation maximum observée par 24 heures, mesure facilement déterminée et archivée pour de nombreuses stations par le SENAMHI, permet d'estimer d'une certaine manière l'intensité des précipitations. Dans le bassin du Rio Madeira à Villabella, la précipitation annuelle maximum observée en 24 heures (moyenne interannuelle) est liée linéairement à la précipitation annuelle de la station, avec un coefficient de corrélation ( $r$ ) de 0.820 pour ( $n$ ) 124 échantillons (Figure 37). Il semble donc que dans le bassin étudié, l'intensité des pluies augmente avec la lame d'eau précipitée.

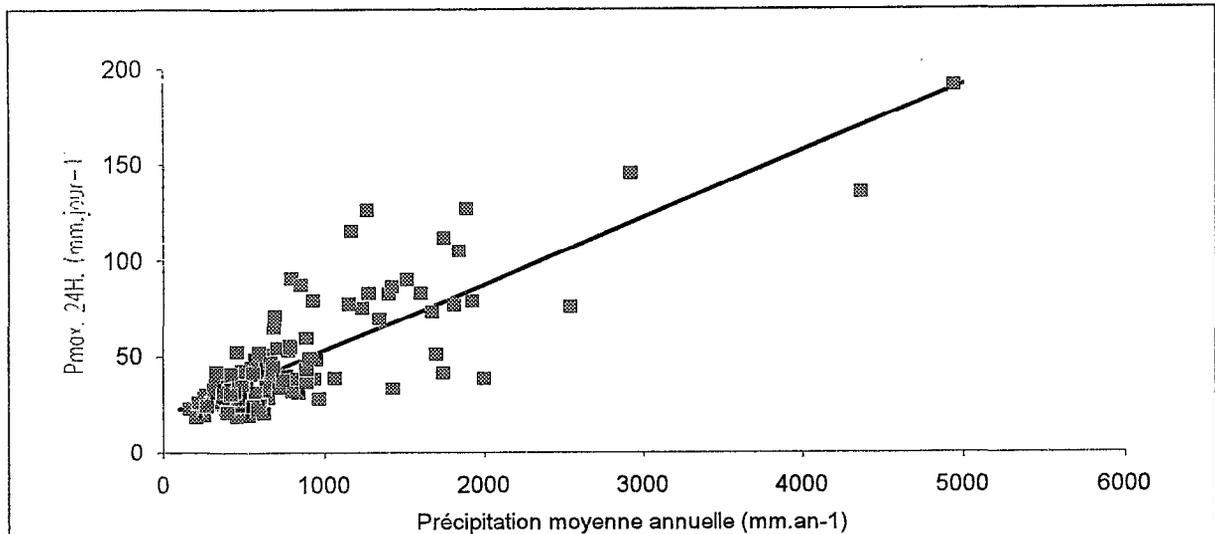


Figure 37 : Précipitation maximum en 24 heures vs. précipitation annuelle, d'après les données du SENAMHI, La Paz, Bolivie. *Precipitación máxima en 24 horas vs. precipitación anual. 24 hours maximum rainfall vs. annual rainfall.*

Le calcul du bilan hydrique par bassin, réalisé par les différents travaux du PHICAB porte pour des raisons de qualité de l'information, sur la période 1968-1982, alors que le réseau hydrométrique du PHICAB est en service depuis 1983. Il est donc important de caractériser ces différentes périodes par rapport à une période plus longue, en utilisant les données des aéroports (AASANA), statistiquement plus fiables, et disponibles à partir de 1943 (Ronchail, 1985).

Tableau IX : Précipitation moyenne annuelle (P en mm.) de six stations boliviennes pour différentes périodes (d'après les données de l'AASANA, La Paz). *Precipitación media anual. Mean annual rainfall.*

Station	Altitude (m)	P (43-89)	P (68-82)	P (83-89)
El Alto de La Paz	4058	596	627	597
Sucre	2903	656	675	728
Cochabamba	2548	480	482	471
Santa Cruz de la Sierra	413	1287	1272	1784
Trinidad	157	1791	1767	1924
Riberalta	135	1746	1895	

Les trois stations andines (El Alto de La Paz, Sucre, Cochabamba) présentent pour les différentes périodes des résultats voisins. Dans les Llanos (Santa Cruz de la Sierra, Trinidad et Riberalta), la pluviométrie pour la période 1968-1982 est comparable à celle de l'ensemble des données (1943-1989), malgré un léger excédent observé à Riberalta situé au Nord. Par contre, il apparaît clairement que de 1983 à 1989, les Llanos ont été largement plus arrosés que pendant les périodes précédentes.

La distribution des totaux annuels montrent que dans les Andes (Figure 38) les années 1980 et 1983 sont caractérisées par des précipitations plutôt déficitaires, alors qu'en 1984-1985, celles-ci seraient plutôt excédentaires. Contrairement à ce qui est observé dans les Andes, la période 1981-1983 présente une pluviométrie excédentaire dans les Llanos (Trinidad et Santa Cruz de la Sierra), alors que 1984-1985 montre une légère diminution (Figure 39), tout en étant au dessus de la moyenne 1943-1989. La station de Riberalta présente de nombreuses lacunes d'observation.

3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

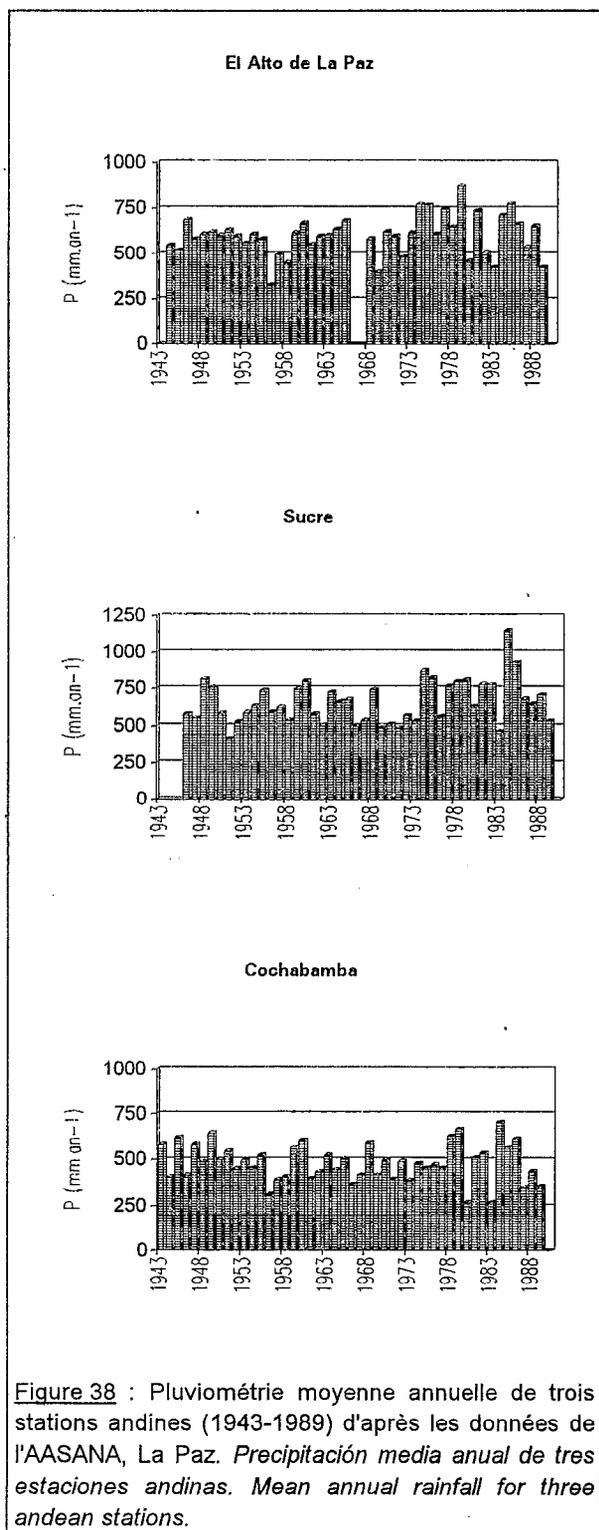


Figure 38 : Pluviométrie moyenne annuelle de trois stations andines (1943-1989) d'après les données de l'AASANA, La Paz. *Precipitación media anual de tres estaciones andinas. Mean annual rainfall for three andean stations.*

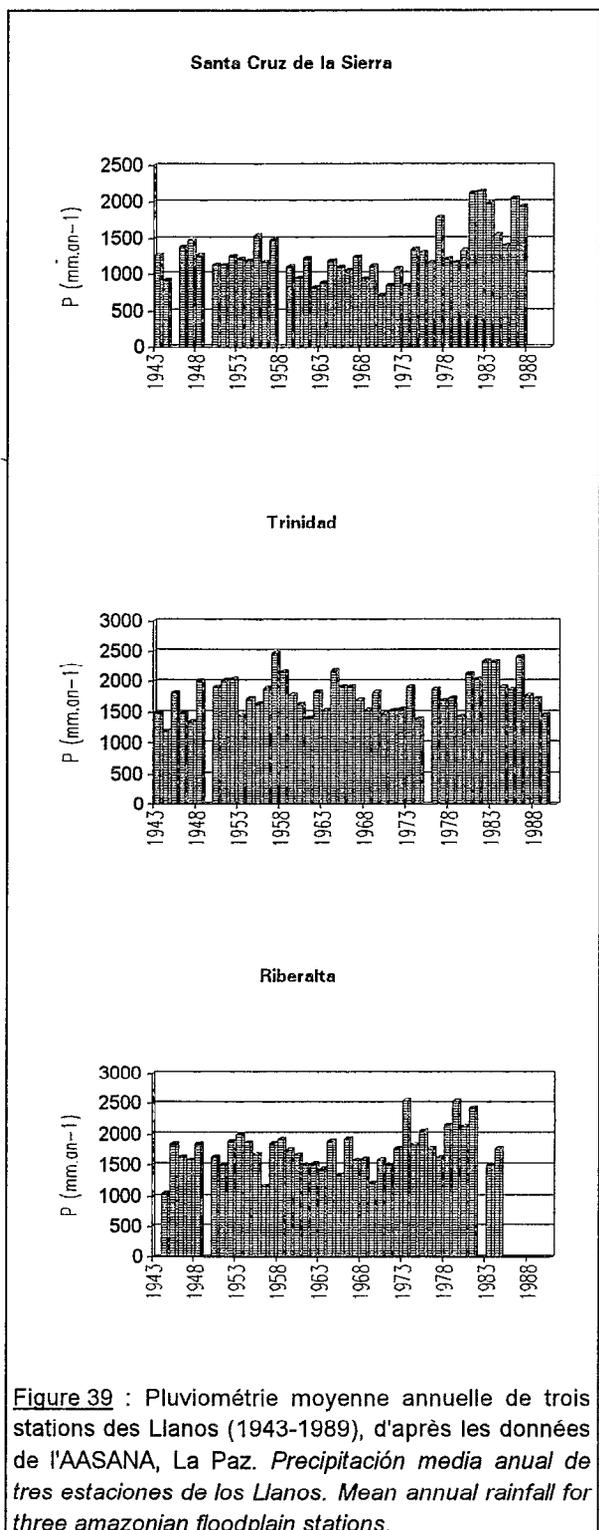
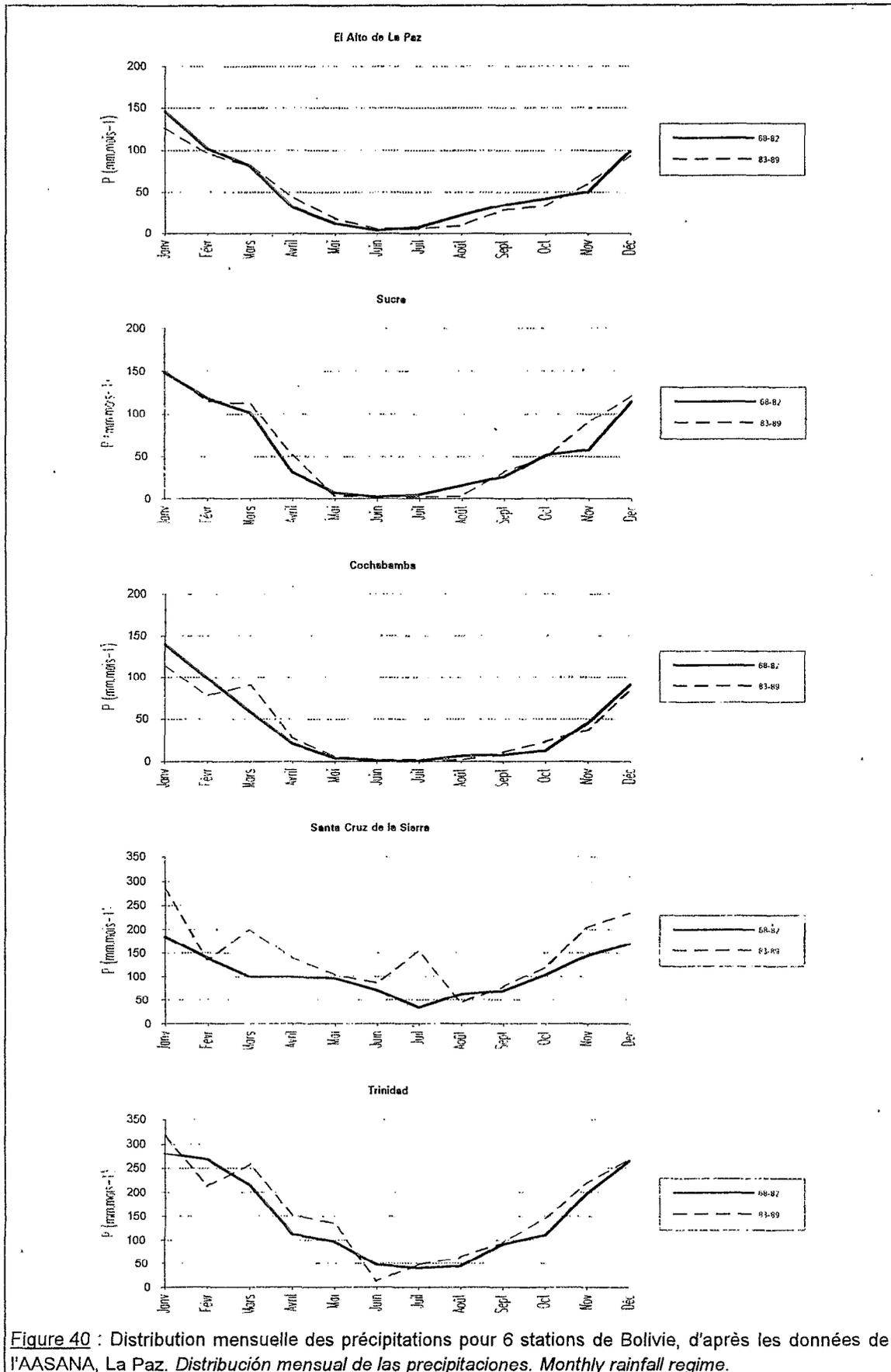


Figure 39 : Pluviométrie moyenne annuelle de trois stations des Llanos (1943-1989), d'après les données de l'AASANA, La Paz. *Precipitación media anual de tres estaciones de los Llanos. Mean annual rainfall for three amazonian floodplain stations.*

Ces variations périodiques de la pluviométrie moyenne annuelle sont à relier aux grands changements climatiques qui affectent l'ensemble de la région, comme le fameux El Niño de 1982 (Ropelewski & Halpert, 1989; Kiladis & Diaz, 1989). La présence d'un phénomène de type Niño (observé en 1982 et en 1986) entraîne en Bolivie une sécheresse dans les Andes et dans la partie Nord des Llanos, alors que des pluies excédentaires sont observées dans le Sud des Llanos (Ronchail, 1988).

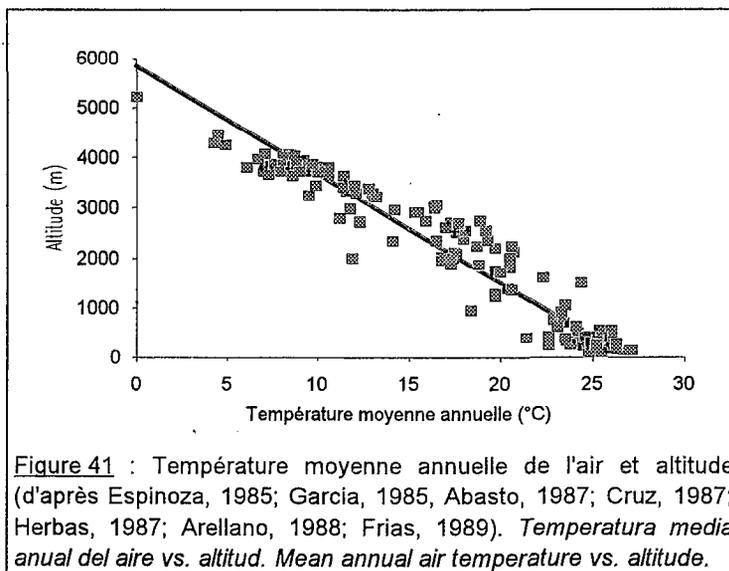


La distribution mensuelle des précipitations (Figure 40) pour les deux périodes de références du PHICAB (1968-1982 et 1983-1989) montre bien l'augmentation de la pluviométrie dans les Llanos pour la seconde période. Pour 1983-1989, le mois de février présente sur pratiquement toutes les stations un net déficit, compensé par un mois de mars excédentaire.

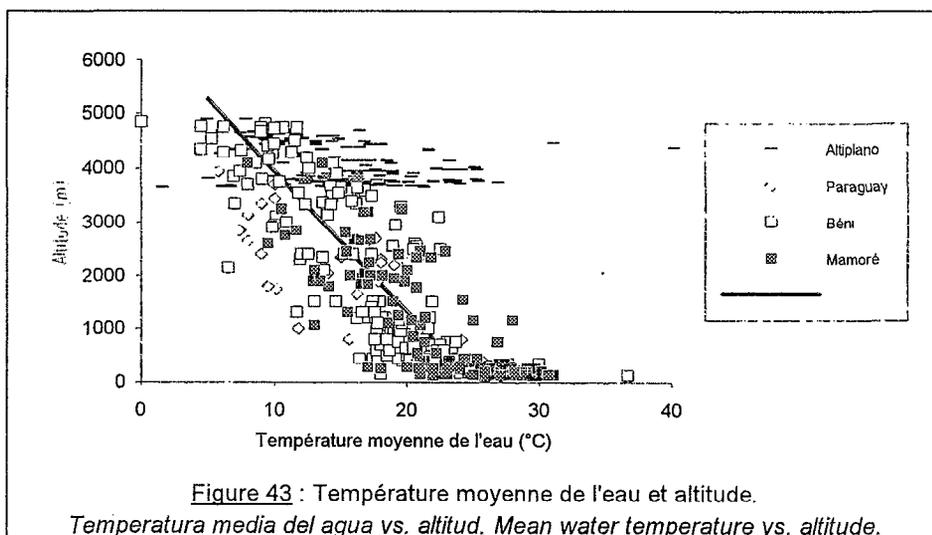
### III.G.3. Les températures.

La distribution des températures de l'air sur l'ensemble du bassin versant (Espinoza, 1985; Garcia, 1985, Abasto, 1987; Cruz, 1987; Herbas, 1987; Arellano, 1988; Frias, 1989) est une fonction linéaire inverse de l'altitude (Figure 41).

La corrélation obtenue entre altitude et température ( $r=-0.964$ ,  $n=148$ ) donne pour le gradient thermique l'équation suivante :  
 Température de l'air (°C) =  $26.9 - 0.0046 \cdot \text{Altitude (m)}$ . Cette relation est meilleure dans les Andes, où la température est uniquement fonction de l'altitude, que dans les Llanos où la dispersion des données montre une plus grande variabilité de la température moyenne annuelle, liée aux mouvements des masses d'air dans la plaine amazonienne (Figure 42).



La température des lacs et des cours d'eau est un bon indicateur de la distribution géographique des températures de l'air. De nombreuses études ont été réalisées sur le lac Titicaca (Agassiz, 1876; Ward, 1898; Neveu-Lemaire, 1904; Gilson, 1964; Richerson, 1975; Kittel & Richerson, 1978; Carmouze & al., 1983, 1984; Richerson & al., 1986; Itlis, 1987), ainsi que quelques unes sur des lacs de la cordillère orientale des Andes (Löfler, 1968; Lauzanne & Franc, 1979; Itlis, 1988; Aoyama & al., 1990). Sur le versant amazonien, les travaux de l'ORSTOM et du programme PHICAB ont permis de définir le profil thermique des cours d'eau andins (Corbin & al., 1988; Wasson & al., 1989). Ces données, complétées et actualisées, concernant 720 cours d'eau et lacs de Bolivie, sont stockées dans une banque de données hydrochimiques développée par le PHICAB.



La distribution de la température moyenne de chaque point d'eau en fonction de l'altitude (Figure 43) montre la même tendance que celle observée pour la température de l'air, mais avec une plus grande dispersion des points. Cette dispersion est surtout sensible sur l'Altiplano, notamment en raison de thermalisme, mais aussi du fait d'un échantillonnage souvent ponctuel alors que les variations diurnes de la température des cours d'eau dépassent fréquemment les 30° C. (Wasson & al., 1989). La corrélation obtenue entre altitude et température de l'eau, en excluant les valeurs de l'Altiplano ( $r=-0.832$ ,  $n=459$ ) donne l'équation suivante : Température de l'eau (°C) =  $25.0 - 0.0038 \cdot \text{Altitude (m)}$ .

La variation saisonnière de la température suit sur l'ensemble du bassin la même distribution que celle des précipitations, avec un minimum observé en saison sèche, et un maximum en saison des pluies, de novembre à avril. En plaine amazonienne à Trinidad (Figure 44), l'évolution saisonnière des précipitations et des températures, étudiées au pas de temps journalier, montre bien l'alternance d'un hiver austral sec et froid et d'un été austral chaud et humide. En saison des pluies, la précipitation journalière peut dépasser 300 mm. Durant l'hiver austral, des chutes brutales de la température, pouvant atteindre 10 degrés en quelques heures (Eder, 1772; d'Orbigny, 1845), sont fréquemment observées.

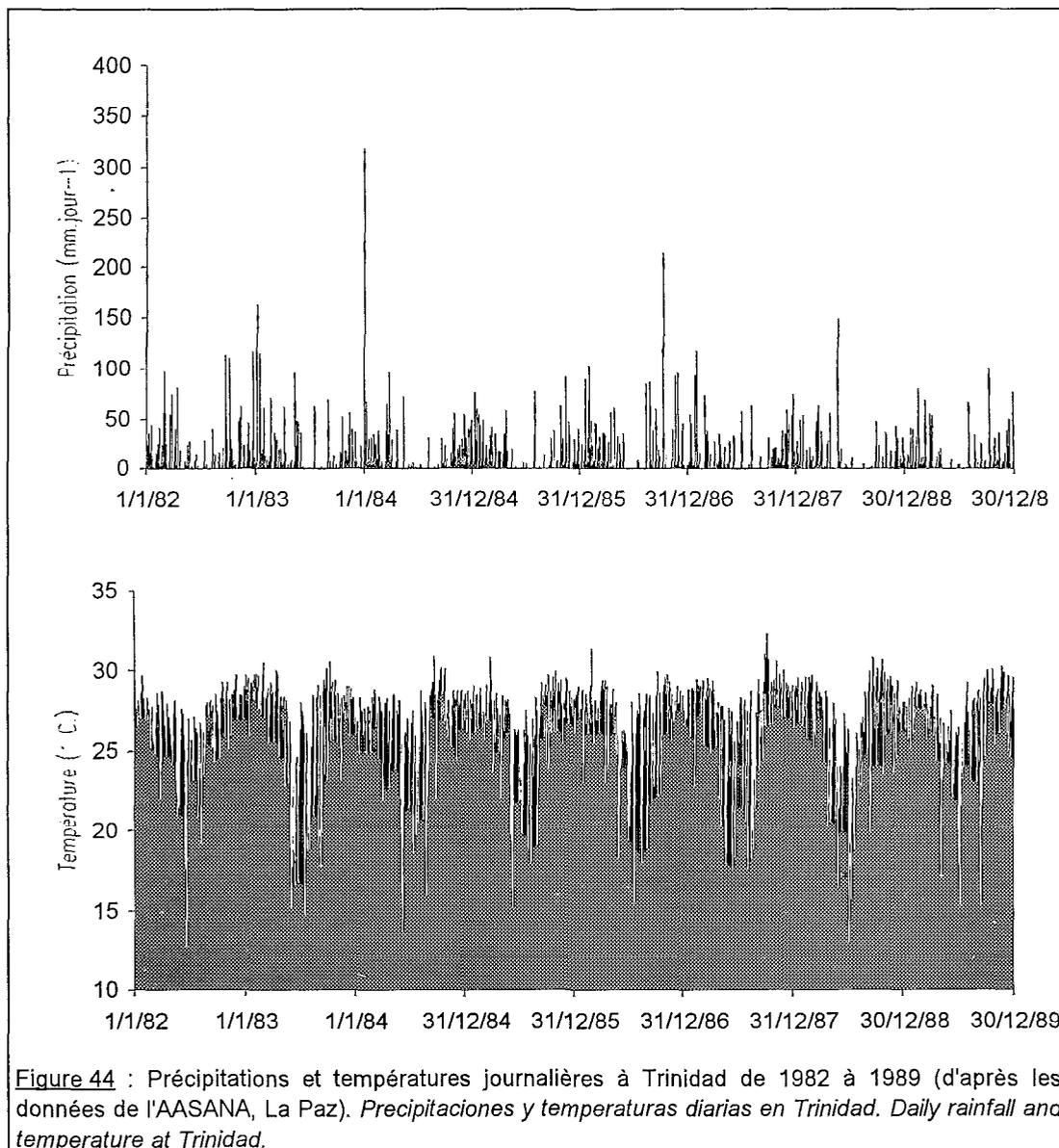


Figure 44 : Précipitations et températures journalières à Trinidad de 1982 à 1989 (d'après les données de l'AASANA, La Paz). *Precipitaciones y temperaturas diarias en Trinidad. Daily rainfall and temperature at Trinidad.*

3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

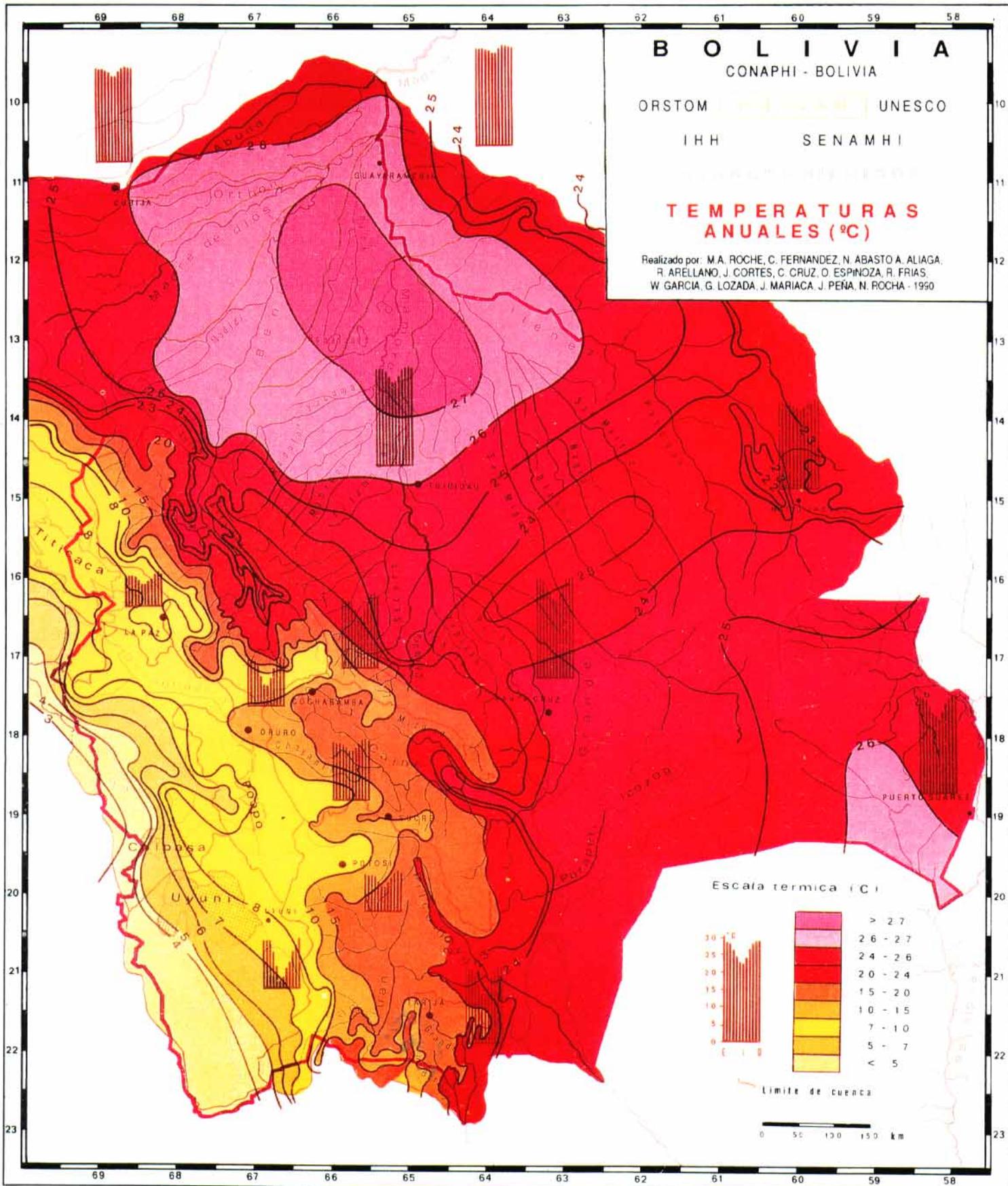


Figure 42 : Carte des températures moyennes annuelles (d'après Roche & al., 1990).  
Mapa de las temperaturas medias anuales. Mean annual temperature map.

### III.G.4. L'évapotranspiration et le ruissellement.

L'évapotranspiration a été évaluée par deux méthodes : le bilan hydrologique (différence entre précipitation et débit), et l'utilisation de formules intégrant des paramètres climatologiques (formules de Thornthwaite et Turc pour la terre ferme, formule de Penman pour l'eau libre).

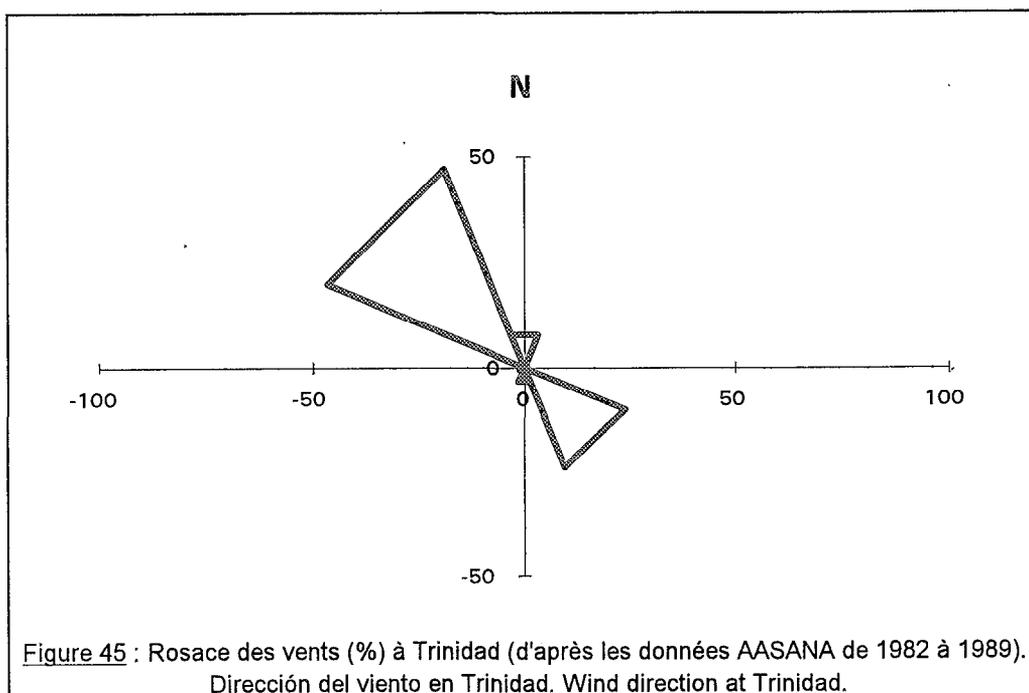
Les résultats obtenus indiquent que les valeurs interannuelles varient de 610 mm, dans le bassin du Rio Grande où le déficit en eau est élevé, à 1520 mm.an<sup>-1</sup> dans le bassin du Rio Orthon. La partie andine du bassin du Rio Béni est affectée d'une valeur d'évapotranspiration de 780 mm.an<sup>-1</sup>. L'évaluation de 1220 mm.an<sup>-1</sup>, faite pour les bassins orientaux très arrosés, accroît la valeur moyenne d'évapotranspiration sur les Andes boliviennes du bassin du Rio Madeira où elle est estimée à 800 mm.an<sup>-1</sup>. En plaine, cette valeur varie de 1075 à 1520 mm.an<sup>-1</sup> et tend à croître du Sud au Nord (Roche & al., 1991, 1992). Cette plus forte valeur est similaire à celle évaluée pour la forêt amazonienne en Guyane (Roche, 1982).

A partir des résultats obtenus sur les précipitations et l'évapotranspiration, il est aisé de déterminer le coefficient de ruissellement sur l'ensemble du bassin. Ce coefficient de ruissellement est maximum sur le versant amazonien de la cordillère orientale (Bassins orientaux des Andes : Alto-Madre de Dios, Alto-Béni, Chaparé) où il dépasse fréquemment les 50% (Espinoza, 1985; Garcia, 1985). Dans les Llanos, le coefficient de ruissellement varie de 10 et 40% (Abasto, 1987; Cruz, 1987), et c'est sur l'Altiplano (Lozada, 1985; Marriaca, 1985) et le bassin du Rio Pilcomayo (Arellano, 1988; Frias, 1989) qu'il est minimum (de 0 à 20%).

Au Brésil, les résultats obtenus sur les bassins des rios Madeira et Purus (Mortatti & al., 1987; Molinier & al., 1991), et des rios Acre et Abuna (Teixeira & al., 1990), montrent un coefficient d'écoulement de l'ordre de 30 à 40%.

### III.G.5. Le vent dans les Llanos.

La plaine amazonienne est constamment balayée par des vents, parfois violents, dont la fréquence à Trinidad (Station AASANA de l'aéroport) est de 9 jours sur 10, avec une vitesse moyenne de l'ordre de 3 m.s<sup>-1</sup>. Les vents dominants viennent du Nord-Ouest et du Sud-Est (Figure 45).



3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

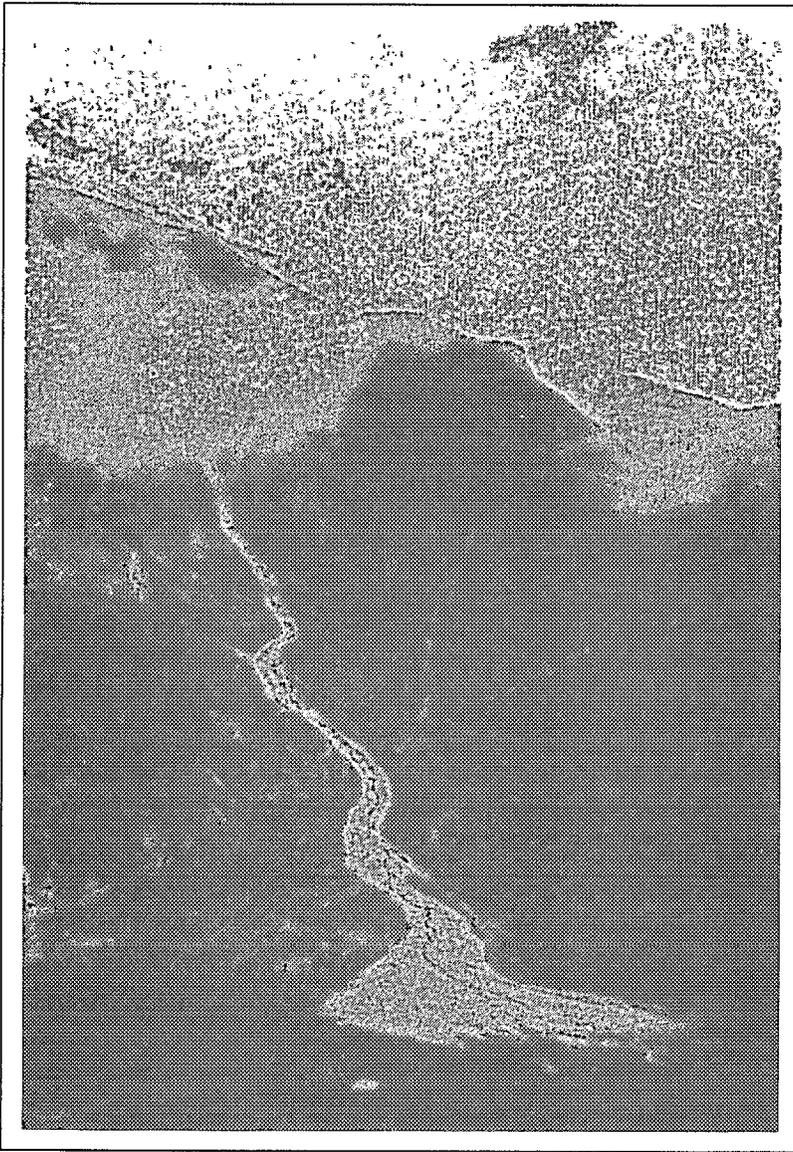
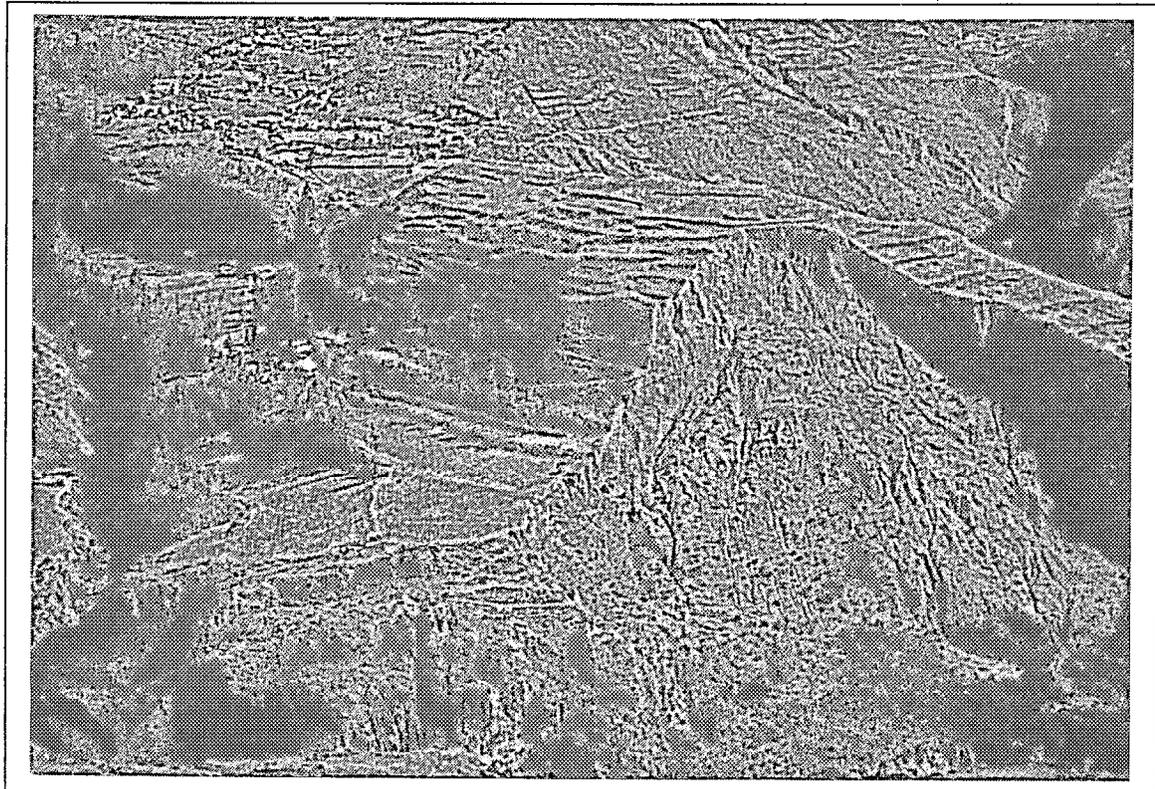


Photo 14 : Coulée de débris dans la vallée du Rio Zongo (3500 m).  
*Derrumbe en el valle del Río Zongo.*  
*Debris avalanche in the Zongo river valley.*

Photo 15 : Glissement de terrain dans la vallée du Rio Consata (2500 m).  
*Derrumbe en el valle del Río Consata.*  
*Debris slide in the Consata river valley.*



### III.H. L'HYDROLOGIE.

Avant le démarrage du programme PHICAB en Bolivie, les connaissances sur l'hydrologie du Haut-Madeira étaient très réduites, et ne concernaient que quelques sites potentiels de barrage, le plus souvent dans les Andes (Kleeberg, 1979, 1986; ENDE, 1980, 1985; GTZ, 1985; Asociación Misicuni, 1987). Depuis 1985, les nombreuses publications du PHICAB exploitant les données des réseaux du PHICAB en plaine et du SENAMHI dans les Andes, ont permis de connaître avec précision les volumes écoulés, ainsi que le régime des grands fleuves de l'Amazonie bolivienne (Abasto & al., 1985; Espinoza, 1985; Garcia, 1985; Bourges, 1986, 1987, 1988, 1989; Roche, 1986; Roche & Fernandez, 1986, 1988; Roche & al., 1986, 1991; Abasto, 1987; Bourges & al., 1987, 1990, 1992; Chavez, 1987; Cruz, 1987; Fernandez & al., 1987; Benavidez, 1988; Carvajal, 1988; Guyot & al., 1988, 1989, 1990, 1991; Carrasco, 1990; Bourges & Hoorelbecke, 1992).

Les données utilisées dans ce chapitre (Tableau X) proviennent du SENAMHI (La Paz), de ENDE (Cochabamba), du SEARPI (Santa Cruz) pour les stations andines, et du travail inédit de J. Bourges concernant les stations du réseau PHICAB. Certaines données hydrologiques du bassin du Rio Guaporé proviennent du DNAEE (Brasilia).

#### III.H.1. Les modules et les débits spécifiques.

Dans les Andes, les débits spécifiques (Tableau X) varient de 5 à 125 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>, suivant la pluviométrie des bassins. Les valeurs les plus faibles sont observées en zone montagneuse aride comme cela est le cas dans les bassins des rios La Paz et Grande et de leurs tributaires (Piray, Caine, Chayanta, Mizque et Azero). Les valeurs les plus fortes apparaissent dans les bassins orientaux de la cordillère orientale des Andes (Alto-Madre de Dios, Yungas et Chaparé) où les maximums sont enregistrés sur le haut-bassin du Rio Chaparé, à l'amont de Villa Tunari.

Dans les Llanos, la valeur du débit spécifique oscille entre 20 et 40 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> pour les fleuves d'origine andine, et entre 5 et 10 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> pour les cours d'eau issus du bouclier brésilien. Le Rio Orthon, le seul fleuve typique des Llanos présente un débit spécifique de 14 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>.

Dans les bassins périphériques, des débits spécifiques inférieurs à 5 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> ont été mesurés sur l'Altiplano (Guyot & al., 1990), ainsi que sur le bassin du Rio Pilcomayo. Des valeurs de l'ordre de 20 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> ont été observées dans la région de Tarija sur les bassins de certains formateurs du Rio Bermejo (Guyot & al., 1990).

La distribution des débits spécifiques en fonction de l'altitude de la station (Figure 46) montre une très grande dispersion des valeurs, surtout à basse altitude. Cette répartition rappelle celle obtenue avec les précipitations moyennes annuelles (Figure 35). Les débits spécifiques des petits bassins sont très variables, alors que les grands bassins présentent des valeurs voisines, proche de 20 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> (Figure 46).

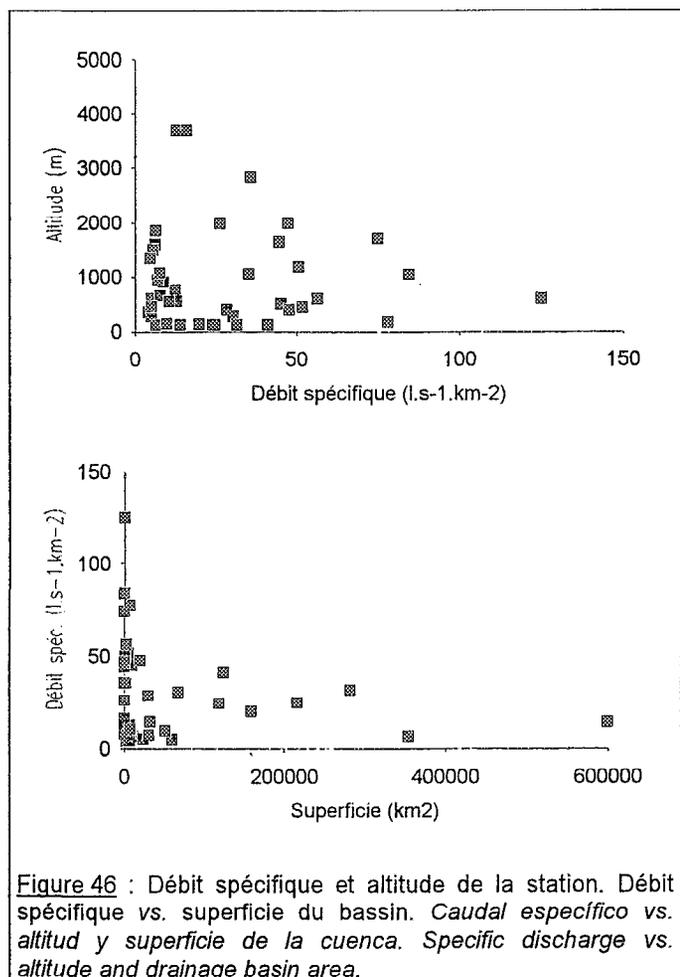
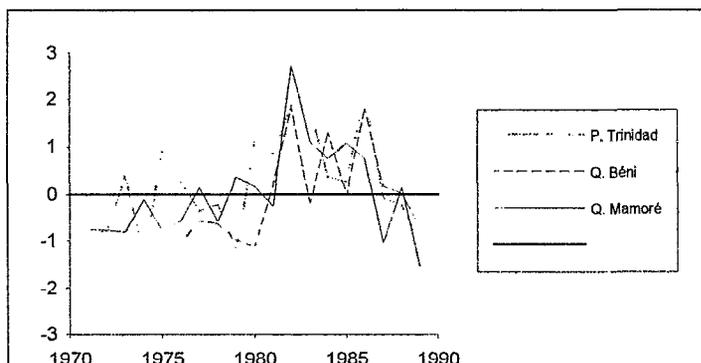


Figure 46 : Débit spécifique et altitude de la station. Débit spécifique vs. superficie du bassin. Caudal específico vs. altitud y superficie de la cuenca. Specific discharge vs. altitude and drainage basin area.

### 3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

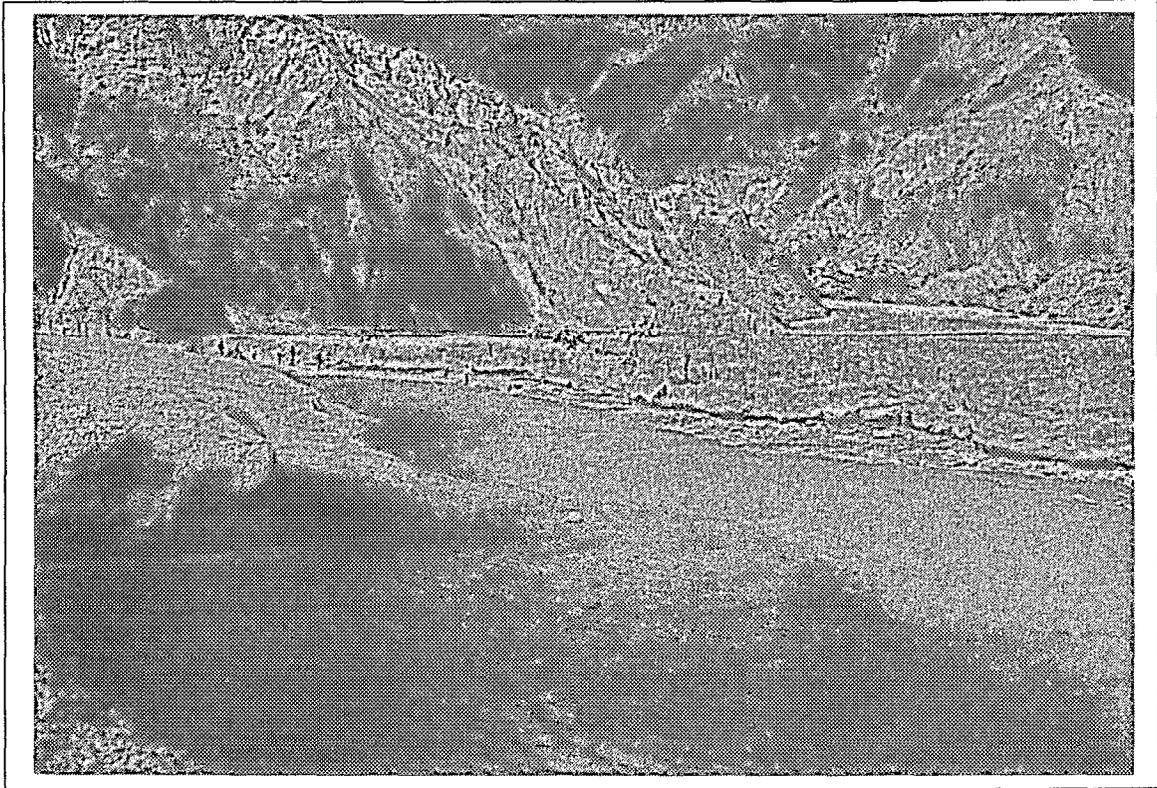
**Tableau X : Caractéristiques des stations hydrométriques utilisées**  
 [Pér.= période d'observation, Org.= Organisme gestionnaire, Q=Débit moyen annuel, qs=débit spécifique,  
 CV= Coefficient de variation des débits moyens mensuels au cours de l'année,  
 JFM= Poids des mois de Janvier-Février-Mars sur le volume annuel écoulé].  
*Características de las estaciones hidrométricas. Gauge stations characteristics.*

Rio	Station	Sup. (km <sup>2</sup> )	Alt. (m)	Pér.	Org.	Références	Q (m <sup>3</sup> /s)	qs (l/s.km <sup>2</sup> )	CV	JFM (%)
Mapiiri	Angosto Quercano	9400	500	74-83	Senamhi	Carrasco, 1990	425	45	0.61	48
Coroico	Santa Rita de B. Aires	4700	440	74-83	Senamhi	Carrasco, 1990	243	52	0.70	52
Kaka	Nube	20240	400	74-83	Senamhi	Carrasco, 1990	965	48	0.69	51
Unduavi	Sirupaya	270	1640	79-83	Senamhi	Carrasco, 1990	12	44	0.86	58
Tamampaya	Puente Villa	950	1185	74-83	Senamhi	Carrasco, 1990	48	51	0.79	56
Tamampaya	Villa Barrientos	1900	1050	74-83	Senamhi	Carrasco, 1990	67	35	0.77	55
Miguillas	Vertedero Carabuco	140	2830	72-73	Ende		5	36	0.59	46
Miguillas	Humapalca	360	1980	72-77	Ende		17	47	0.72	52
La Paz	Cajetillas	6500	760	74-83	Senamhi	Carrasco, 1990	81	12	0.85	58
Misicuni	Angosto Sivingani	350	3700	68-82	Ende	As.Misicuni, 1987	5	13	1.25	74
Alto Béni	Angosto Inicua	29900	400	74-83	Senamhi	Carrasco, 1990	852	28	0.81	57
Béni	Angosto del Bala	67500	280	83-89	Phicab	Bourges, inédit	2050	30	0.69	52
Béni	Portachuelo	119000	130	83-89	Phicab	Bourges, inédit	2870	24	0.66	48
Madre de Dios	Miraflores	124200	130	83-89	Phicab	Bourges, inédit	5090	41	0.59	45
Orthon	Caracoles	32300	125	83-89	Phicab	Bourges, inédit	460	14	0.51	36
Béni	Cachuela Esperanza	282500	120	83-89	Phicab	Bourges, inédit	8920	32	0.64	46
Vinto	Vinto	50	3700	72-82	Ende		1	16	0.70	51
Santa Isabel	Locotaí	200	1700	71-75	Ende		15	75	0.64	49
Paracti	San Pedro	320	1040	72-73	Ende		27	84	0.71	49
Juntas Corani	Icona	2300	600	72-73	Ende		130	57	0.78	53
Esperitu Santos	Palmar Pampa	160	600	71-78	Ende		20	125	0.76	52
Ivirizu	Sehuencas	420	1980	75-79	Ende		11	26	0.60	49
Ichilo	Puerto Villarroi	7600	170	83-89	Phicab	Bourges, inédit	593	78	0.47	42
Bermejo	Bermejo	460	900	77-83	Searpi		4	9	0.71	46
Piray	Angostura	1420	650	76-85	Searpi	Guyot & al., 1989	11	8	0.65	46
Piray	Taruma	1590	600	76-83	Searpi		8	5	0.85	58
Elvira	Elvira	64	650	77-83	Searpi		1	8	0.86	52
Espejos	Espejos	203	550	77-83	Searpi	Guyot & al., 1989	3	13	0.58	42
Piray	La Belgica	2880	350	77-82	Searpi	Guyot & al., 1989	12	4	0.85	52
Piray	Puente Eisenhower	4160	280	77-82	Searpi		21	5	0.79	52
Caine	Angosto Molineros	9200	1850	71-74	Senamhi		59	6	1.52	79
Chayanta	Huayrapata	11200	1600	76-82	Senamhi	Guyot & al., 1989	70	6	0.93	58
Grande	Puente Arce	23700	1500	69-74	Senamhi		130	5	1.24	72
Grande	Puesto Nava	31200	950	71-74	Senamhi		220	7	1.24	71
Mizque	Puente Taperas	6970	1350	71-75	Senamhi		32	5	1.17	69
Azero	Puente Azero	4360	1080	75-82	Senamhi	Guyot & al., 1989	32	8	0.94	58
Grande	Abapo	59800	450	83-89	Phicab	Bourges, inédit	300	5	0.92	53
Parapeti	San Antonio	7500	550	76-83	Senamhi	Guyot & al., 1989	79	11	0.94	59
Guaporé	Pimenteirás	51600	150	83-87	Dnaee		496	10	0.53	38
Mamoré	Puerto Ganadero	159100	140	83-89	Phicab	Bourges, inédit	3150	20	0.63	45
Mamoré	Puerto Siles	216200	130	83-89	Phicab	Bourges, inédit	5350	25	0.63	40
Itenez	Vuelta Grande	354300	130	83-89	Phicab	Bourges, inédit	2260	6	0.67	34
Mamoré	Guayaramerin	599400	120	83-89	Phicab	Bourges, inédit	8340	14	0.64	35

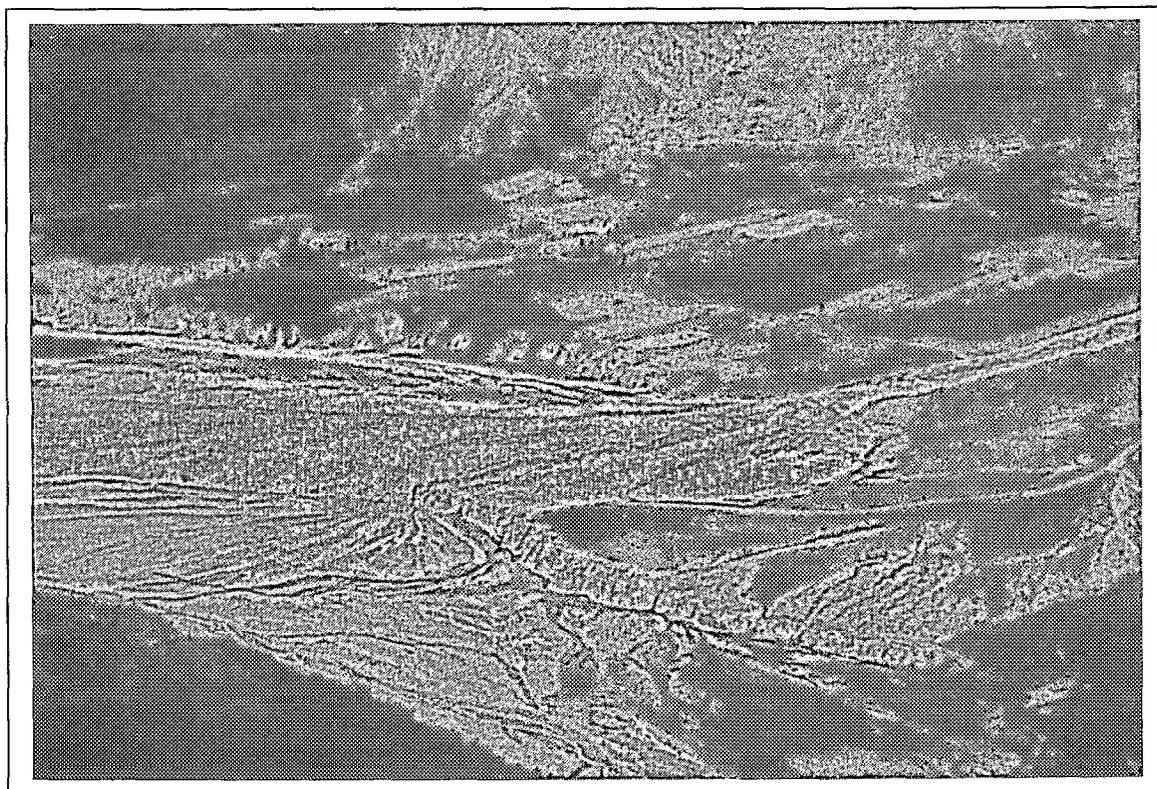


**Figure 48 :** Evolution (variables centrées réduites) de la pluie annuelle à Trinidad, et des débits moyens annuels des rios Béni (Cachuela Esperanza) et Mamoré (Guayaramerin), pour la période 1970-1990. *Evolución de las precipitaciones mensuales en Trinidad, y de los caudales mensuales de los rios Beni y Mamoré. Evolution of annual rainfall at Trinidad and annual discharge of the Beni and Mamore rivers.*

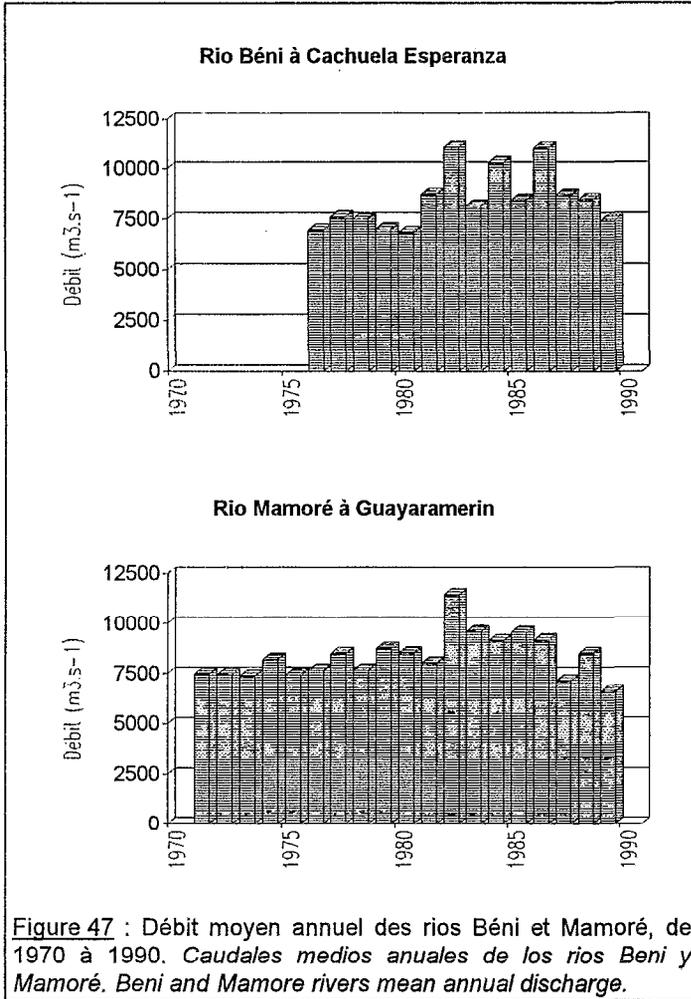
L'utilisation de chroniques de débit plus anciennes (Bourges, 1987; Bourges & al., 1987) complétées par celles du PHICAB, permet de suivre les fluctuations interannuelles des modules des deux principaux formateurs du Rio Madeira (Figure 47). Le rapport des modules extrêmes observés sur 10 ans (Rodier, 1964), qui est respectivement de 1.6 et 1.7 pour les rios Béni et Mamoré, indique une variabilité interannuelle assez réduite, malgré l'événement climatique majeur "El Niño", qui entraîne une surabondance des débits observés en 1982 aux deux stations.



↑  
Photo 16 et 17 : Coulées de boue dans la vallée du Rio La Paz (2500 m).  
Mazamorra en el valle del Río La Paz. Debris flows in the La Paz river valley.  
↓



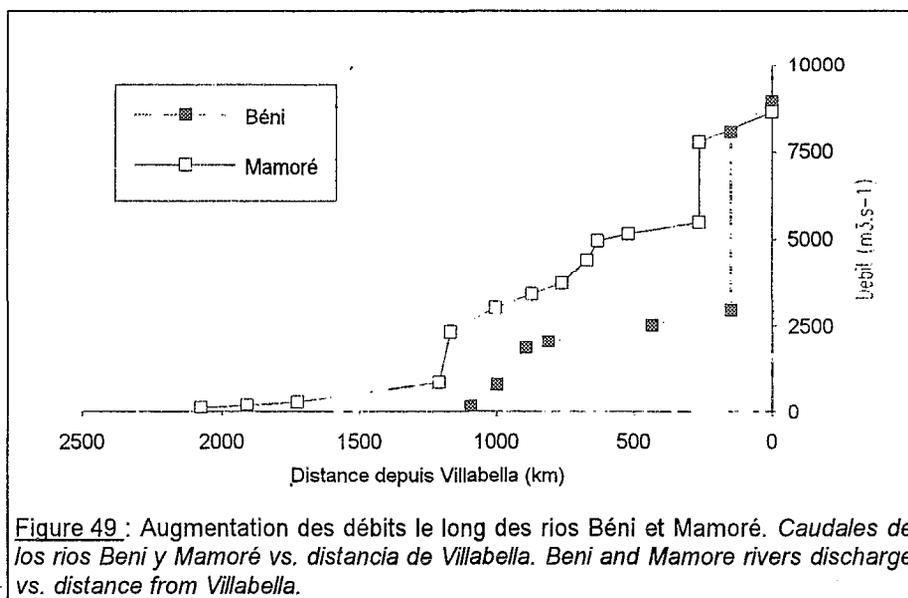
3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

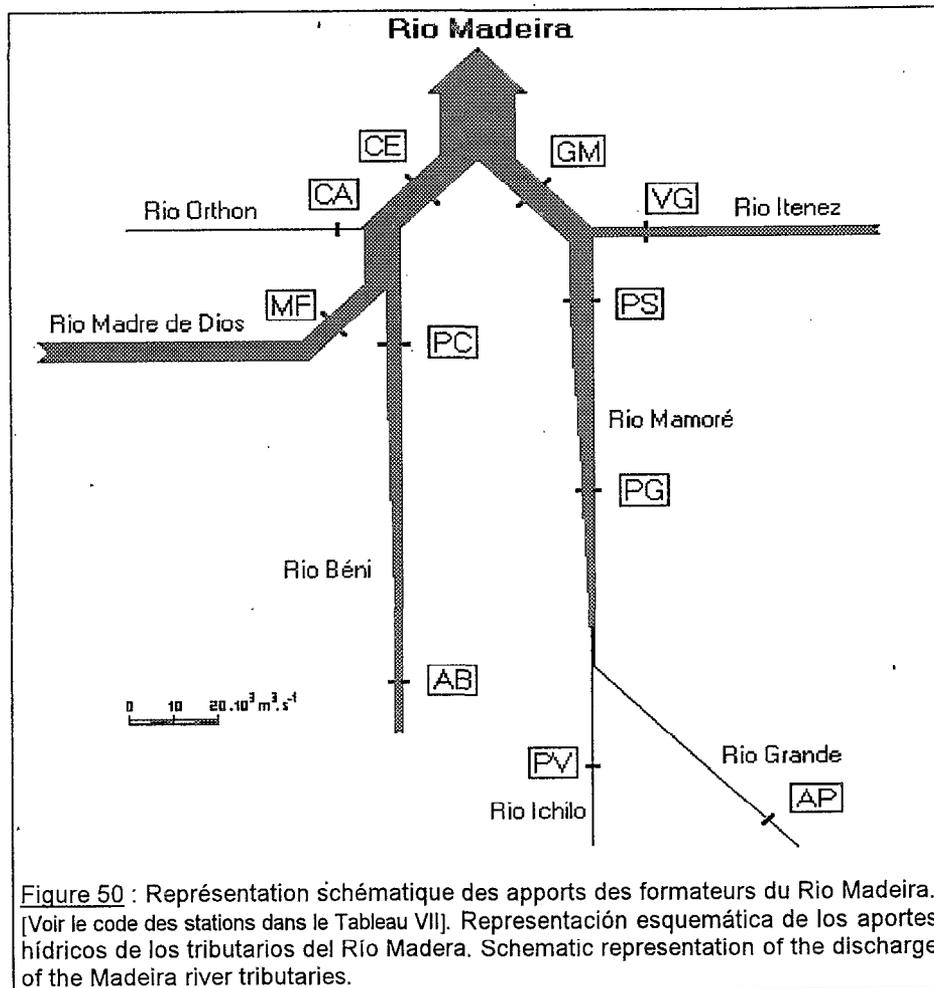


En utilisant les variables centrées réduites  $[(X_i - \text{moyenne}) / \text{écart type}]$  de la pluie à Trinidad, et des débits des rios Béni et Mamoré (Figure 48), le phénomène climatique El Niño de 1982 apparaît nettement et génère des anomalies positives sur les trois variables. Le Niño de 1986 entraîne à nouveau une augmentation des pluies à Trinidad, ainsi qu'une surabondance des débits du Rio Béni, mais n'affecte pas le Rio Mamoré.

Les courbes de l'augmentation des débits le long des rios Béni et Mamoré (Figure 49), sont à rapprocher de celles des superficies drainées (Figure 29). Pour le Rio Béni, les apports sont essentiellement andins, la traversée des Llanos n'apporte que peu de débit supplémentaire, mis à part le Rio Madre de Dios qui va quasiment tripler les apports. Pour le Rio Mamoré, le Rio Grande reçoit d'abord les apports du Rio Mamorecillo (Rio Ichilo et Rio Chaparé), puis progressivement les débits augmentent dans les Llanos avec les nombreux tributaires de rive gauche (Figure 50). Enfin, avec les apports du Rio Itenez-Guaporé, le Rio Mamoré atteint un débit du même ordre

que celui du Rio Béni. Le Rio Madeira à Villabella reçoit de ses formateurs un débit moyen annuel de l'ordre de  $17000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ce qui le place parmi les 10 plus importants fleuves du monde (Tableau II).



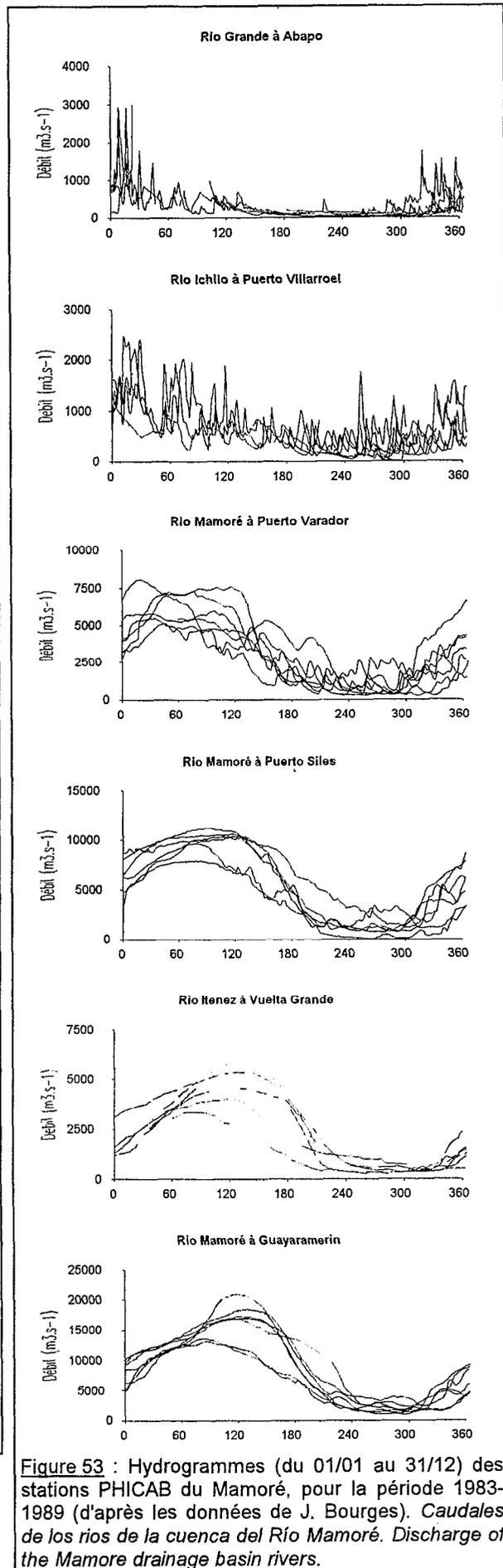
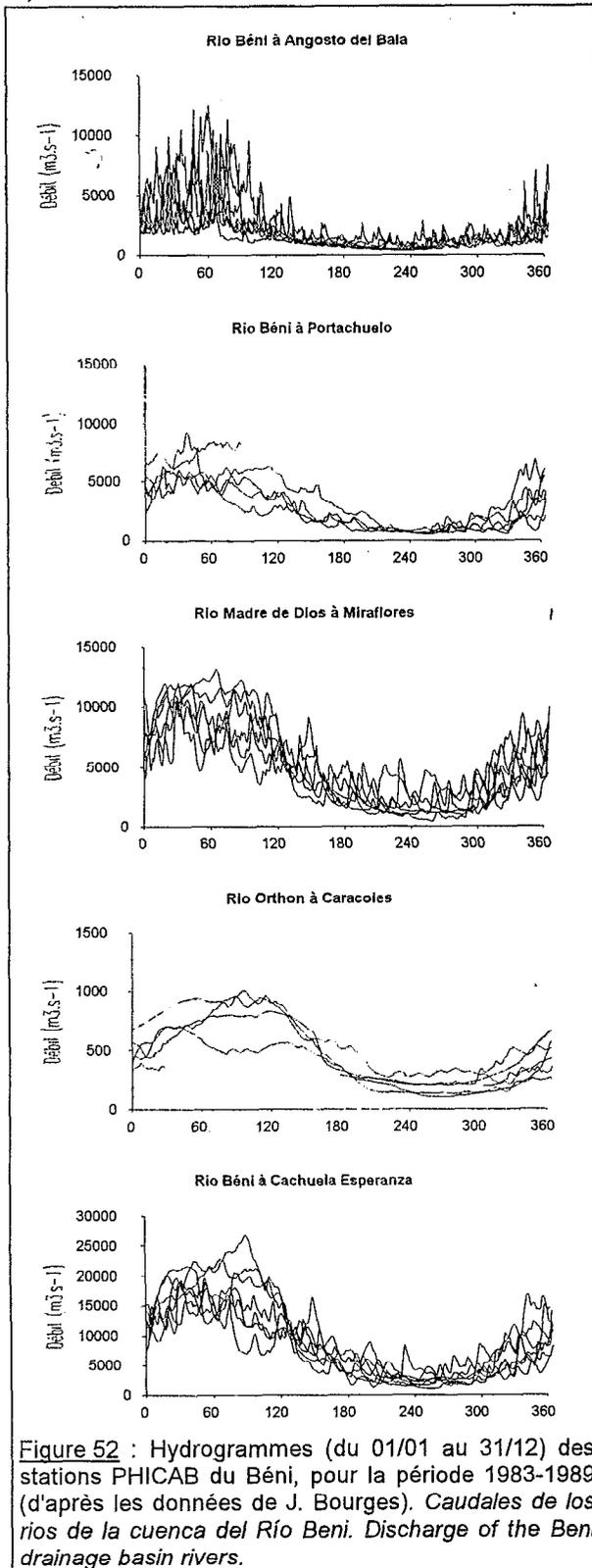


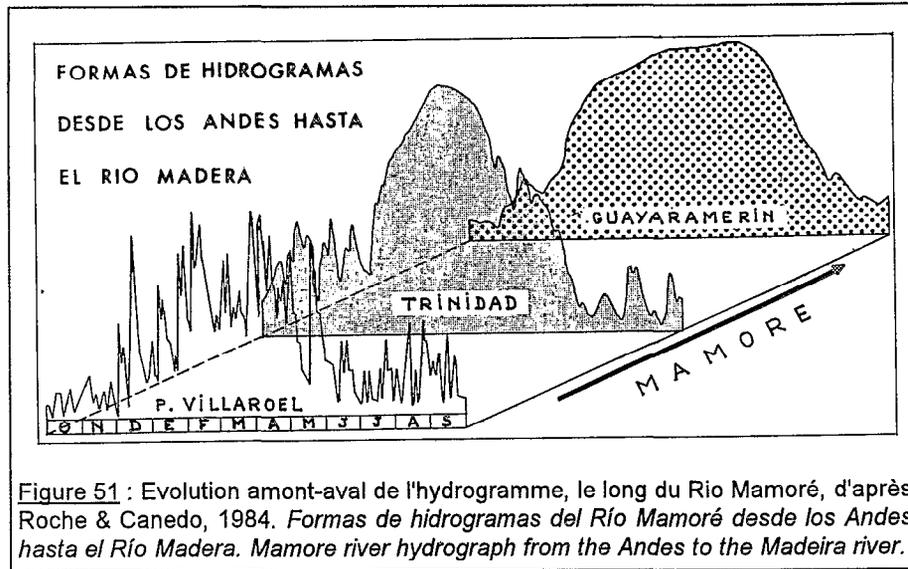
### III.H.2. Les régimes hydrologiques.

Le régime hydrologique observé sur l'ensemble des cours d'eau du bassin du Rio Madeira à Villabella est de type pluvial tropical austral, caractérisé par l'alternance brutale entre sécheresse de saison froide et surabondance des pluies en saison chaude (Pardé, 1968). Aux basses latitudes chaudes et humides, en l'absence de saisons thermiques, même à haute altitude, les précipitations constituent donc le facteur essentiel à prendre en compte en hydrologie fluviale. Néanmoins du fait des températures élevées toute l'année, l'évapotranspiration intervient de façon permanente (Riou, 1975) et elle joue un rôle non négligeable, bien qu'elle n'exprime que pour une faible part les fluctuations des débits (Frécaut & Pagny, 1983). Le stockage par la neige et les glaciers n'est appréciable que dans les hautes montagnes subtropicales où les hivers sont froids, mais l'incidence des restitutions sur les fluctuations du débit sont faibles, car elles ont lieu en même temps que le maximum pluviométrique d'été (Loup, 1974), et que les surfaces concernées sont extrêmement réduites : moins de 0.09% de la superficie du bassin (Camacho & al., 1984).

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, précédée ou suivie de petites crues bien différenciées (Figure 51). La crue annuelle apparaît ainsi de moins en moins dentelée de l'amont vers l'aval des grands fleuves (Figures 52 & 53). Elle est davantage régularisée et aplatie sur le Rio Mamoré et le Rio Itenez en raison de trajets plus longs et surtout de l'extension de vastes zones d'inondation sur ces deux bassins. Ceci explique également un retard des crues du Rio Mamoré et du Rio Itenez par rapport à celles du Rio Béni et du Rio Madre de Dios, lequel peut représenter un décalage de deux mois (Roche & Fernandez, 1988).

3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.





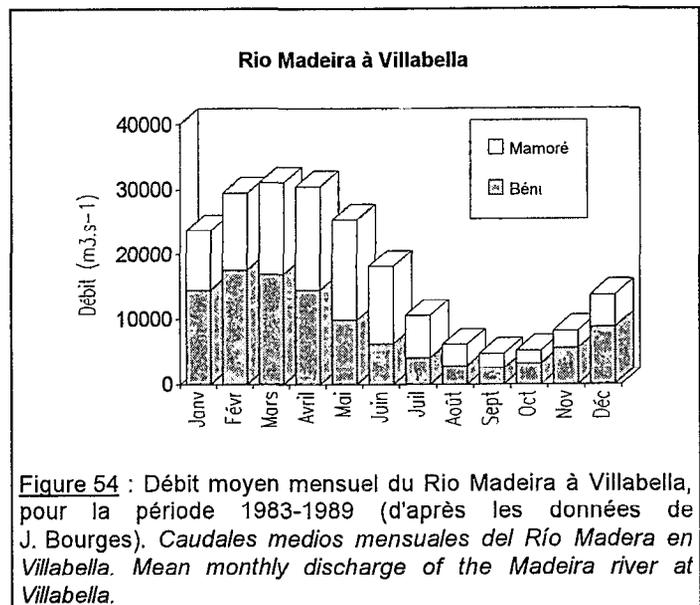
Les hydrogrammes des cours d'eau issus du bouclier brésilien (Rio Guaporé) ou exclusivement des Llanos (Rio Orthon) sont beaucoup plus réguliers que les cours d'eau andins, et les coefficients de variation (écart type/moyenne) des débits moyens mensuels (Tableau X) sont les plus faibles avec des valeurs de l'ordre de 0.5. Parmi les cours d'eau andins, le Rio Ichilo se caractérise par un coefficient de variation très bas, traduisant l'absence de véritable saison sèche au cours du cycle hydrologique, dans cette région hyper-humide qu'est le Chaparé où les précipitations dépassent fréquemment les  $3000 \text{ mm.an}^{-1}$ . Contrairement au Rio Mamoré, le Rio Béni ainsi que le Rio Madre de Dios, conservent un caractère andin marqué après la traversée des Llanos.

L'hydrogramme du Rio Madeira à Villabella sera donc une combinaison des hydrogrammes des rios Béni et Mamoré (Figure 54), avec une période de hautes eaux de Janvier à Mai, et une période de basses eaux de Juillet à Novembre.

Le régime hydrologique des cours d'eau andins du bassin amazonien de Bolivie, est quasiment identique au régime des précipitations (Figure 40). Ainsi, les trois mois de plus hautes eaux (de Janvier à Mars) sont généralement responsables de la moitié du volume annuel écoulé (Tableau X). En plaine amazonienne, ce pourcentage diminue sous le double effet de l'amortissement de l'hydrogramme vers l'aval, et du décalage dans le temps du maximum de crue.

Le poids des trois mois de hautes eaux dans les Andes (Janvier, Février et Mars) sur l'écoulement annuel semble augmenter avec l'altitude (Figure 55), tout comme le poids du mois de Janvier sur les précipitations annuelles (Figure 36).

Si les valeurs maximales de ce rapport sont bien observées pour des bassins où le ruissellement est très faible (Tableau X), il ne semble cependant pas exister de relation simple entre le débit spécifique et le poids des trois mois de hautes eaux (JFM) sur le volume annuel écoulé (Figure 55).



3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.

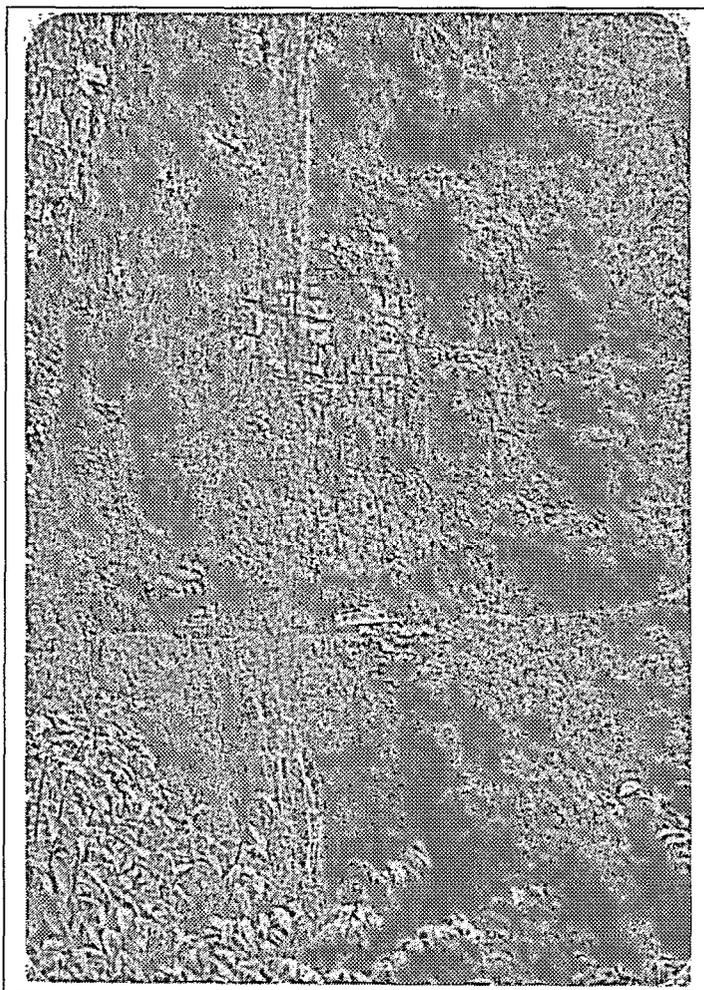
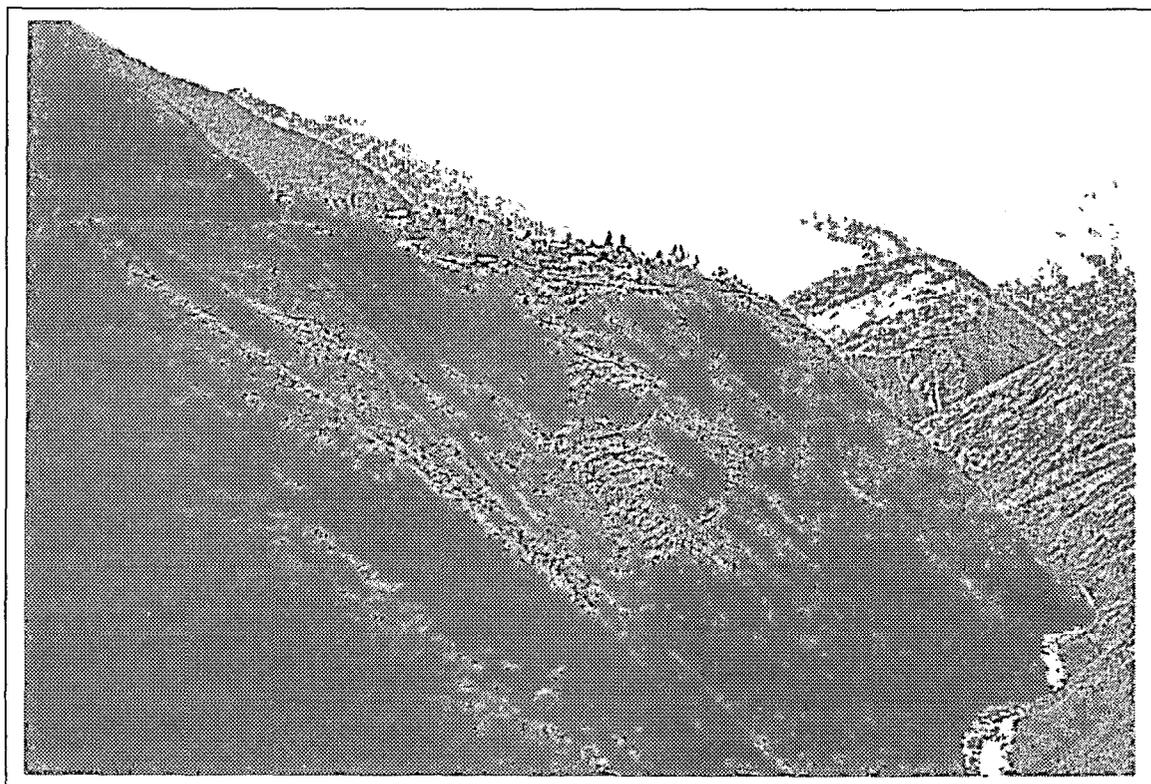
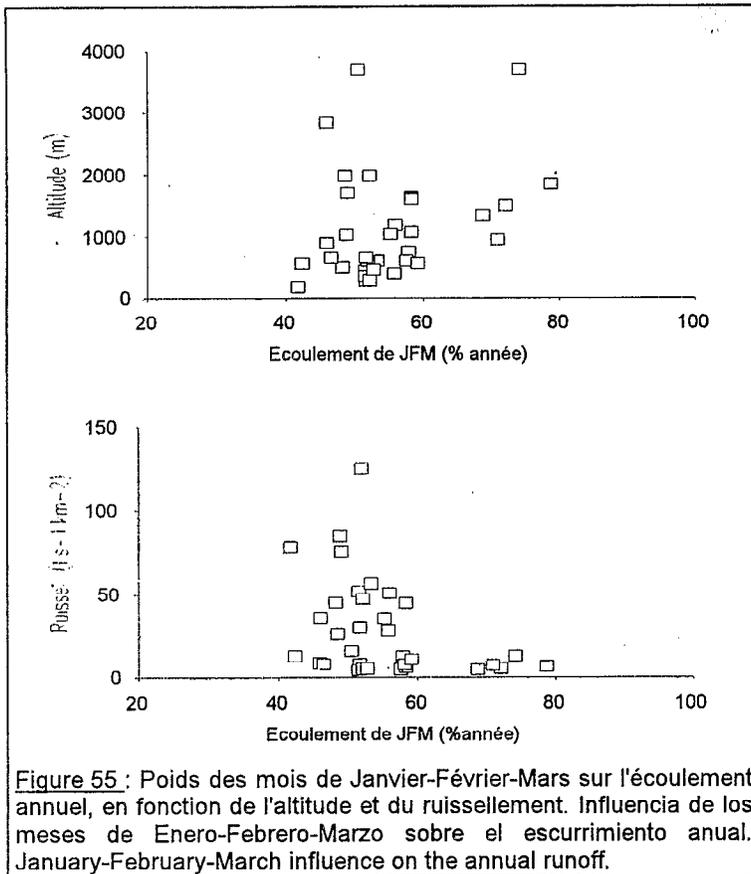


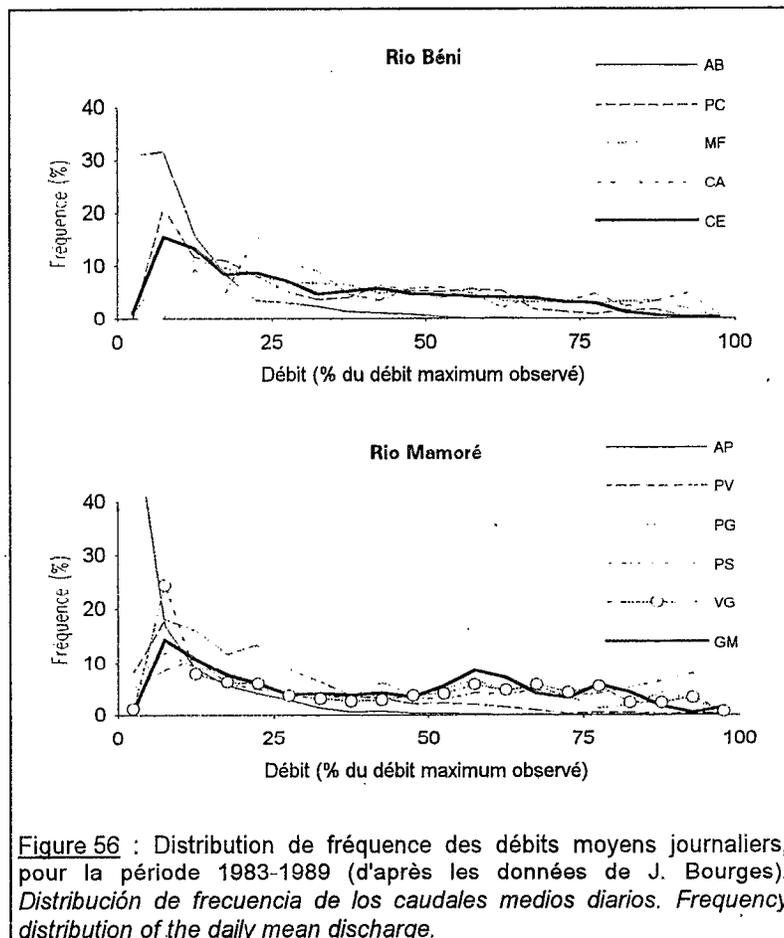
Photo 18 : La piste des Yungas dans la vallée du Rio Coroico (2500 m). *La Pista de los Yungas en el valle del Río Coroico. the Yungas trail in the Coroico river valley.*

Photo 19 : La vallée du Rio Taquesi (Yungas) au pied du village de Yanacachi (2000 m). *El valle del Río Taquesi en Yanacachi. The Taquesi river valley at Yanacachi.*

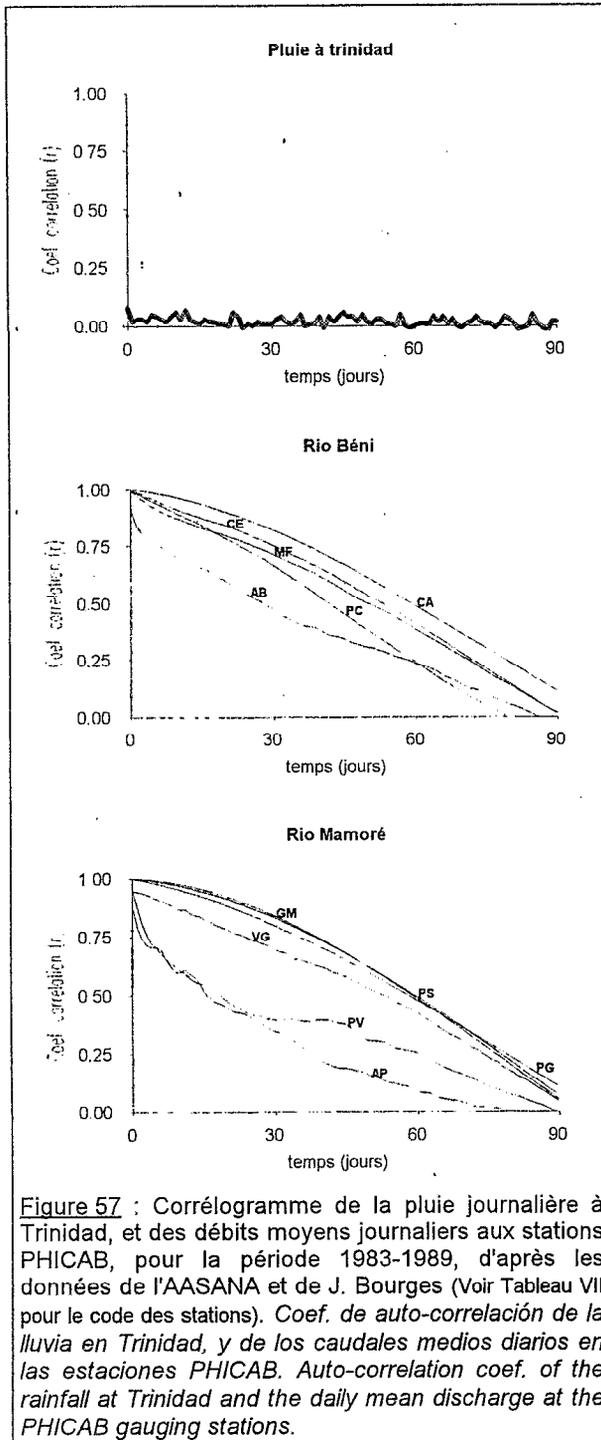




L'étude des distribution de fréquence des débits moyens journaliers permet d'apprécier la régularité du régime hydrologique. Les diagrammes de fréquence relative obtenus pour les stations du réseau PHICAB (Figure 56) présentent pour les trois stations andines (AB, PV, AP) des distributions unimodales normales à dissymétrie positive. Les stations de la plaine amazonienne sont caractérisées par des distributions hyponormales, souvent plurimodales, et présentant généralement une dissymétrie positive. La présence d'un second mode marqué sur le Rio Mamoré est probablement lié à la vidange des zones d'inondation.



3. Le bassin du Rio Madeira à Villabella.



Le corrélogramme est également un outil puissant pour l'évaluation de la régularité du régime hydrologique et la comparaison de différents systèmes (Mangin, 1981, 1984). Les résultats obtenus (Tableau XI et Figure 57) montre que la pluie journalière à Trinidad est totalement indépendante des précipitations survenant les jours précédents. L'intercorrélation des débits moyens journaliers successifs est nettement plus faible pour les cours d'eau andins (AB, PV, AP) que pour les fleuves des Llanos.

Les débits moyens journaliers, observés avec un pas de temps décadaire, présentent pour toutes les stations un bon coefficient de corrélation. Par contre, un décalage d'un mois entraîne sur les stations andines des coefficients faibles, traduisant un hydrogramme irrégulier. Il n'existe pas de liaison significative entre débits moyens journaliers espacés d'un peu plus d'un mois pour les stations andines, et de deux mois pour les stations des Llanos. La valeur relativement plus faible observée sur le Rio Itenez, est sans doute liée à de nombreuses lacunes d'observation. La pluie journalière à Trinidad ne présente aucune liaison significative d'un jour sur l'autre.

Tableau XI : Coefficient de corrélation de la pluie journalière à Trinidad, et des débits moyens journaliers aux stations PHICAB, période 1983-1989, pour différents pas de temps. [dts= seuil de validité au delà duquel le coefficient de corrélation n'est pas significativement différent de zéro]. (Voir Tableau VII pour le code des stations). Coef. de correlación de la lluvia diaria en Trinidad, y de los caudales medios diarios en la estaciones PHICAB. Auto-correlation coef. of the daily rainfall at Trinidad, and the daily mean discharge at the PHICAB gauging stations.

	dt=1j.	dt=3j.	dt=5j.	dt=10j.	dt=15j.	dt=30j.	dt=60j.	dt=90j.	dts (jours)
P_trini	0.08	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01	-0.01	0.02	1
Q_AB	0.92	0.82	0.78	0.71	0.66	0.49	0.24	0.00	51
Q_PC	0.99	0.97	0.95	0.90	0.85	0.68	0.25	0.00	56
Q_MF	0.99	0.96	0.93	0.88	0.84	0.72	0.40	0.03	64
Q_CA	1.00	1.00	0.99	0.97	0.94	0.83	0.50	0.12	64
Q_CE	1.00	0.98	0.96	0.92	0.88	0.76	0.42	0.02	66
Q_AP	0.88	0.74	0.71	0.60	0.55	0.35	0.10	0.00	37
Q_PV	0.95	0.81	0.72	0.62	0.55	0.40	0.26	0.00	48
Q_PG	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.80	0.49	0.12	69
Q_PS	1.00	1.00	0.99	0.97	0.95	0.84	0.50	0.08	68
Q_VG	0.95	0.94	0.92	0.88	0.84	0.71	0.43	0.06	51
Q_GM	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.85	0.50	0.07	69

# La recherche d'une méthode.

### RÉSUMÉ :

Le quatrième chapitre expose la méthodologie adoptée pour les prélèvements et les analyses, mais aussi l'estimation de la représentativité de l'échantillon et le mode de calcul des flux transportés.

L'utilisation de données anciennes, souvent inédites, sur le transport de matières dissoutes et particulaires de quelques cours d'eau andins, a permis d'évaluer la très forte variabilité temporelle des teneurs. Aussi, un protocole d'échantillonnage a été spécialement mis au point aux stations du réseau PHICAB en plaine amazonienne, sur la base d'un pas de temps journalier et décadaire. L'exploration de la distribution des teneurs dans la section de mesure a permis de connaître la représentativité des échantillons prélevés. Parallèlement au suivi en continu des stations du PHICAB, des campagnes ponctuelles d'échantillonnage ont été organisées à différentes époques hydrologiques, sur environ 400 cours d'eau du bassin versant.

### SOMMAIRE :

V.A. L'échantillonnage .....	p. 90
IV.A.1. Variabilité temporelle .....	p. 90
IV.A.2. Variabilité spatiale dans la section de jaugeage .....	p. 96
IV.A.3. Choix d'un protocole d'échantillonnage .....	p. 102
IV.B. Les analyses .....	p. 105
IV.B.1. Au laboratoire du SENAMHI (El Alto, La Paz) .....	p. 105
IV.B.2. Au laboratoire de l'IIQ-UMSA (Cotacota, La Paz) .....	p. 106
IV.B.3. Au laboratoire X-RAL (Toronto) .....	p. 106
IV.B.4. Au laboratoire de l'IGBA (Bordeaux) .....	p. 107
IV.B.5. Au laboratoire du CEMAGREF (Lyon) .....	p. 107
IV.C. La banque de données .....	p. 107
IV.D. Le calcul des flux .....	p. 107
IV.D.1. Détermination des teneurs globales .....	p. 107
IV.D.2. Mode de calcul des flux de matières .....	p. 108

#### IV.A. L'ECHANTILLONNAGE.

La nécessité de mettre en place un échantillonnage aux stations du réseau PHICAB en plaine amazonienne est à l'origine d'une réflexion sur la variabilité temporelle (saisonnière et interannuelle) et spatiale (dans la section de jaugeage) des teneurs en matières dissoutes et particulaires.

En Bolivie, les données antérieures obtenues sur quelques bassins andins (Rios Pilcomayo et Piray) ont été utilisées afin de trouver certains éléments de réponse concernant le choix d'un pas de temps d'échantillonnage approprié à la variabilité saisonnière. D'autre part, des mesures exploratoires de concentrations en matières dissoutes et en matières en suspension dans la section de jaugeage ont été effectuées sur toutes les stations du réseau PHICAB durant un cycle hydrologique (1986-1987), et au cours d'une crue de fréquence annuelle sur le Rio Béni à Rurrenabaque (Mars 1988).

##### IV.A.1. Variabilité temporelle.

L'étude de la variabilité temporelle des teneurs au cours du cycle hydrologique a été réalisée sur deux bassins andins pour lesquels il existait une longue chronique de données journalières de matières en suspension (Rio Piray) ou un échantillonnage régulier (tous les 2 ou 3 jours) concernant les matières dissoutes et particulaires (Rio Pilcomayo).

Tableau XII : Caractéristiques des bassins andins des rios Piray et Pilcomayo, (d'après Guyot & al., 1989, 1990). *Caracteristicas de las cuencas andinas de los rios Piray e Pilcomayo. Andean drainage basin characteristics of the Piray and Pilcomayo rivers.*

Rio	Piray	Pilcomayo
Station	Angostura	Villamontes
Superficie (km <sup>2</sup> )	1420	81300
Altitude (m)	650	340
<b>Organisme</b>	SEARPI	SENAMHI
Période	1976-1985	1977-1982
Débit moyen (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	11	260
<b>Matières en suspension</b>		
Nombre d'échantillons	3027	745
Concentration (mg.l <sup>-1</sup> )	1400	6240
Flux (t.an <sup>-1</sup> )	2900000	72300000
<b>Matière dissoute</b>		
Nombre d'échantillons		672
Concentration (mg.l <sup>-1</sup> )		650
Flux (t.an <sup>-1</sup> )		2900000

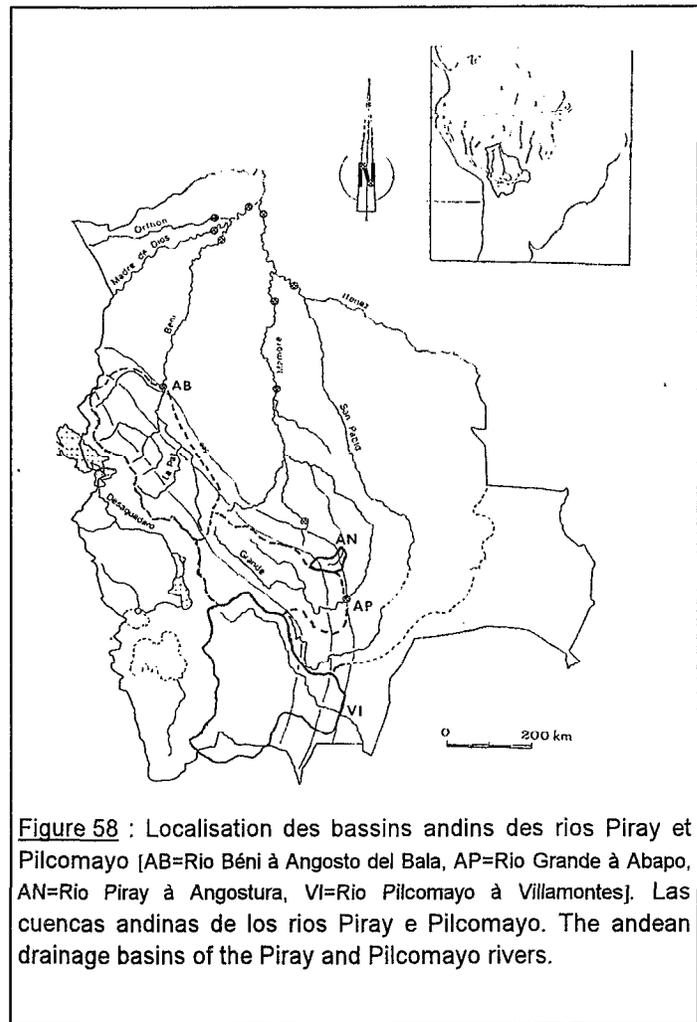
Le Rio Piray, affluent du Rio Grande, formateur du Rio Mamoré, appartient au bassin amazonien. Ce cours d'eau draine un petit bassin versant montagneux situé près de la ville de Santa Cruz de la Sierra. La pluviométrie moyenne du bassin est estimée à 1300 mm.an<sup>-1</sup>. Le Rio Pilcomayo est un tributaire andin du Rio Paraguay, formateur du Rio de La Plata, qui draine un bassin montagneux en zone semi-aride. Les précipitations moyennes annuelles sont estimées à 600 mm. Ces deux bassins vont servir de références pour la détermination du pas de temps d'échantillonnage à développer pour le réseau PHICAB en Amazonie bolivienne (Figure 58 et Tableau XII).

##### IV.A.1.a. Variabilité saisonnière.

L'évolution saisonnière des débits du Rio Pilcomayo et du Rio Piray (Figures 59 et 60) montre une forte variabilité, surtout dans le cas du petit bassin andin du Rio Piray où des crues surviennent également lors de la saison sèche comme cela est le cas sur le Rio Ichilo à Puerto Villarroel (Figure 53). La crue annuelle de type tropical (de janvier à mars) n'est observée que sur le Rio

Pilcomayo qui draine un bassin plus étendu. L'hydrogramme de ce cours d'eau est comparable à celui du Rio Béni à Angosto del Bala (Figure 52).

La répartition au cours de l'année des teneurs en matières en suspension est comparable à celle des débits, pour les deux rivières concernées (Figures 59 et 60). Le graphique du débit solide (Débit \* MES) montre que l'exportation des MES s'effectue sous forme de "bouffées", crues brèves avec de fortes teneurs dans le cas du petit bassin du Rio Piray, alors que l'exportation du Rio Pilcomayo, bien qu'affectée d'une très forte variabilité, semble suivre l'évolution saisonnière de hautes eaux et basses eaux. Dans le bassin du Rio Piray, des crues exceptionnelles de quelques jours peuvent produire jusqu'à 80% de l'exportation annuelle de matières particulaires (Molina, 1986). Les matières dissoutes, étudiées uniquement sur le Rio Pilcomayo, présentent des variations de plus faible amplitude, avec une évolution inverse à celle des débits, les minimums de concentration correspondant aux maximums de crue (Figure 60). Par contre en fin de saison sèche, lors des premières crues, des variations de plus grande amplitude sont observées et c'est au cours de cette période que s'enregistrent les maximums de concentration de matière dissoute. Du fait d'une variabilité des teneurs plus faible que celle observée pour les MES, les flux exportés de matière dissoute présentent un régime comparable au régime hydrologique. Pour connaître le degré de liaison pour différents pas de temps, entre les données successives de débit et de matières dissoutes et particulaires, l'analyse corrélatrice (Mangin, 1981, 1984) a été utilisée (Figure 61 et Tableau XIII).



**Tableau XIII** : Coefficients de corrélation du débit (Q), des matières en suspension (MES), du débit solide (QS), des matières dissoutes (MD) et du débit dissous (QD), des rios Pilcomayo à Villamontes et Piray à Angostura, pour différents pas de temps (dt). *Coef. de auto-correlación del caudal (Q), de las materias en suspensión (MES), en solución (MD), y de los flujos de sedimentos (QS), y de materias disueltas (QD). Auto-correlation coef. of the discharge (Q), TSS (MES), TDS (MD), sediment yield (QS), and dissolved yield (QD).*

	dt=1j.	dt=3j.	dt=5j.	dt=10j.	dt=15j.	dt=30j.	dt=60j.	dt=90j.
Q_Pilcomayo	0.87	0.77	0.71	0.57	0.40	0.01	-0.33	-0.15
Q_Piray	0.46	0.21	0.19	0.19	0.17	0.14	0.14	0.01
MES_Pilcomayo	0.52	0.45	0.38	0.34	0.22	0.03	-0.20	-0.11
MES_Piray	0.25	0.09	0.09	0.16	0.12	0.06	0.04	-0.01
QS_Pilcomayo	0.68	0.49	0.40	0.33	0.18	-0.05	-0.16	-0.01
QS_Piray	0.09	0.01	0.04	0.06	0.07	0.01	0.09	-0.01
MD_Pilcomayo	0.88	0.81	0.76	0.64	0.52	0.08	-0.33	-0.17
QD_Pilcomayo	0.79	0.66	0.58	0.42	0.26	0.00	-0.25	-0.09

4. La recherche d'une méthode.

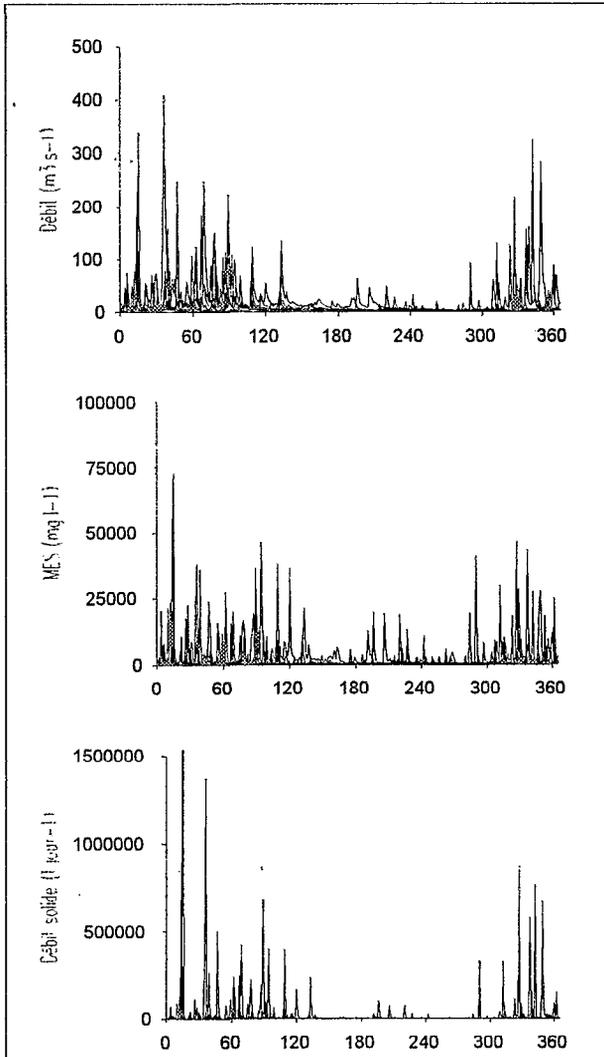


Figure 59 : Débit, matières en suspension et débit solide du Rio Piray à Angostura (du 01/01 au 31/12) pour la période 1976-1985 (d'après les données du SEARPI). Caudal, concentración y flujo de materias en suspensión del Río Piray en Angostura. Discharge, TSS load and yield of the Piray river at Angostura.

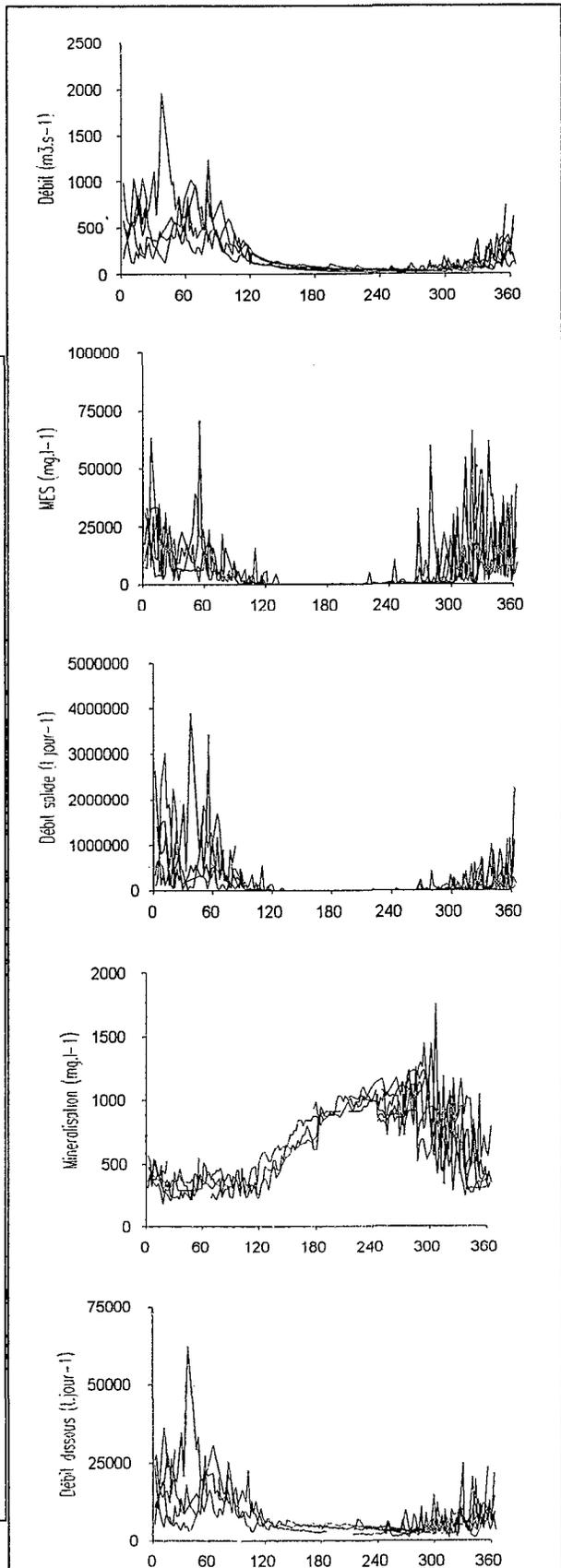
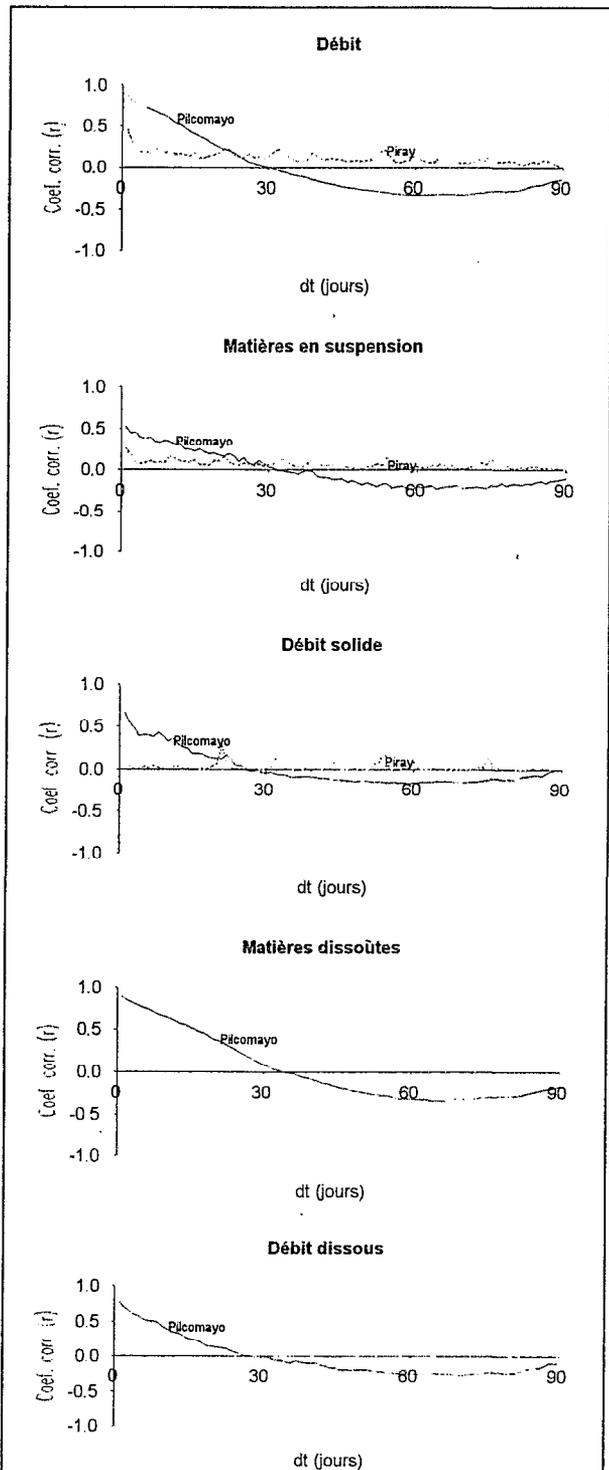


Figure 60 : Débit, matières en suspension, débit solide, matières dissoutes et débit dissous du Rio Pilcomayo à Villamontes (du 01/01 au 31/12) pour la période 1977-1982 (d'après les données du SENAMHI). Caudal, concentración y flujo de materias en suspensión y en solución del Río Pilcomayo en Villamontes. Discharge, TSS load and yield, TDS load and yield of the Pilcomayo river at Villamontes.

Les résultats de l'analyse corrélatrice confirment les observations directes des figures 59 et 60. Dans le cas du Rio Piray, la relation entre débits successifs, même avec un pas de temps de 1 jour, reste faible ( $r < 0.50$ ), et il n'existe aucune relation entre les matières en suspension observées d'un jour à un autre. Dans le cas du Rio Pilcomayo, la corrélation reste bonne pour les débits et les matières dissoutes, pour des pas de temps ne dépassant pas la semaine. Par contre, les matières particulaires et le débit solide présentent de mauvais coefficients de corrélation pour un pas de temps de quelques jours seulement.

Les flux de matières dissoutes et particulaires exportés par ces deux cours d'eau ont été calculés en sélectionnant les données de jours fixes du mois, avec des pas de temps variables (Tableau XIV). Les écarts observés atteignent 150% dans le cas du débit solide pour le Rio Piray, et 50% pour le Rio Pilcomayo, avec un prélèvement tous les 15 jours. Pour ce même délai, l'écart observé pour le débit dissous est de 25% environ.



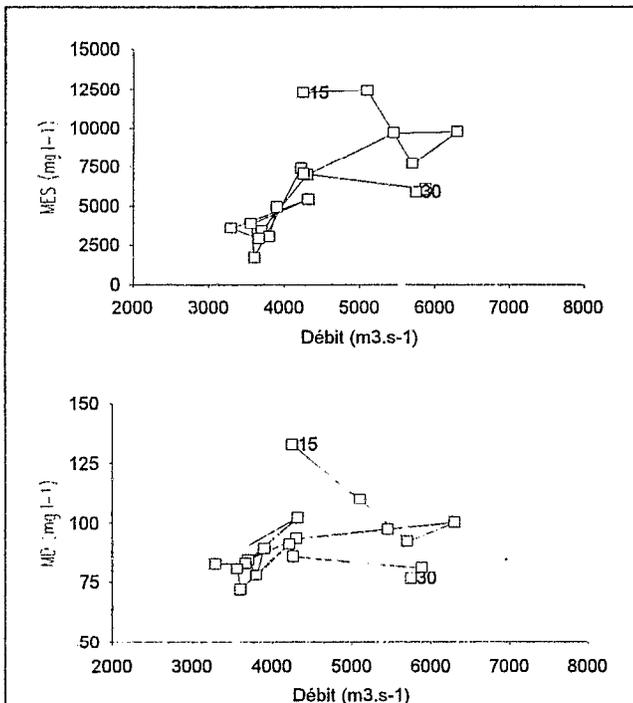
**Figure 61** : Corrélogrammes des débits moyens journaliers, des matières en suspension, du débit solide, des matières dissoutes et du débit dissous des rios Pilcomayo à Villamontes (1977-1982) et Piray à Angostura (1976-1985), d'après les données du SENAMHI et du SEARPI. *Coef. de auto-correlación de los caudales medios diarios, de las concentraciones y los flujos de materias en suspensión y en solución de los rios Piray e Pilcomayo. Auto-correlation coef. of the daily mean discharge, TSS and TDS load and yield, of the Piray and Pilcomayo rivers.*

#### 4. La recherche d'une méthode.

**Tableau XIV :** Ecarts (%) du débit solide et du débit dissous des rios Pilcomayo à Villamontes et Piray à Angostura, en fonction du pas de temps d'échantillonnage (dt). *Variación de los flujos de materias en suspensión y en solución vs. frecuencia de muestreo. TSS and TDS yield variations vs. sampling frequency.*

	Totalité	dt=2j.	dt=3j.	dt=5j.	dt=7j.	dt=10j.	dt=15j.
QS_Piray	0	2	19	60	38	34	157
QS_Pilcomayo	0	4	5	13	8	23	59
QD_Pilcomayo	0	1	2	6	1	9	24

#### IV.A.1.b. Variabilité au cours d'une crue.



**Figure 62 :** Evolution des matières particulaires et dissoutes au cours d'une crue, Rio Béni à Rurrenabaque, du 15 au 30 Mars 1988. *Materias en suspensión y en solución vs. caudal durante una crecida del Río Beni en Rurrenabaque. TSS and TDS load vs. discharge during a flood of the Beni river at Rurrenabaque.*

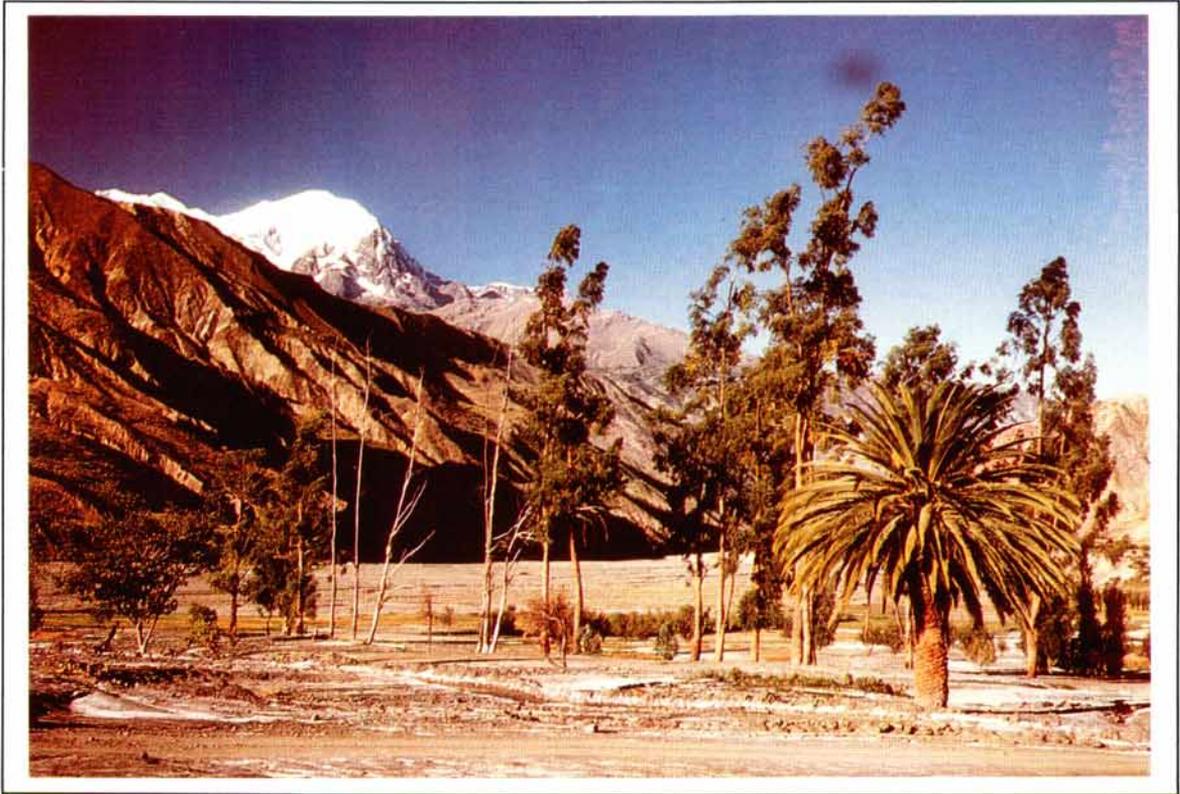
Un suivi journalier, quelquefois bijournalier, a été réalisé sur le Rio Béni à la sortie des Andes en période de hautes eaux. Pour des raisons de commodité d'accès, les mesures ont été effectuées à Rurrenabaque et non à la station du PHICAB de Angosto del Bala, située une vingtaine de kilomètres plus à l'amont. Une crue de fréquence annuelle a été observée durant la période de mesures, du 15 au 30 Mars 1988.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en matières dissoutes et particulaires peuvent varier brutalement d'un jour à l'autre (Figure 62), et sans relation évidente avec le débit (Guyot & al., 1990). Au cours des 15 jours du suivi, la concentration en matières en suspension a varié (Amplitude/Moyenne) de 180% et celle des matières dissoutes de 70%.

En conséquence, l'échantillonnage sur le réseau PHICAB devra être programmé avec un pas de temps journalier, pour l'estimation des flux de matières particulaires, tout au moins pour les trois stations qui contrôlent des bassins andins dont la superficie est comprise entre celle du Rio Piray et celle du Rio Pilcomayo (Rio Béni à Angosto del Bala, Rio Ichilo à Puerto Villarroel et Rio Grande à Abapo). Un échantillonnage à pas de temps hebdomadaire pourrait être suffisant pour l'estimation des flux de matières dissoutes.

#### IV.A.1.c. Variabilité interannuelle.

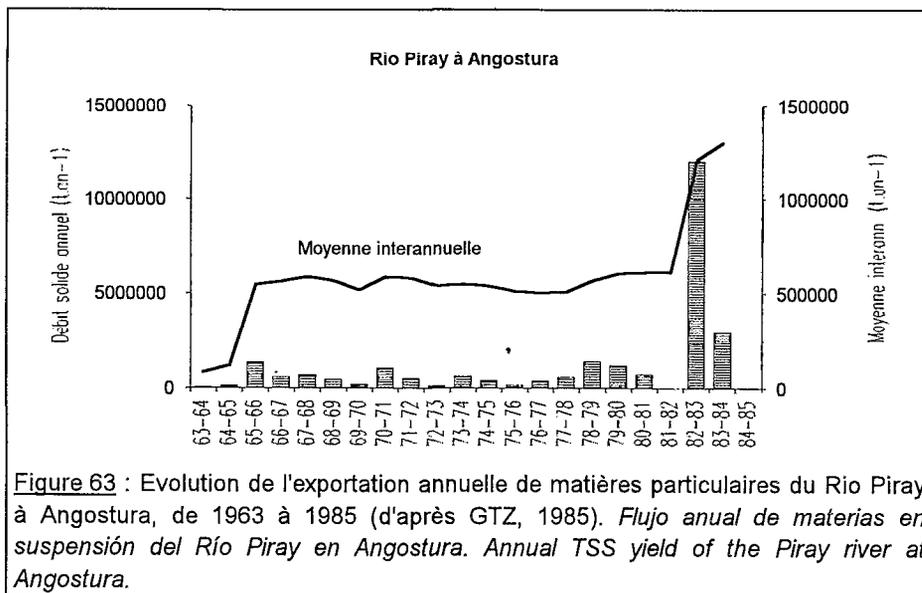
A la variabilité temporelle saisonnière, il faut ajouter une variabilité interannuelle qui affecte profondément les moyennes interannuelles, notamment dans ces régions où les changements climatiques associés à des phénomènes de type "El Niño" sont fréquemment observés (Figure 48). Ainsi, en Mars 1983, une crue exceptionnelle du Rio Piray a provoqué une inondation catastrophique dans la région de Santa Cruz, causant la mort de 250 personnes, 50000 sans-abri et des dégâts estimés à près de 50 millions de dollars U.S. (Brockmann, 1986). Le débit solide exporté durant cette année exceptionnelle (GTZ, 1985) correspond à 20 fois la moyenne interannuelle des flux exportés au cours des 18 années précédentes (Figure 63). A partir de 1983, la valeur de la moyenne interannuelle est doublée.



↑ Photo 20 : Le Rio La Paz à Palca (2400 m) au pied de L'Illimani. [Noter les dépôts salins dans les alluvions].  
*El Río La Paz en Palca, al pie del Illimani. The La Paz river at Palca, at the foot of the Illimani.*

↓ Photo 21 : Le Rio Khatu près de Quime (2800 m).  
*El Río Khatu cerca de Quime. The Khatu river near Quime.*





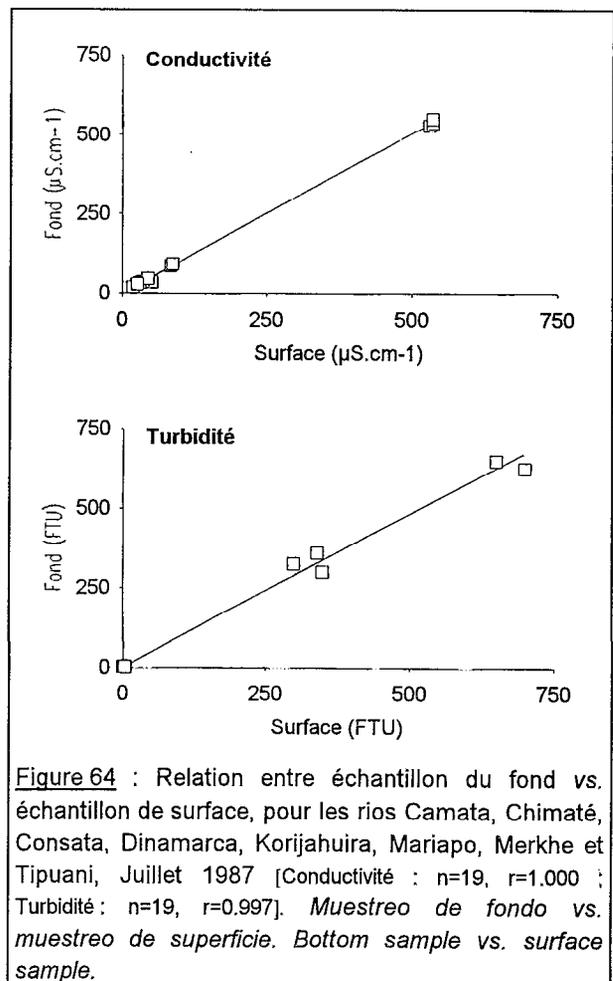
Cette extrême variabilité interannuelle des flux de matières en suspension exportés montre la nécessité d'un suivi à long terme, portant sur des périodes d'au moins 10 ans, surtout en ce qui concerne les petits bassins de zone montagneuse.

#### IV.A.2. Variabilité spatiale dans la section de jaugeage.

De nombreuses études, dont celles réalisées par l'ORSTOM en Afrique, ont montré que les concentrations en matières en suspension se distribuent dans la section de jaugeage de façon non uniforme, avec généralement une augmentation des teneurs en profondeur (Roche, 1963; Colombani, 1967; Billon, 1968; Nouvelot, 1972; Carre, 1972; Curtis & al., 1979; Meade & al., 1979; Molinier, 1979; Long Yuqian & al., 1981; Meade, 1985; Sundborg, 1986; Olivry & al., 1988; Guyot & al., 1989, 1991; Long Yuqian, 1989; Meade & Stevens, 1990). En Bolivie, pour déterminer cette dispersion des teneurs dans la section de mesure, des études ont été menées dans les Andes (bassin du Rio Kaka) ainsi que dans les Llanos (stations du réseau PHICAB) de 1986 à 1988.

##### IV.A.2.a. Dans les Andes.

En Juillet 1987, une campagne d'échantillonnage réalisée dans le secteur de Guanay (bassin du Rio Kaka, formateur du Rio Alto-Béni), a permis de connaître les teneurs en matières dissoutes et particulaires, au fond et en surface des rivières (Figure 64). En cette période de basses eaux, certains cours d'eau présentent des teneurs en matières en suspension non négligeables, du fait de



l'impact de l'exploitation aurifère qui est très intense dans cette région (Guyot & Hérail, 1989).

Les résultats obtenus montrent une excellente corrélation entre fond et surface, probablement en raison de la très forte turbulence de l'écoulement de ces rivières andines. Une expérience similaire réalisée dans le bassin du Rio Piray (Palenque, 1987) indique qu'en crue, la teneur moyenne des matières en suspension dans la section de mesure peut être deux fois plus élevée que la teneur de l'échantillon de surface. Cet écart s'explique par une granulométrie beaucoup plus grossière des matières en suspension du Rio Piray (essentiellement des sables).

#### IV.A.2.b. Au cours d'une crue à une station du piedmont andin.

Durant une crue de fréquence annuelle (Mars 1988), des mesures journalières de la distribution de la turbidité et de la conductivité sur une douzaine de verticales ont été effectuées sur le Rio Béni à Rurrenabaque (Guyot & al., 1990). Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un échantillonneur intégrateur (type USD-49), et donnent une valeur moyenne représentative de chaque verticale. La distribution de la conductivité, donc des matières dissoutes, est particulièrement homogène sur toute la largeur de la section de jaugeage (Figure 65) où le coefficient de variation (CV=écart type/moyenne) est toujours inférieur à 0.05 (Tableau XV). Les matières en suspension (exprimées par la turbidité) présentent des variations plus importantes, mais le coefficient de variation pour la section ne dépasse pas 0.15.

Tableau XV : Distribution de la turbidité et de la conductivité moyennes sur les 12 verticales, lors des jaugeages du Rio Béni à Rurrenabaque, du 16 au 30 Mars 1988.

*Turbidez y conductividad medias en la sección de aforo durante una crecida del Río Beni en Rurrenabaque.  
Mean turbidity and conductivity in the gauging section of the Beni river at Rurrenabaque, during a flood.*

Date	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Turb. Moy. (F.T.U.)	C.V.	Cond. Moy. (µS/cm)	C.V.
16/3/88 am	4630	4893	0.15	198	0.04
17/3/88 am	6060	3898	0.05	166	0.03
19/3/88 am	6420	4144	0.07	173	0.03
19/3/88 pm	5520	4917	0.09	187	0.02
21/3/88 am	3710	1988	0.10	148	0.02
21/3/88 pm	3760	2108	0.10	146	0.02
23/3/88 am	3950	1910	0.05	142	0.02
23/3/88 pm	3640	2100	0.04	147	0.03
24/3/88 pm	3290	2487	0.05	170	0.02
25/3/88 am	4690	1931	0.05	150	0.01
25/3/88 pm	4320	2604	0.04	155	0.02
26/3/88 am	3760	1948	0.09	142	0.02
26/3/88 pm	3520	2487	0.10	153	0.03
27/3/88 am	3710	1827	0.11	143	0.03
29/3/88 am	4220	4117	0.08	164	0.02
29/3/88 pm	4320	4038	0.08	164	0.02
30/3/88 am	5880	2645	0.08	137	0.04
	Moyenne	2944		158	
	C.V.	0.38		0.11	

Les coefficients de variation de la turbidité et de la conductivité au cours de l'épisode de crue, sont respectivement de 0.38 et 0.11. Ces valeurs correspondent à plus du double de celles obtenues dans la section de jaugeage. Ces résultats indiquent clairement que la variabilité temporelle au cours de la crue est plus importante que la variabilité spatiale dans la section à un moment donné.

#### 4. La recherche d'une méthode.

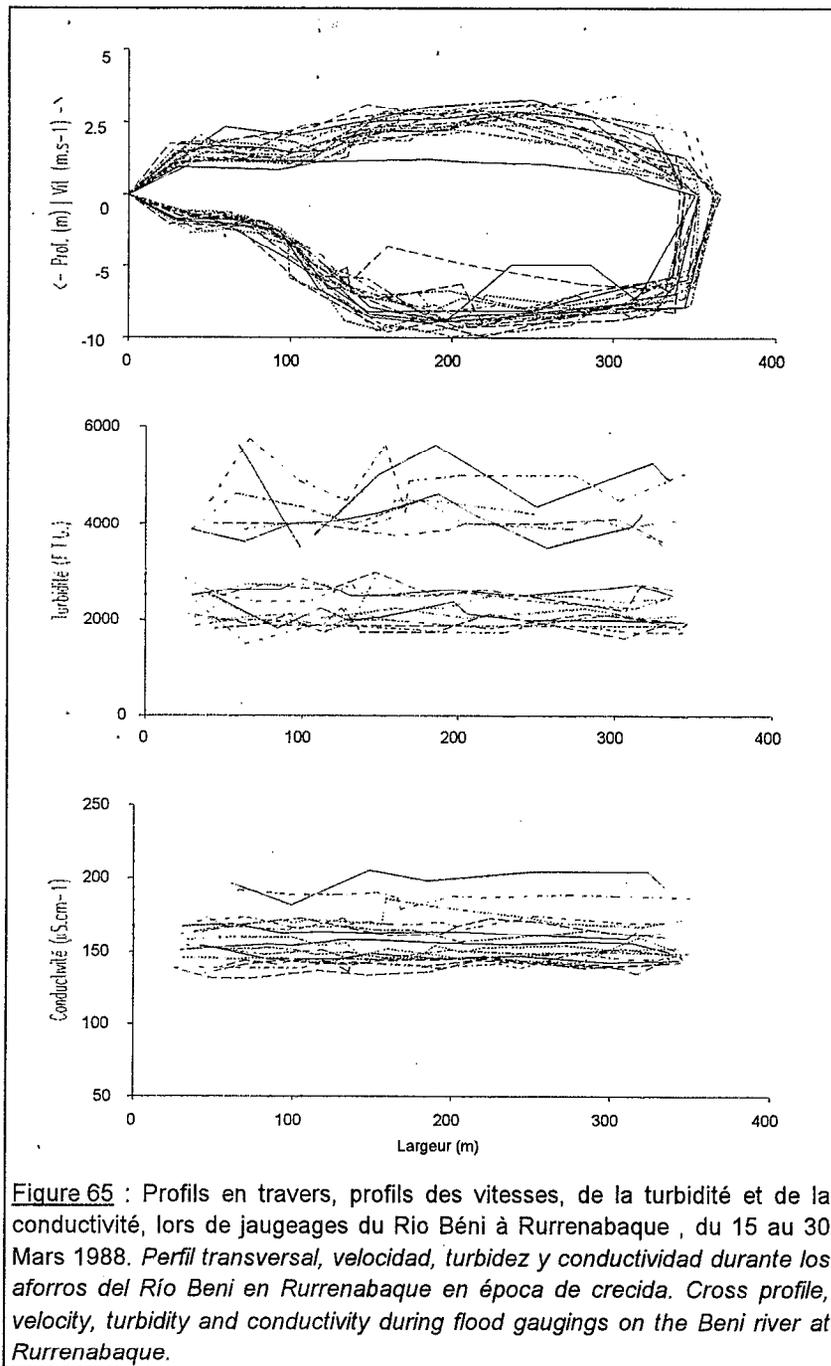


Figure 65 : Profils en travers, profils des vitesses, de la turbidité et de la conductivité, lors de jaugeages du Rio Béni à Rurrenabaque, du 15 au 30 Mars 1988. Perfil transversal, velocidad, turbidez y conductividad durante los aforros del Río Beni en Rurrenabaque en época de crecida. Cross profile, velocity, turbidity and conductivity during flood gaugings on the Beni river at Rurrenabaque.

#### IV.A.2.c. Dans les Llanos au cours du cycle hydrologique.

Les mêmes mesures exploratoires que celles antérieurement exposées ont été effectuées à chaque station du réseau PHICAB en plaine amazonienne au cours du cycle hydrologique 1986-1987 (Tableau XVI). L'ensemble des résultats obtenus confirme les observations réalisées à Rurrenabaque en crue. Les coefficients de variation les plus élevés correspondent aux teneurs les plus faibles, et soulignent en réalité l'imprécision des mesures (turbidité sur le Rio Ichilo, conductivité sur les rios Orthon et Itenez).

Les grands fleuves de la plaine amazonienne présentent une bonne distribution latérale des teneurs en matières dissoutes et particulières (Figures 66 & 67). Pour ces dernières, la relative homogénéité spatiale des turbidités est liée à la forte turbulence de ces fleuves en crue, où des vitesses dépassant les  $5 \text{ m.s}^{-1}$  sont fréquemment observées.

Tableau XVI : Distribution de la turbidité et de la conductivité sur les 12 verticales, lors des jaugeages aux stations du réseau PHICAB (1986-1987). *Turbidez y conductividad durante los aforros en las estaciones PHICAB. Turbidity and conductivity during gauging at the PHICAB stations.*

Station	Rio	Date	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Turb. Moy. (F.T.U.)	C.V.	Cond. Moy. ( $\mu$ S/cm)	C.V.
Ang. Bala	Béni	26/11/86	-	1780	0.01	141	0.01
Ang. Bala	Béni	25/02/87	2230	550	0.28	89	0.01
Ang. Bala	Béni	12/07/87	529	59	0.21	183	0.03
Portachuelo	Béni	24/01/87	6220	685	0.22	132	0.02
Portachuelo	Béni	15/05/87	32	281	0.17	106	0.03
Miraflores	Madre Dios	24/01/87	11800	719	0.14	50	0.04
Miraflores	Madre Dios	16/05/87	4980	350	0.16	52	0.04
Caracoles	Orthon	06/12/86	317	183	0.14	45	0.03
Caracoles	Orthon	25/01/87	681	317	0.33	27	0.12
Caracoles	Orthon	09/03/87	530	421	0.26	75	0.02
Caracoles	Orthon	17/05/87	559	276	0.10	30	0.04
Cach. Esper.	Béni	06/12/86	10200	598	0.18	58	0.01
Cach. Esper.	Béni	25/01/87	21100	818	0.09	71	0.01
Cach. Esper.	Béni	08/03/87	13700	294	0.30	85	0.03
Cach. Esper.	Béni	17/05/87	9090	279	0.31	64	0.03
Abapo	Grande	05/01/87	1290	18300	0.34	624	0.03
Abapo	Grande	22/03/87	265	5898	0.38	893	0.02
Abapo	Grande	23/07/87	45	10	0.04	814	0.01
Pto Villaruel	Ichilo	20/03/87	228	13	0.69	91	0.04
Pto Villaruel	Ichilo	22/07/87	171	23	0.25	103	0.02
Muyurina	Mamoré	29/07/87	-	86	0.14	261	0.02
Pto Ganadero	Mamoré	30/01/87	5510	1070	0.17	124	0.01
Pto Ganadero	Mamoré	24/05/87	3340	205	0.11	120	0.02
Pto Ganadero	Mamoré	28/07/87	783	78	0.18	241	0.01
Montevideo	Mamoré	01/12/86	3340	598	0.21	131	0.03
Montevideo	Mamoré	05/03/87	6550	108	0.18	124	0.01
Montevideo	Mamoré	24/05/87	3340	231	0.11	121	0.01
Montevideo	Mamoré	31/07/87	1160	56	0.27	245	0.01
Pto Siles	Mamoré	03/12/86	4370	483	0.18	107	0.02
Pto Siles	Mamoré	29/01/87	7570	1013	0.19	114	0.01
Pto Siles	Mamoré	06/03/87	9300	212	0.29	103	0.01
Pto Siles	Mamoré	22/05/87	5940	265	0.10	89	0.05
Pto Siles	Mamoré	01/08/87	1250	95	0.34	218	0.01
Camp. Moré	Itenez	04/12/86	745	21	0.16	46	0.01
Camp. Moré	Itenez	21/05/87	2360	33	0.05	31	0.05
Camp. Moré	Itenez	02/08/87	433	17	0.30	45	0.04
Vuelta Grande	Itenez	04/12/86	745	40	0.21	48	0.05
Vuelta Grande	Itenez	27/01/87	2070	51	0.07	28	0.02
Vuelta Grande	Itenez	07/03/87	3100	39	0.08	25	0.09
Vuelta Grande	Itenez	21/05/87	2360	35	0.07	29	0.05
Vuelta Grande	Itenez	02/08/87	433	19	0.16	43	0.01
Guayamerin	Mamoré	05/12/86	3960	219	0.20	106	0.02
Guayamerin	Mamoré	26/01/87	10000	981	0.19	101	0.02
Guayamerin	Mamoré	18/05/87	10500	224	0.25	72	0.04

Les 61 jaugeages (dont 17 lors du suivi de crue du Rio Béni à Rurrenabaque) réalisés pour l'étude de la dispersion latérale des teneurs, ont permis d'établir la liaison entre la valeur d'un échantillon ponctuel de surface, avec la valeur moyenne dans la section jaugée. Les résultats obtenus (Figure 68) montrent de très bonnes corrélations, que ce soit pour les matières dissoutes ou les matières particulaires, comme cela a déjà été observé sur d'autres bassins (Nouvelot, 1972; Long Yuqian, 1989).

4. La recherche d'une méthode.

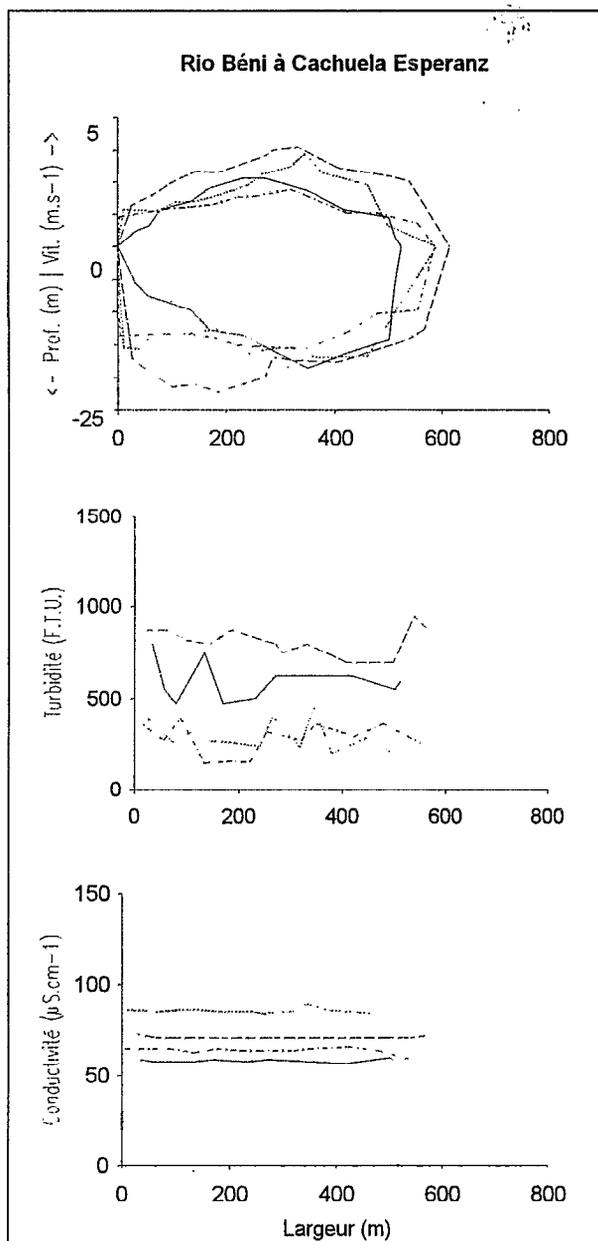


Figure 66 : Profils en travers, profils des vitesses, de la turbidité et de la conductivité, lors de jaugeages du Rio Béni à Cachuela Esperanza, de Décembre 1986 à Mai 1987. Perfil transversal, velocidad, turbidez y conductividad durante los aforros del Río Beni en Cachuela Esperanza. Cross profile, velocity, turbidity and conductivity during gaugings on the Beni river at Cachuela Esperanza.

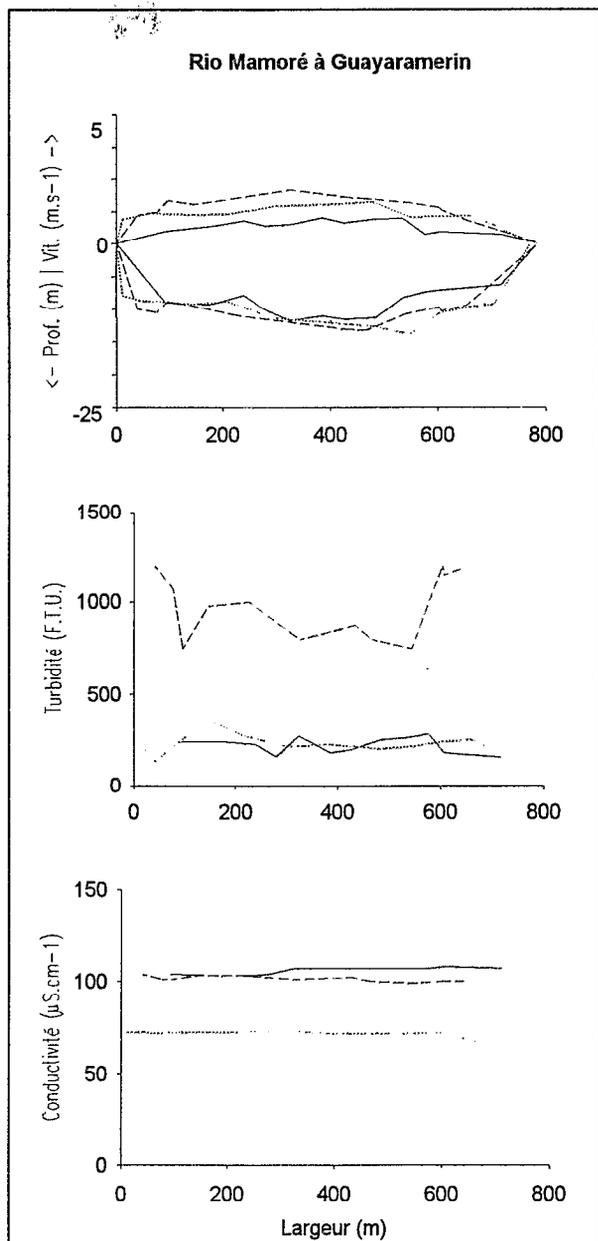


Figure 67 : Profils en travers, profils des vitesses, de la turbidité et de la conductivité, lors de jaugeages du Rio Mamoré à Guayaramerin, de Décembre 1986 à Mai 1987. Perfil transversal, velocidad, turbidez y conductividad durante los aforros del Río Mamoré en Guayaramerin. Cross profile, velocity, turbidity and conductivity during gaugings on the Mamore river at Guayaramerin.

Dans le cas des matières dissoutes, la pente obtenue est très proche de 1, ce qui confirme la très bonne dispersion de la salinité dans la section. Pour les matières en suspension, la pente est de 1.1, ce qui veut dire que l'échantillon de surface sous-estime la teneur moyenne d'environ 10%.



Photo : 22 : Le Rio Zongo à Islani (1500 m) en basses eaux. *El Río Zongo en Islani, época de aguas bajas. The Zongo river at Islani, low water period.*

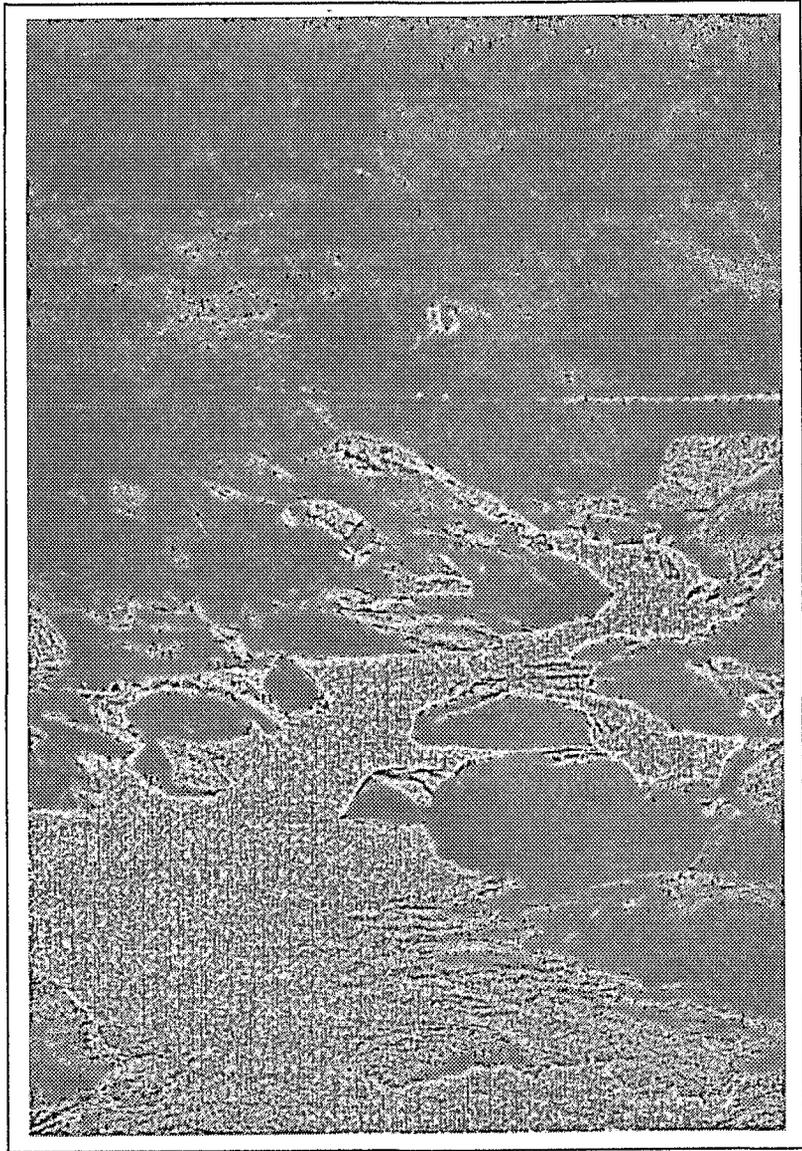
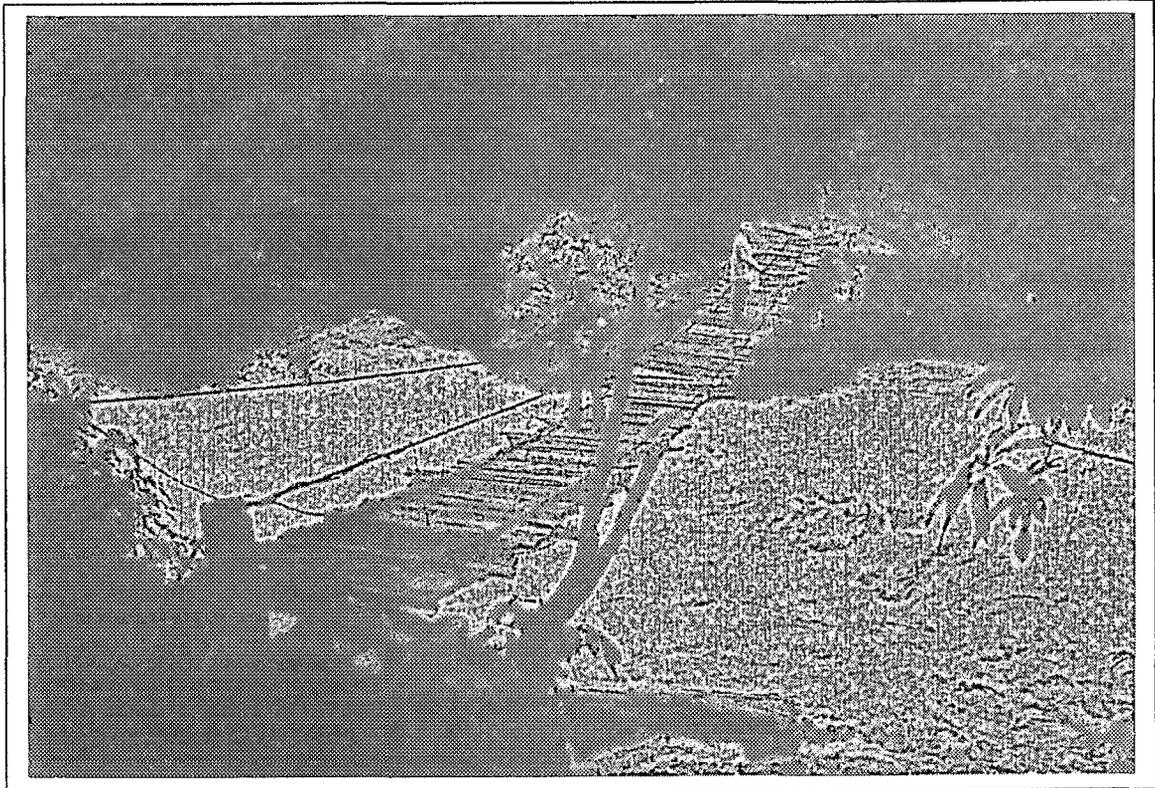
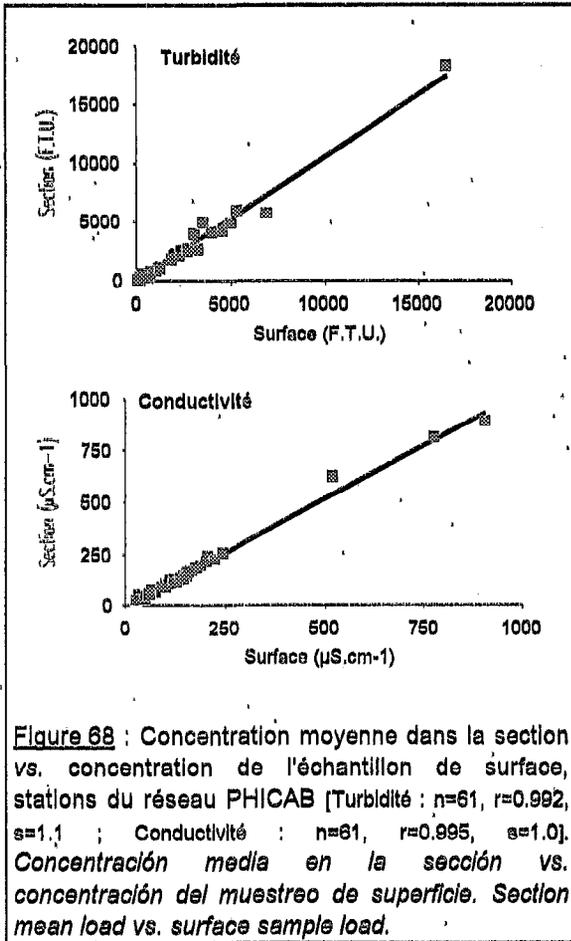


Photo 23 : Le Rio Zongo à Islani (1500 m) en hautes eaux. *El Río Zongo en Islani, época de aguas altas. The Zongo river at Islani, high water period.*



4. La recherche d'une méthode.

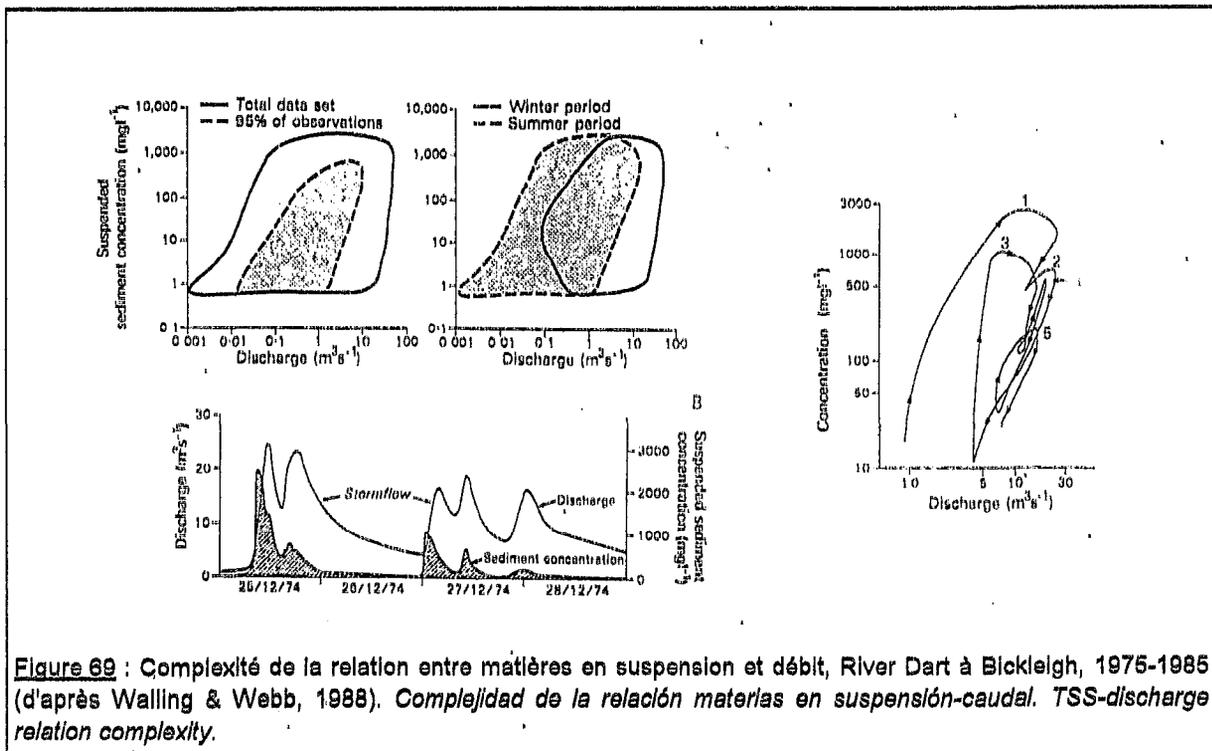


**IV.A.3. Choix d'un protocole d'échantillonnage.**

**IV.A.3.a. Pas de temps.**

L'étude de la variabilité temporelle des teneurs a montré que si un échantillonnage hebdomadaire peut paraître suffisant pour les matières dissoutes, l'estimation précise des matières en suspension passe par un échantillonnage journalier, surtout pour les trois stations situées au piedmont des Andes (Rio Béni à Angosto del Bala, Rio Ichilo à Puerto Villarroel; Rio Grande à Abapo).

La recherche de variables explicatives des concentrations en MES, comme le débit, a fait l'objet de très nombreux travaux réalisés tant en zone tempérée qu'en zone tropicale. Ces études ont montré que l'évolution saisonnière des teneurs en matières en suspension en fonction du débit n'est pas univoque (Figure 69), rendant inadéquates les formules de calcul des MES à partir du débit (Colombani, 1967; Douglas, 1967; Nouvelot, 1969, 1972; Dubreuil & al., 1975; Chouret, 1977; Larras, 1977; Olivry, 1977; Vanoni, 1977; Walling, 1977; Wood, 1977; Roche, 1980; Meade, 1982, 1985; Walling & Webb, 1982; 1988; Bécuelo & al., 1983; Pickup, 1984; Goswami, 1985; Gac & Kane, 1986; Drago & Amsler, 1988; Olivry & al., 1988, 1989; Mossa 1989; Bricquet, 1989; Meade & al., 1990).



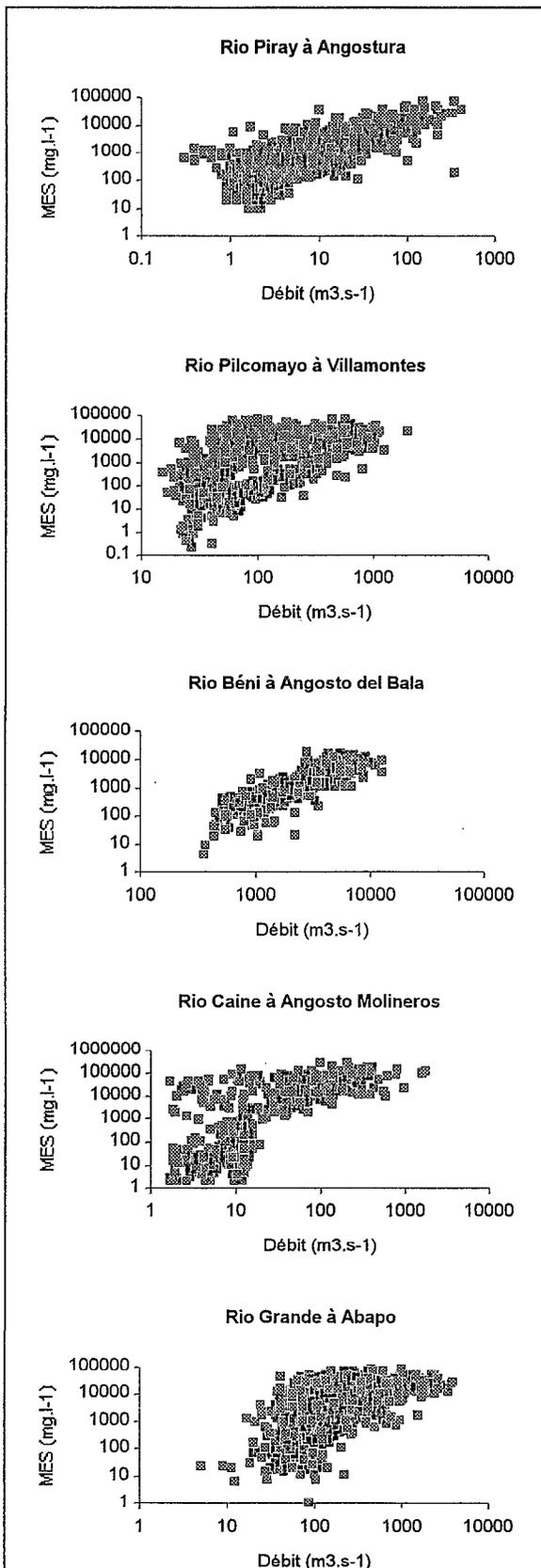


Figure 70 : Matières en suspension vs. débit pour quelques stations andines de Bolivie. *Materias en suspensión vs. caudal, estaciones andinas de Bolivia. TSS vs. discharge, Bolivian andean stations.*

La courbe en forme de cloche (Figure 69), obtenue au cours du cycle hydrologique, avec généralement des teneurs plus fortes en montée de crue qu'en décrue, est également observée sur les grands fleuves tropicaux d'Afrique (Olivry & al., 1988). Dans les Andes de Bolivie, les courbes obtenues présentent le même phénomène saisonnier d'évolution en cloche, mais avec des amplitudes différentes suivant les stations (Figure 70), probablement en fonction de la superficie du bassin, du régime climatique et des pratiques agricoles. L'absence de relation liant les matières particulaires et le débit exige la mise en place de prélèvements journaliers, voire horaires, qui sont souvent incompatibles avec les enveloppes budgétaires des programmes d'échantillonnage. Par contre, la mesure en continu de la turbidité, paramètre facilement mesurable et de coût minimum, permet de résoudre avantagement ce problème, une fois que la courbe d'échantillonnage  $MES = f(\text{turbidité})$  a été réalisée pour chaque station de mesure (Walling, 1977; Brabben, 1981; Grobler & Weaver, 1981; Walling & Webb, 1982; Olive & al., 1988). En Bolivie, cette technique a été utilisée aux stations du réseau PHICAB avec succès (Guyot & al., 1989; Guyot & Calle, 1990). Pour éliminer les interférences dues à la couleur des eaux, différente d'un fleuve à l'autre, une courbe d'étalonnage a été établie pour chaque station (Figure 71).

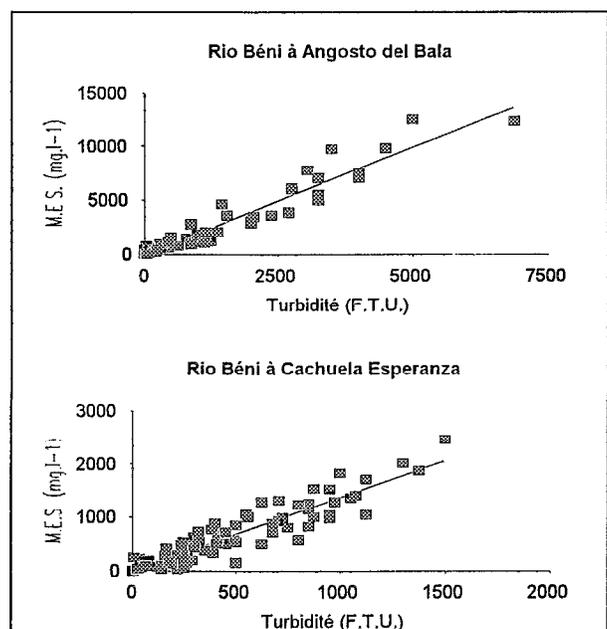
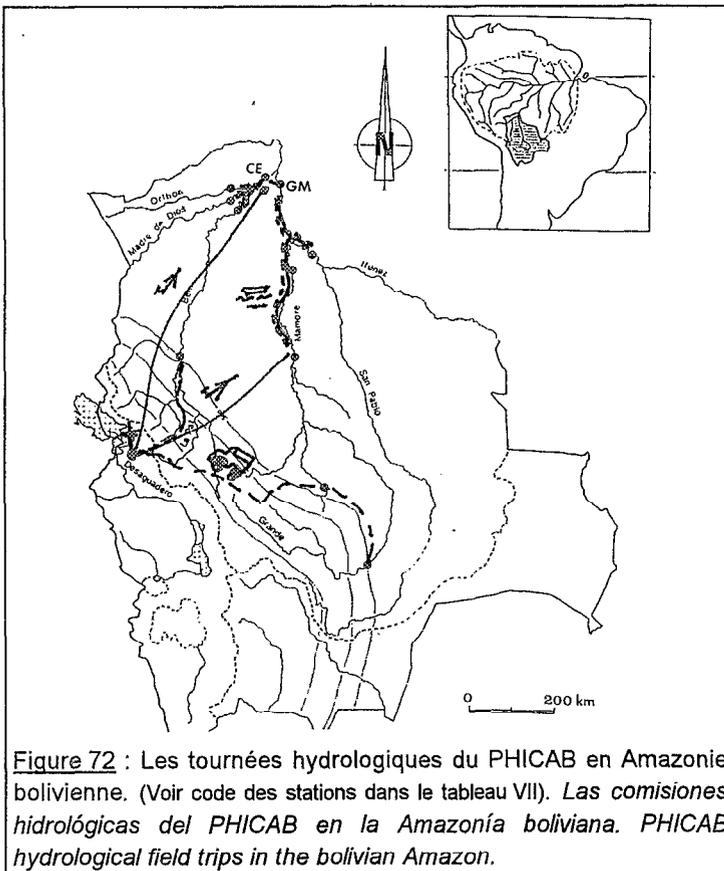


Figure 71 : Matières en suspension vs. turbidité Rio Béni à Angosto del Bala ( $n=76$ ,  $r=0.967$ ), Rio Béni à Cachuela Esperanza ( $n=82$ ,  $r=0.921$ ). *Materias en suspensión vs. turbidez. TSS vs. turbidity.*

#### IV.A.3.b. Mode d'échantillonnage.

Un échantillonnage journalier a donc été mis en place sur l'ensemble des stations du réseau PHICAB, suite aux conclusions précédentes. Les échantillons des stations des Llanos étant acheminés à La Paz par voie aérienne (Figure 72), le volume prélevé a été réduit au minimum. L'échantillonnage adopté est le suivant :

- \* prélèvement d'un échantillon journalier de 120 ml pour mesure de la turbidité et de la conductivité,
- \* prélèvement décadaire d'un échantillon de 1000 ml pour dosage des éléments en solution, et détermination des matières en suspension.



Tous les échantillons ont été prélevés en surface du cours d'eau, le matin entre 7 et 8 heures, par l'observateur de la station, recruté sur place par le PHICAB. Tous les flacons utilisés sont en PVC. L'observateur mesure en outre le niveau d'eau du fleuve (le matin et le soir), ainsi que la température de l'eau. Sur certaines stations, la conductivité a également été mesurée sur le terrain par l'observateur. Les échantillons, qui ne subissent aucun traitement particulier, sont ensuite stockés à l'abri de la lumière, chez l'observateur à température ambiante.

Un hydrologue de l'ORSTOM effectue tous les deux mois une tournée sur le réseau, pour recalibrer les échelles limnimétriques, effectuer un ou plusieurs jaugeages à chaque station, vérifier le travail des observateurs et collecter les échantillons. Il effectue en outre un prélèvement supplémentaire (de 1 à 10 litres) et mesure la température, la conductivité et le pH de l'eau. Certains prélèvements particuliers (sédiments, eau pour dosage du carbone

organique,...) ont également été réalisés lors de ces tournées hydrologiques. Les échantillons destinés à l'analyse du carbone organique (2 échantillons par station dont un filtré sur place) sont séparés dans des flacons en verre (20 ml), puis acidifiés à pH 1 avec de l'acide phosphorique.

Les tournées se différencient en deux types en fonction des stations visitées :

- \* stations du piedmont andin (AB, PV, AP) : accessibles par piste depuis La Paz,
- \* stations des Llanos (PG, PS, VG, GM, CE, CA, MF, PC) : accessibles par voie fluviale en pirogue. La pirogue du Rio Mamoré est basée soit à Trinidad, soit à Guayaramerin, et celle du Rio Béni, soit à Cachuela Esperanza, soit à Riberalta. La jonction entre Guayaramerin et Cachuela Esperanza s'effectue par piste. L'accès aux Llanos depuis La Paz se fait par voie aérienne (*Lloyd Aero Boliviano* ou *Transporte Aero Militar*) sur Trinidad et Riberalta (Figure 72). La tournée des Llanos s'effectue une fois dans un sens, une fois dans l'autre. Pour le transport des échantillons par piste en véhicule tout-terrain, ou par fret aérien, des caisses en bois en été spécialement confectionnées.

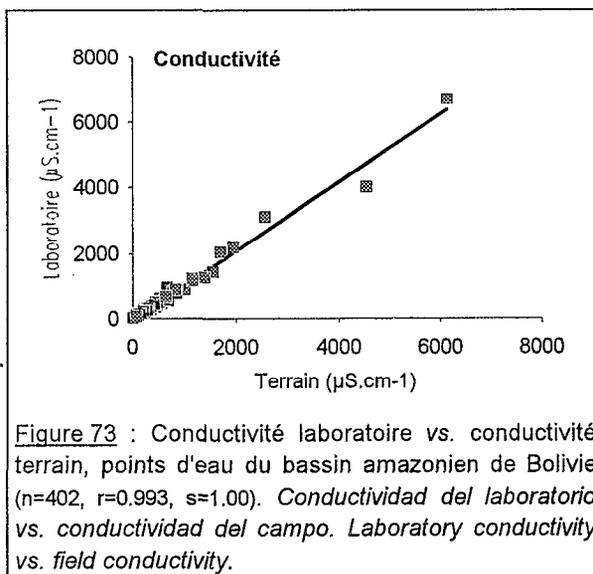
Compte tenu de l'absence d'infrastructures adéquates dans les Llanos de Bolivie, il n'a pas été possible d'effectuer des prélèvements de transport de fond (charriage et saltation) aux stations du

réseau PHICAB. Par contre, quelques mesures de charriage ont été réalisées sur un petit cours d'eau andin : le Rio Achumani à La Paz (Bourges & Guyot, 1989). Pour cela, des nasses à sédiments ont été confectionnées localement à l'aide d'un grillage résistant de maille centimétrique. De même, l'instabilité des berges, et la grande amplitude saisonnière du niveau d'eau (souvent supérieur à 10 mètres), n'ont pas permis d'utiliser des échantillonneurs automatiques, ou de développer un système d'échantillonnage plus performant lié aux variations hydrologiques (Colombani & al., 1981; Thomas, 1985).

En plus des tournées hydrologiques sur le réseau, des campagnes d'échantillonnage "flash" sont réalisées sur l'ensemble du bassin versant amazonien de Bolivie, à différentes périodes au cours du cycle hydrologique (Guyot & al., 1987, 1988, 1989, 1991; Corbin & al., 1988). Certaines de ces campagnes (Quintanilla & al., 1989; Guyot & al., 1990) ont débordé sur les autres bassins hydrographiques de Bolivie (Altiplano et Paraguay). Sur l'ensemble du territoire bolivien, plus de 700 cours d'eau et lacs ont ainsi été échantillonnés de 1982 à 1991.

#### IV.A.3.c. Conservation des échantillons.

Les échantillons prélevés lors des tournées et des campagnes ont été analysés entre 5 et 15 jours après la date du prélèvement. Pour les échantillons des observateurs du réseau PHICAB, ce délai a pu être de deux mois ou plus. Le problème de la conservation des échantillons et de la représentativité des résultats s'est donc posé.



Pour cela, la détermination sur le terrain de certains éléments susceptibles d'être rapidement altérés, a été entreprise. La bonne corrélation obtenue avec les bicarbonates est encourageante (Roche & al., 1986). De même, la relation entre conductivité terrain et conductivité laboratoire pour l'ensemble des points d'eaux du bassin amazonien (Figure 73) présente une très bonne corrélation.

Ces résultats indiquent qu'il n'y a apparemment pas de grands changements dans la teneur globale des éléments en solution, depuis l'échantillonnage jusqu'à l'analyse. Par contre, il est fort possible que la concentration de certains éléments soit affectée par ces délais, aussi il en sera tenu compte lors de l'interprétation des données hydrochimiques.

### IV.B. LES ANALYSES.

#### IV.B.1. Au laboratoire du SENAMHI (El Alto, La Paz).

Les échantillons prélevés et collectés lors des tournées hydrologiques sont réceptionnés au laboratoire du SENAMHI (Service national bolivien de météorologie et d'hydrologie) de El Alto, situé près de l'aéroport international de La Paz.

##### IV.B.1.a. Échantillons journaliers de 120 ml.

Les échantillons journaliers provenant des stations du réseau PHICAB font l'objet des déterminations suivantes, après agitation :

- \* conductivité électrique (Conductimètre de laboratoire Tacussel),
- \* turbidité (Turbidimètre Hach).

#### **IV.B.1.b. Echantillons décadaires des observateurs du réseau, échantillons des tournées hydrologiques et des campagnes "flash".**

Les échantillons de 1 à 10 litres provenant soit du réseau PHICAB, soit des campagnes hors réseau, ont tous été traités de la manière suivante :

- \* agitation de l'échantillon pour obtenir une bonne homogénéité
- \* détermination de la conductivité électrique ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à 25°C.) et de la turbidité (unités formazine : FTU), de la même façon que les échantillons journaliers de 120 ml.
- \* filtration de tous les échantillons, sur filtre en fibre de verre Whatman (GFC, 1.2  $\mu\text{m}$ ), puis sur filtre Millipore en acétate de cellulose (0.45  $\mu\text{m}$ ).
- \* détermination des matières en suspension par pesée différentielle du filtre GFC, après séchage en étuve (2 heures à 105°C.).
- \* détermination de la couleur (unités platine-cobalt : Pt/Co) à l'aide d'un colorimètre portatif Hach.
- \* dosage de l'alcalinité par volumétrie avec de l'acide sulfurique (Rodier, 1975).

Enfin, les échantillons (matières en suspension sur les filtres, et eau filtrée) sont conditionnés pour le stockage sur place, ou l'envoi vers les autres laboratoires d'analyse. Le laboratoire du SENAMHI récupère ensuite tous les flacons, les lave, et les prépare pour les tournées suivantes.

#### **IV.B.1.c. Granulométrie de sédiments.**

Des échantillons de sédiments provenant du fond et des berges des fleuves des Llanos ou des rivières andines, ainsi que des mesures du charriage du Rio Achumani, ont fait l'objet de déterminations granulométriques par tamisage et pesée, au laboratoire du SENAMHI à El Alto. La granulométrie des MES a été déterminée à l'IGBA de Bordeaux.

#### **IV.B.2. Au laboratoire de l'IIQ-UMSA (Cotacota, La Paz).**

Le laboratoire de l'IIQ-UMSA (Institut de recherches en chimie de l'Université San Andres de La Paz) reçoit les échantillons d'eau filtrée provenant du SENAMHI pour détermination des éléments majeurs en solution. Les chercheurs et techniciens de cet institut effectuent les analyses suivantes :

- \* dosage de l'alcalinité par potentiométrie (Rodier, 1975),
- \* dosage des chlorures par colorimétrie au thiocyanate mercurique (Hach, 1982)
- \* dosage des sulfates par néphélométrie au sulfate de baryum (Rodier, 1975)
- \* dosage du calcium et du magnésium par absorption atomique (Rodier, 1975)
- \* dosage du sodium et du potassium par spectrométrie de flamme (Rodier, 1975)
- \* dosage du fer par absorption atomique (Rodier, 1975)
- \* dosage de la silice par colorimétrie au molybdate d'ammonium (Rodier, 1975).

Il sera tenu compte dans l'interprétation des données de l'imprécision et/ou de la non reproductibilité de certaines analyses, concernant notamment le dosage des anions.

#### **IV.B.3. Au laboratoire X-RAL (Toronto).**

Une trentaine d'échantillons d'eau filtrée ont été envoyés au laboratoire de service canadien X-RAL, pour détermination des éléments traces en solution (Be, P, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, W, Pb, Bi) par ICP (Inductively Coupled Plasma).

#### **IV.B.4. Au laboratoire de l'IGBA (Bordeaux).**

Le laboratoire de l'IGBA (Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine, Université de Bordeaux I) a effectué sur une centaine d'échantillons de matières en suspension, provenant du réseau PHICAB et de quelques tributaires andins, les déterminations suivantes :

\* granulométrie des matières en suspension au laser (Malvern 3600E), après récupération des MES du filtre par passage en cuve à ultrasons,

\* minéralogie de la fraction argileuse par diffractométrie de rayons X, sur filtre argent (0.45 µm). Les sédiments sont préparés suivant la méthode de Holtzapffel (1985).

\* géochimie des matières en suspension avec détermination des éléments majeurs (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ainsi que la perte au feu à 1000°C.) et des éléments traces (As, Ba, Co, Cr, Cu, Ga, Ni, Pb, Rb, Sn, Sr, Zn, Zr) par spectrométrie de fluorescence X sur poudre séchée et broyée. L'appareillage de type séquentiel automatisé permet l'analyse multi-élémentaire. La méthode découle directement des équations de Lachance et Trail (1966) qui permettent de réduire les effets inter-éléments. Les résultats sont obtenus à partir d'une calibration externe basée sur des standards synthétiques et internationaux de l'USGS et de l'ANRT.

#### **IV.B.5. Au laboratoire du CEMAGREF (Lyon).**

Le laboratoire du CEMAGREF (Centre d'étude du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts, Lyon) a reçu une centaine d'échantillons d'eau brute et d'eau filtrée pour doser respectivement le carbone organique total (COT) et le carbone organique dissous (COD). La détermination du carbone organique a été réalisée à l'aide d'un analyseur infra-rouge non dispersif (Dhormann DC80). Le carbone organique particulaire (COP) est obtenu par la différence entre le COT et le COD. Ces échantillons proviennent des stations du réseau PHICAB, ainsi que de quelques cours d'eau andins.

#### **IV.C. LA BANQUE DE DONNEES.**

Avec les résultats d'analyses élaborés par le programme PHICAB, une banque de données physico-chimiques a été développée en Dbase 3<sup>+</sup>. Cette banque contient des informations sur l'hydrochimie de 720 points d'eau de Bolivie, dont 479 pour le bassin amazonien, 199 pour le bassin andoréique de l'Altiplano, et 42 pour le bassin du Rio de La Plata.

Un deuxième fichier a été créé pour la gestion des données journalières (débit, température, conductivité, turbidité et matières en suspension) des stations du réseau PHICAB. Les données anciennes collectées dans les divers organismes de Bolivie (SENAMHI, ENDE, SEARPI), et pour la plupart inédites, ont été intégrées à cette banque de données qui contient ainsi des informations sur une soixantaine de bassins andins.

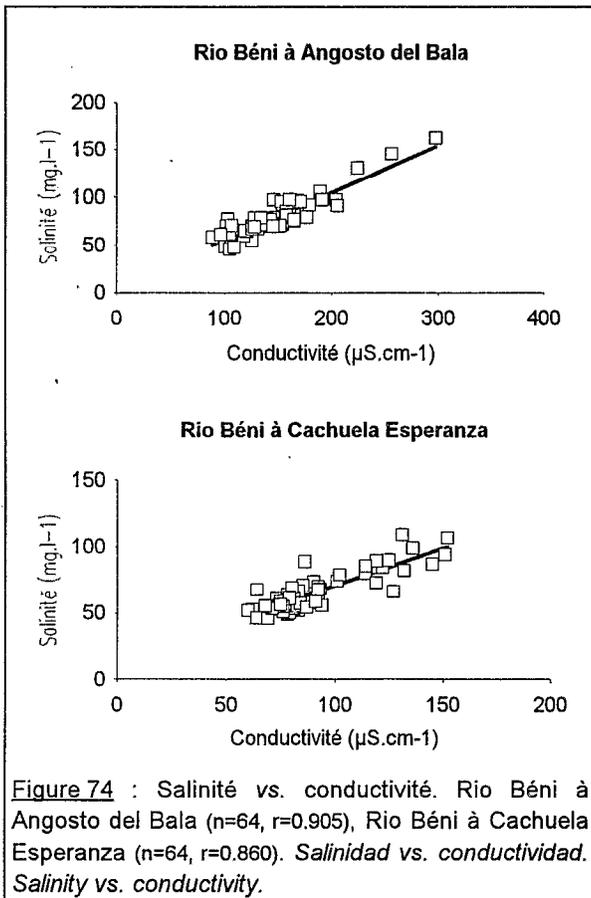
#### **IV.D. LE CALCUL DES FLUX.**

##### **IV.D.1. Détermination des teneurs globales.**

La teneur globale des matières particulaires s'effectue directement par filtration et pesée. Le suivi en continu, sur une station fixe, des matières en suspension à partir de la turbidité est possible après avoir établi la courbe d'étalonnage de la station (Figure 71).

La teneur globale en matières dissoutes (minéralisation) s'obtient en additionnant les concentrations pondérales de chaque élément majeur de la phase dissoute. La salinité, qui correspond à la minéralisation moins la silice, est fortement liée à la conductivité électrique de l'eau (Bakalowicz, 1974, 1979; Rodier, 1975; Meybeck, 1984). Aussi, tout comme pour les matières en suspension, il devient possible de suivre en continu l'évolution de la salinité, après avoir établi pour chaque station de mesure, la courbe d'étalonnage suivante : Salinité=f(Conductivité).

4. La recherche d'une méthode.



En Bolivie, de telles courbes ont été réalisées aux stations du réseau PHICAB (Figure 74), permettant de suivre l'évolution journalière de la salinité, donc des matières dissoutes après rajout de la teneur moyenne en silice, grâce à la mesure de la conductivité sur les échantillons journaliers de 120 ml (Guyot & al., 1989).

**IV.D.2. Mode de calcul des flux de matières.**

La détermination d'un flux peut s'effectuer de différentes façons, qui donneront des résultats très différents (Dickinson, 1981; Walling & Webb, 1981, 1985).

Dans cette étude, les flux (Débit \* Concentration) aux stations du réseau PHICAB, ou aux autres stations (SENAMHI, ENDE, SEARPI) ont été calculés au pas de temps journalier, en utilisant si possible le débit moyen journalier, ou à défaut le débit instantané lors du jaugeage. La concentration utilisée pour le calcul des flux correspond à la teneur de l'échantillon, sans correction, du fait de la relativement bonne homogénéité observée des teneurs dans la section.

Une moyenne mensuelle est d'abord calculée à partir des n valeurs de  $C_i * Q_i$  du mois. Le calcul des moyennes mensuelles interannuelles est effectué verticalement, mois par mois, pour tenir compte de la forte variabilité saisonnière, et des nombreuses lacunes d'observations. La moyenne annuelle pour toute la période d'observation est calculée horizontalement à partir de la moyenne des 12 valeurs moyennes mensuelles interannuelles (Tableau XVII).

Tableau XVII : Exemple de calcul du flux de matières en suspension (t.jour<sup>-1</sup>), Rio Béni à Portachuelo, de 1983 à 1989. *Calculo del flujo de materias en suspensión. TSS yield calculation.*

Anné	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy.
1983											39064		
1984		1208085										165308	
1985	408432			318032	94974	21302							
1986									40632				156638
1987	1195964	1149549	243034	221513	86563			13426		245696	275352	367383	
1988	606361	651675	950435	1015057	383882	133130	38047	5243	3385	16653	45992	110043	
1989	530450	572298	496015	137221	167073	52931	52960	20222	35720	37951	68268	102691	
1990													
Moy.	685302	895402	563161	422956	183123	69121	45504	12964	26579	100100	107174	180413	274316

# Les matières particulaires.

### RÉSUMÉ :

Le cinquième chapitre porte sur les matières particulaires, en suspension ou au fond du lit, et décrit la distribution tant régionale que temporelle de la granulométrie, de la minéralogie et de la géochimie des sédiments. Une partie du chapitre concerne le bilan des flux transportés depuis les Andes (érosion) jusque dans la plaine amazonienne (sédimentation).

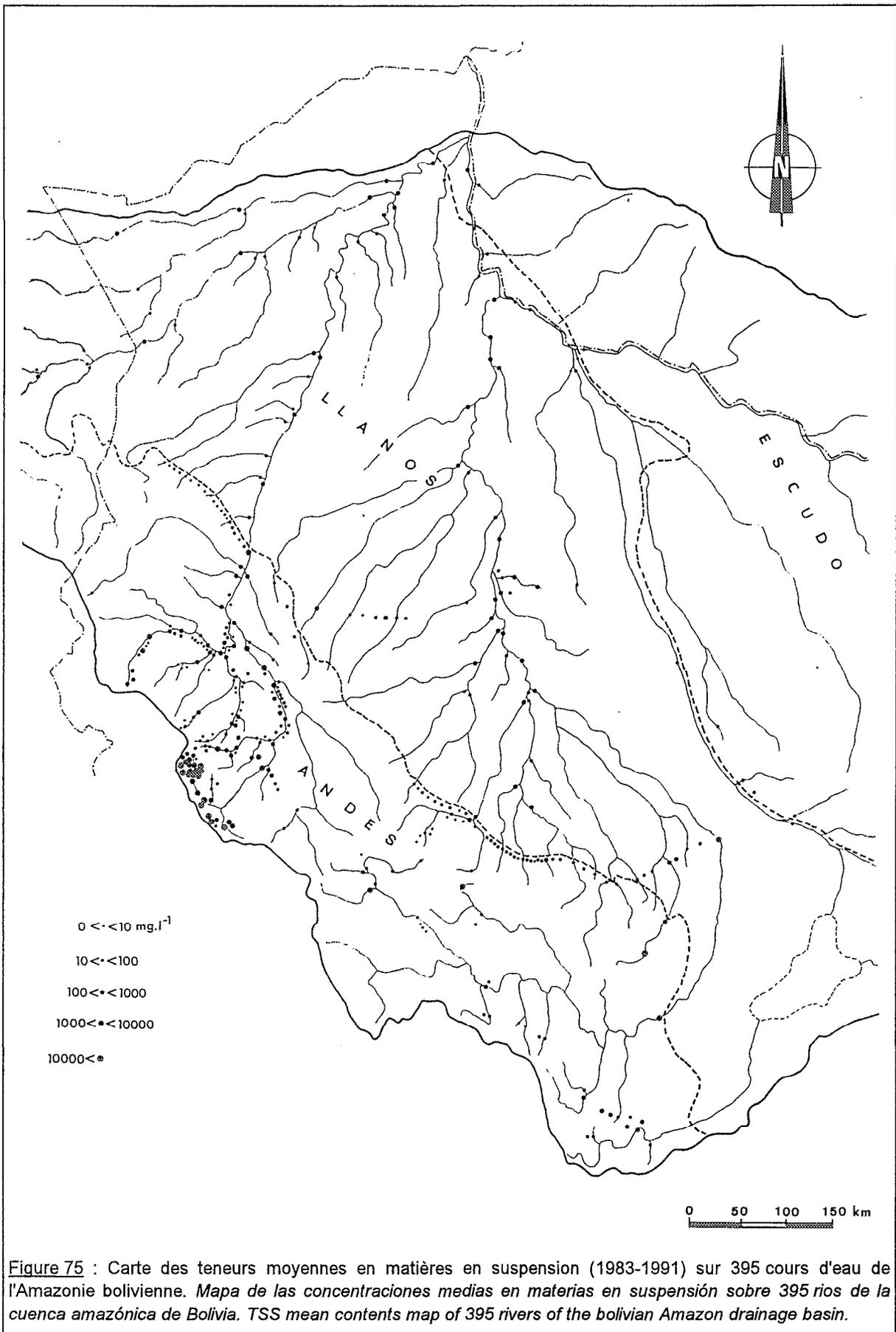
Dans les Andes, la taille des matières en suspension varie de 0.02 à 0.10 mm, alors que dans les Llanos, les sédiments transportés en suspension sont des limons fins avec une granulométrie de 7 à 13  $\mu\text{m}$ . L'illite et la chlorite, produits de l'érosion physique de la chaîne andine, représentent souvent plus de 80% des minéraux argileux. Dans les Llanos, le Rio Orthon qui draine des séries sédimentaires tertiaires présente un cortège minéralogique à smectite dominante, alors que les autres fleuves de l'Amazonie bolivienne conservent un caractère andin où prédomine l'association illite-chlorite. Les analyses des éléments majeurs et des éléments traces des matières en suspension ont montré qu'en dehors de contaminations locales (concentrations urbaines, activité minière), le cortège géochimique est particulièrement stable dans le temps, et que les variations régionales sont limitées. La détermination du carbone organique particulaire sur 52 cours d'eau, a montré que les concentrations observées dépendent des teneurs en matières en suspension, dans un rapport variant de 0.1 à 20%.

L'étude du régime des flux de matières particulaires montre que dans les Andes, l'essentiel du transport se produit en période de crue. L'analyse corrélatoire a montré qu'une estimation précise du flux de matières en suspension passe par un échantillonnage dont le pas de temps doit être de 15 jours maximum dans les Llanos, et de 3 à 5 jours pour les stations du piedmont andin. Dans les Andes, le taux de transport particulaire ( $T_s$ ) varie suivant les vallées de 20 à 18000  $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Les fleuves andins exportent un flux de matières particulaires estimé à 500  $10^6 \text{ t.an}^{-1}$ , ce qui correspond à un taux d'érosion mécanique moyen théorique de 3200  $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$  de la chaîne andine de Bolivie. Lors de la traversée des Llanos, plus de la moitié de ce flux sédimentaire va se déposer dans les plaines d'inondation. Pour le bouclier brésilien, ce taux de transport particulaire est estimé à 16  $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ .

### SOMMAIRE :

V.A. La distribution régionale des matières en suspension .....	p. 111
V.B. La Granulométrie .....	p. 113
V.C. La minéralogie .....	p. 118
V.D. La géochimie .....	p. 127
V.E. Le carbone organique particulaire .....	p. 135
V.F. Le régime .....	p. 139
V.G. Le bilan .....	p. 154

5. Les matières particulaires.



### V.A. LA DISTRIBUTION REGIONALE DES MATIERES EN SUSPENSION.

Sur l'ensemble du bassin amazonien de Bolivie où près de 400 cours d'eau ont été échantillonnés, les teneurs en matières en suspension (MES) varient de  $0 \text{ mg.l}^{-1}$  à plusieurs centaines de  $\text{g.l}^{-1}$ . L'utilisation de valeurs moyennes par point d'échantillonnage reflète mal la réalité, compte tenu de la grande disparité du nombre de prélèvements par station et de la très forte variabilité saisonnière des teneurs. Toutefois, la distribution obtenue (Figure 75) permet de distinguer certaines régions des Andes où les concentrations moyennes sont nettement plus élevées qu'ailleurs, comme cela est le cas pour les vallées des rios La Paz, Luribay et Consata.

La distribution statistique des teneurs en matières en suspension suit une loi Log-Normale (Figure 76), traduisant l'influence de plusieurs variables aléatoires à effet multiplicatif.

La distribution des teneurs en MES en fonction de l'altitude (Figure 77) montre que dans les Andes, les rivières d'une même région peuvent présenter des valeurs très différentes. Les maximums sont enregistrés dans l'Alto-Béni, alors que les bassins andins orientaux (Chaparé, Ichilo, Sécuré, ...)

ont toujours des teneurs modestes. Dans les Llanos (Béni et Mamoré) et sur le bouclier (Escudo), les teneurs sont généralement inférieures à  $1 \text{ g.l}^{-1}$ .

La relation liant les MES au débit spécifique (Figure 78), estimé d'après la carte de Roche (1990), indique que les teneurs sont inversement proportionnelles au ruissellement. La première classe de valeurs ( $q_s = 5 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ), concernant le bassin du Rio Grande, n'est pas représentative compte tenu du faible nombre d'échantillons récoltés dans cette région.

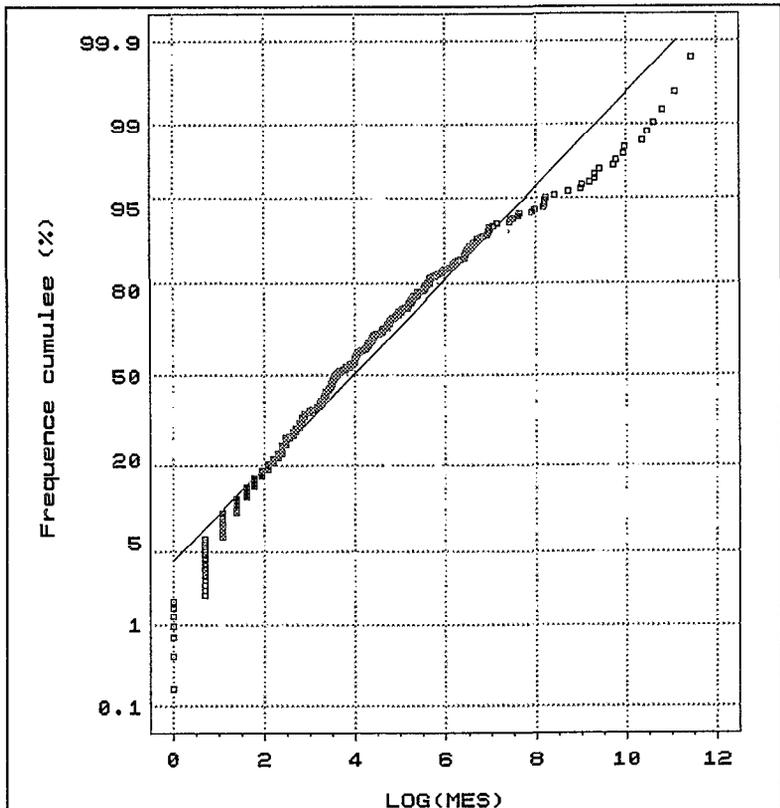


Figure 76 : Distribution statistique des matières en suspension, Amazonie bolivienne, valeurs moyennes (1983-1991) observées sur 395 stations. Distribución estadística de las materias en suspensión. TSS statistical distribution.

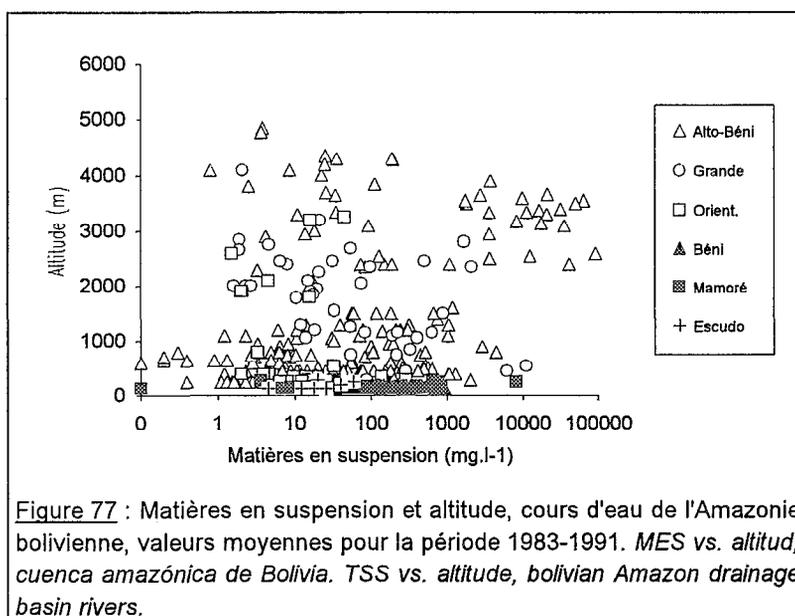


Figure 77 : Matières en suspension et altitude, cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991. MES vs. altitud, cuenca amazónica de Bolivia. TSS vs. altitude, bolivian Amazon drainage basin rivers.

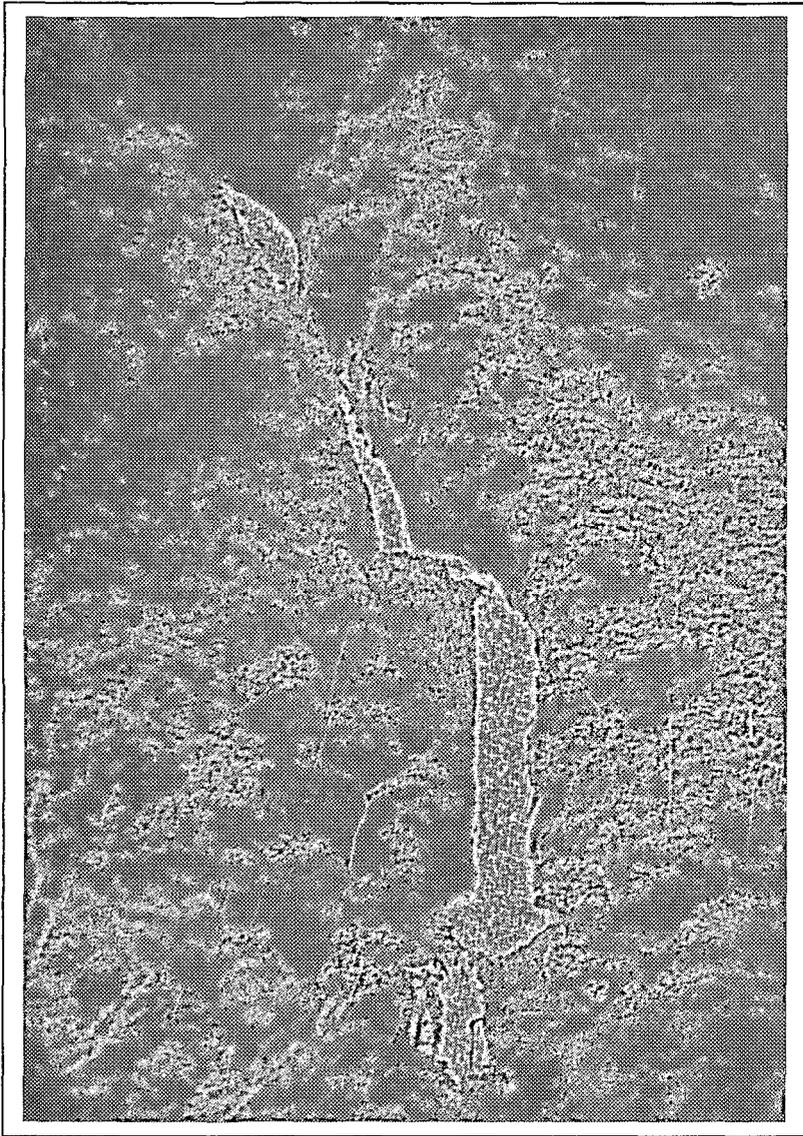
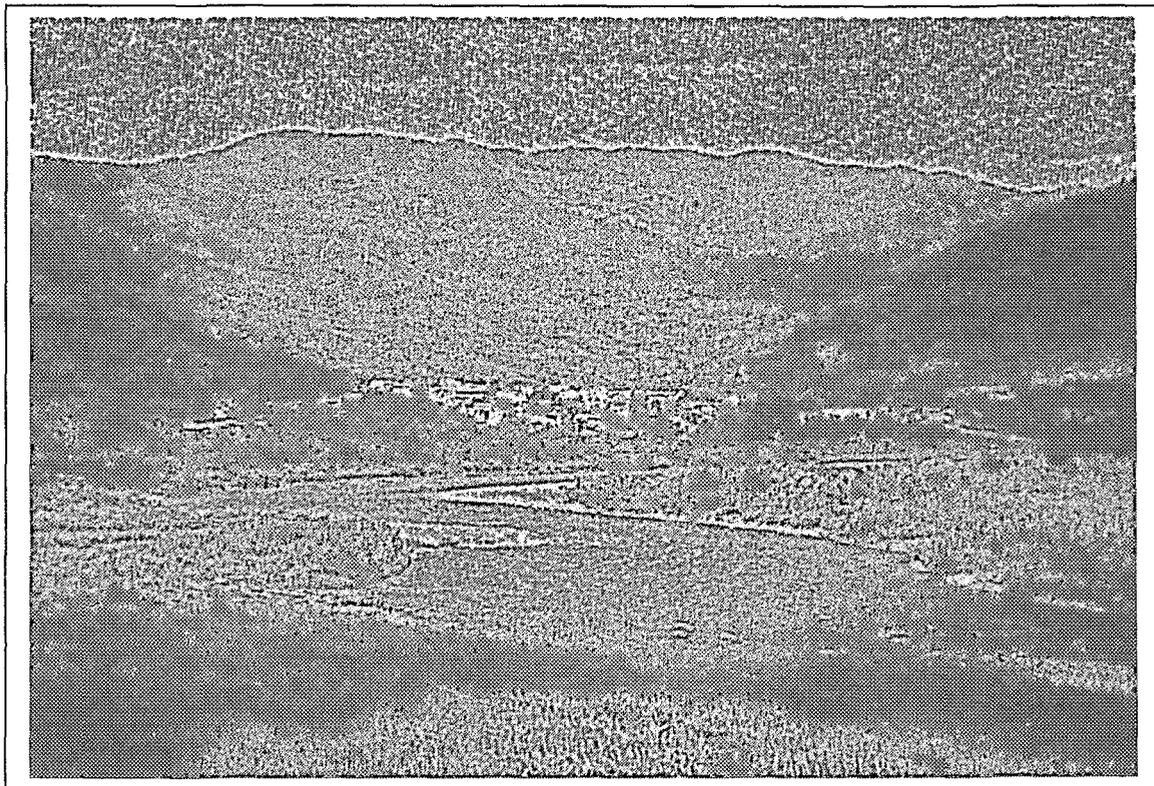


Photo 24 : Cascade dans la vallée du Río Coroico (900 m). *Cascada en el valle del Río Coroico. Waterfall in the Coroico river valley.*

Photo 25 : Río Coroico à Caranavi (650 m). *Río Coroico en Caranavi. Coroico river at Caranavi.*



## V.B. LA GRANULOMETRIE.

### V.B.1. Sédiments du fond des cours d'eau.

La granulométrie des sédiments du lit des cours d'eau a été étudiée sur le bassin du Rio Béni afin de connaître la taille des particules transportées par charriage et saltation en Amazonie bolivienne, et d'en estimer la variabilité amont-aval. De plus, cette information est nécessaire pour l'utilisation des formules de calcul du transport de fond. Dans les Andes, la granulométrie est déterminée in situ avec un relevé de surface tous les 50 cm sur une maille

carrée de 20 m sur 20 m environ, suivant une méthodologie développée par le CEMAGREF (Malavoi, 1986). Les échantillons des Llanos, prélevés au fond du lit et sur les berges en basses eaux (Août 1990), ont été analysés suivant une méthode classique par tamisage et pesée. Les trois

premiers sites du Rio Béni en plaine, à l'aval de Rurrenabaque, ont fait l'objet de mesures in situ, du fait de la granulométrie grossière des sédiments (Figure 79).

Dans les Andes, les courbes granulométriques du bassin du Rio La Paz montrent la coexistence de deux familles distinctes avec des proportions relativement élevées de particules fines (<63 µm), et de particules plus grossières (>50 mm). Cette particularité est probablement liée à l'érosion des séries sédimentaires fluvio-lacustres de l'Altiplano par le Rio La Paz. Sur les différents cours d'eau andins étudiés, la granulométrie décroît de manière significative de l'amont vers l'aval.

Des mesures de charriage effectuées par le PHICAB sur les rios Achumani et Huayllani, formateurs du Rio La Paz, ont montré la bonne concordance de la distribution granulométrique entre les mesures in situ et les échantillons de fond. La granulométrie des sédiments charriés par ces cours d'eau andins indique un diamètre

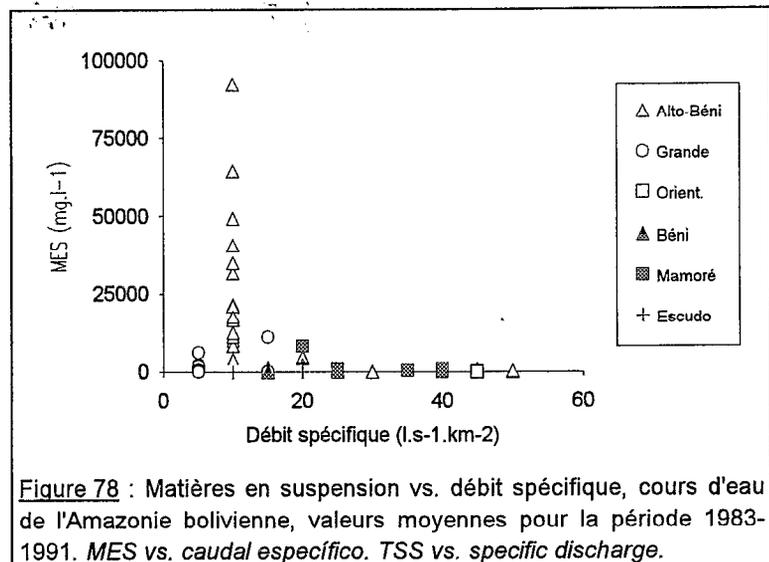


Figure 78 : Matières en suspension vs. débit spécifique, cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991. MES vs. caudal específico. TSS vs. specific discharge.

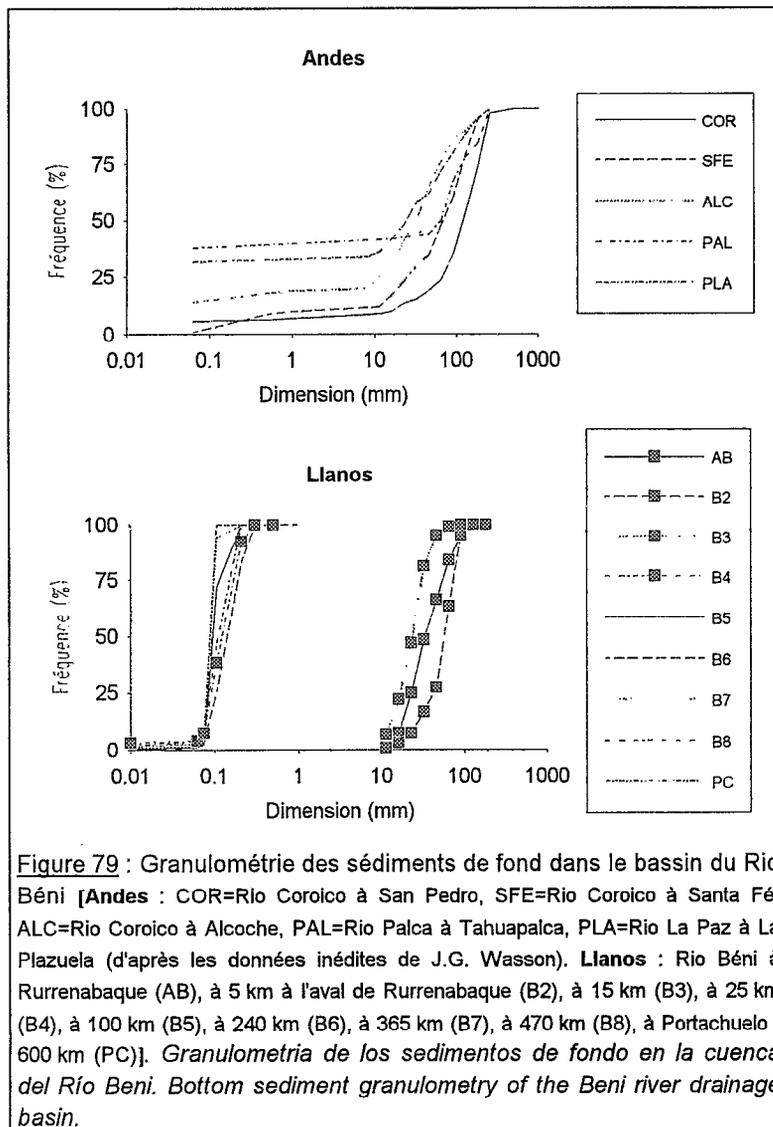
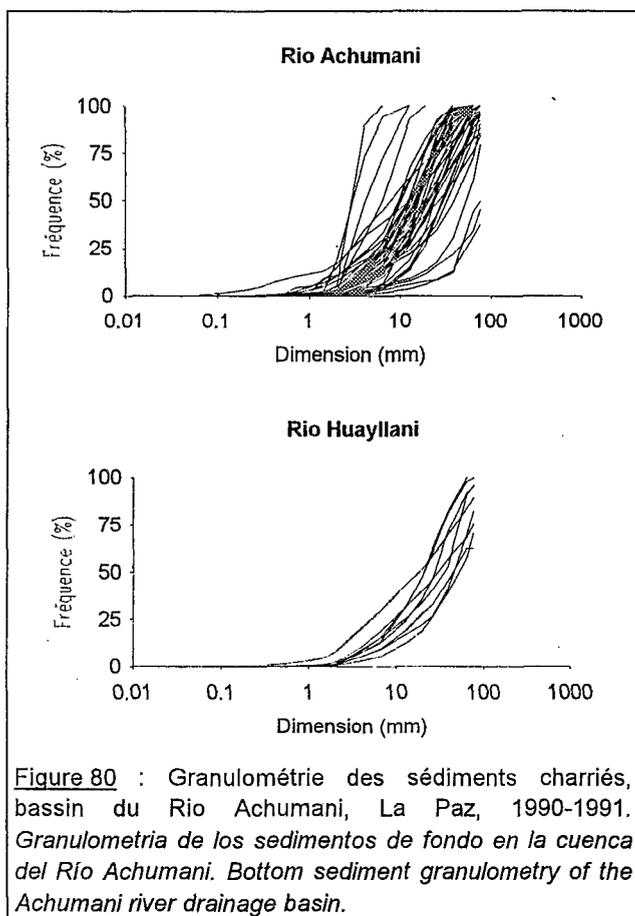


Figure 79 : Granulométrie des sédiments de fond dans le bassin du Rio Béni [Andes : COR=Rio Coroico à San Pedro, SFE=Rio Coroico à Santa Fé, ALC=Rio Coroico à Alcoche, PAL=Rio Palca à Tahuapalca, PLA=Rio La Paz à La Plazuela (d'après les données inédites de J.G. Wasson). Llanos : Rio Béni à Rurrenabaque (AB), à 5 km à l'aval de Rurrenabaque (B2), à 15 km (B3), à 25 km (B4), à 100 km (B5), à 240 km (B6), à 365 km (B7), à 470 km (B8), à Portachuelo : 600 km (PC)]. *Granulometria de los sedimentos de fondo en la cuenca del Río Beni. Bottom sediment granulometry of the Beni river drainage basin.*

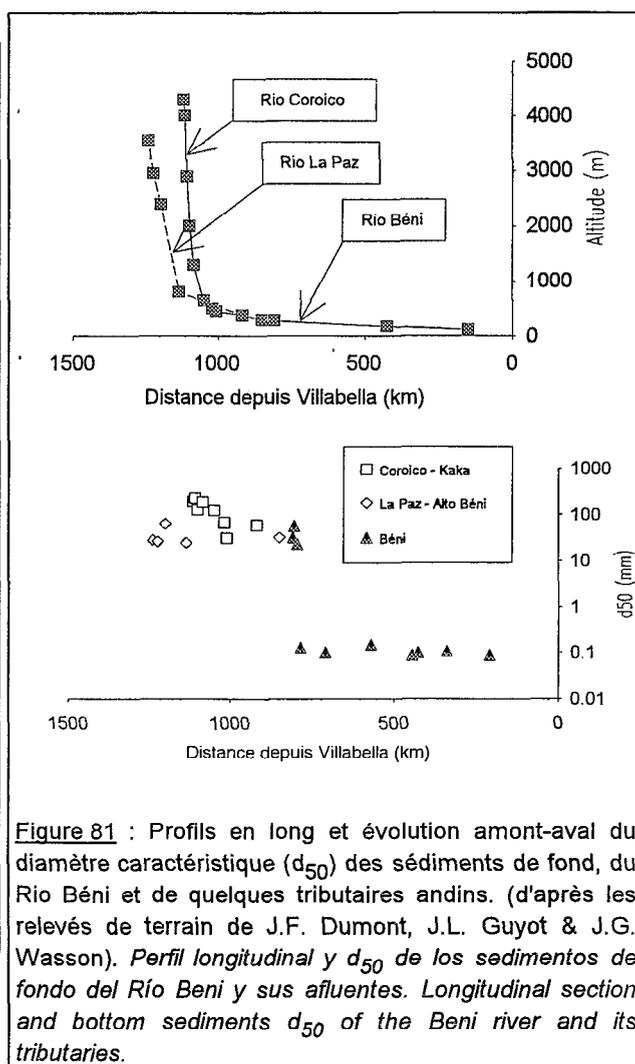


médian ( $d_{50}$ ) d'ordre centimétrique (Figure 80). Des résultats similaires ont été obtenus sur le Rio Unduavi à Sirupaya, où le  $d_{50}$  moyen des sédiments charriés est de 29 mm (ENDE, 1980).

Les courbes granulométriques des sédiments du Rio Béni dans les Llanos (Figure 79) se distribuent en deux familles nettement distinctes. Les trois premières courbes concernent des éléments assez grossiers (graviers et galets), avec un diamètre caractéristique ( $d_{50}$ ) de 20 à 60 mm, et correspondent aux sites les plus proches du piedmont andin (de 0 à 15 km). Les six échantillons suivants présentent des courbes très voisines, avec un  $d_{50}$  variant de 0.09 à 0.15 mm, correspondant à des sables fins (Figure 81).

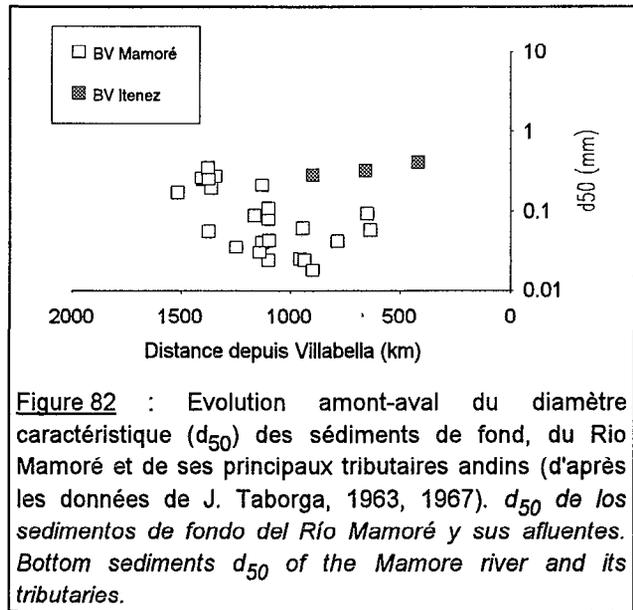
Dans les Llanos, le diamètre caractéristique des sédiments du fond du Rio Béni diminue brutalement en une dizaine de kilomètres séparant les sites B3 et B4. Ensuite la valeur de ce  $d_{50}$  n'évolue plus de manière significative au cours de la traversée des Llanos de Rurrenabaque à Riberalta. Le même phénomène de stabilité de la taille des sédiments de fond, de l'amont vers l'aval sur de grandes distances, a été observé sur d'autres grands fleuves tropicaux comme l'Amazone et l'Orénoque (Meade & al., 1979; Nordin & al., 1980; Mertes & Meade, 1985; Nordin & Meade, 1985). En réalité, la taille des sédiments varie d'un site à l'autre sur le même cours d'eau, mais il n'existe pas de tendance globale à la décroissance vers l'aval. La valeur moyenne du  $d_{50}$  du Rio Béni dans les Llanos est de 0.11 mm, alors que cette valeur est de 0.25 mm pour l'Amazone entre Iquitos et Manacapuru, et de 0.40 mm pour l'Orénoque.

Les données anciennes de Taborga (1964) sur le Rio Béni sont comparables aux données de cette étude. L'ensemble des échantillons concernant le Rio Mamoré et ses principaux tributaires (Grande, Sajta, Chimore, Ichilo, Chaparé, Coni, Isiboro, Sécuré, Ibaré, Rapulo, Yacuma), depuis le piedmont andin jusqu'à Guayaramerin, présente une décroissance plus régulière (Figure 82) que celle observée au piedmont du Rio Béni. Les échantillons de sédiments du fond du Rio Mamoré dans les



Llanos présentent des  $d_{50}$  variant de 0.02 à 0.08 mm, pour une valeur moyenne de 0.04 mm (Taborga, 1963), alors que ceux du Rio Itenez ont un  $d_{50}$  moyen de 0.34 mm (Taborga, 1967).

Les matières particulaires de fond des fleuves andins de Bolivie (Rios Béni et Mamoré), ont des dimensions plus faibles que celles observées dans le bassin amazonien brésilien, où le Rio Madeira à sa confluence avec l'Amazone se distingue par des sédiments plus fins avec un  $d_{50}$  de 0.17 mm (Mertes, 1985). Le Rio Mamoré présente des sédiments dont le  $d_{50}$  est trois fois plus faible que ceux du Rio Béni. Ces caractéristiques sédimentaires sont à rattacher à la différence de pente entre ces deux cours d'eau, ainsi qu'à l'extension des plaines d'inondation qui sont 7 fois plus étendues dans le bassin du Rio Mamoré. Les sédiments plus grossiers du fond du Rio Itenez correspondent probablement à des caractéristiques hydrauliques anciennes. La remontée récente du seuil hydrologique a créé des conditions de sédimentation dans les Llanos de Bolivie, différentes de celles observée sur l'Amazone.



**V.B.2. Matières en suspension (M.E.S.).**

La granulométrie des matières en suspension a été réalisée afin d'estimer la variabilité temporelle et régionale de la taille des particules transportées par les cours d'eau de l'Amazonie bolivienne. Cette granulométrie a été déterminée sur des échantillons prélevés en Mars 1988, en période de crue, sur quelques cours d'eau andins du bassin du Rio Béni (Figures 83 et 87).

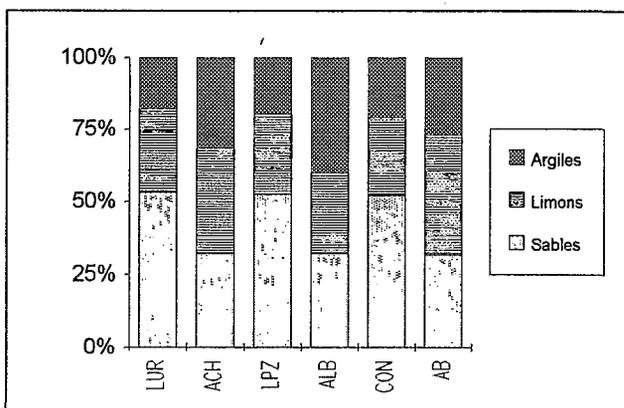


Figure 83 : Granulométrie des matières en suspension en hautes eaux, dans le bassin andin du Rio Béni (d'après M.C. Barragan, 1990). [Voir code des stations dans le tableau XIX, Argiles= $d < 2 \mu\text{m}$ , Sables= $d > 63 \mu\text{m}$ ]. Granulometria de la materias en suspensión en la cuenca andina del Río Beni. TSS granulometry of the andean Beni river drainage basin.

Dans les Andes, les matières en suspension sont des limons ou des sables fins, qui présentent des  $d_{50}$  variant de 0.02 à 0.10 mm. Les dimensions des matières en suspension (MES) dans les Andes sont donc du même ordre de grandeur que celles des sédiments de fond en plaine amazonienne.

Dans les Llanos, certains échantillons provenant des stations du réseau PHICAB au cours du cycle hydrologique 1986-1987, ont fait l'objet de déterminations granulométriques (Tableau XVIII). Les résultats obtenus indiquent que sur l'ensemble du bassin, les matières en suspension sont essentiellement silteuses, et le pourcentage de sables fins reste toujours faible. Les teneurs en argiles semblent être liées à l'aridité, avec un maximum observé sur le Rio Grande à Abapo (23%) qui draine un bassin semi-aride, et un minimum sur le Rio Ichilo à Puerto Villarroel (11%) issu du Chaparé hyper-humide.

5. Les matières particulaires.

**Tableau XVIII** : Caractéristiques granulométriques des matières en suspension des fleuves andins de l'Amazonie bolivienne. *Características granulométricas de las MES de los rios de la cuenca amazónica de Bolivia. TSS granulometric characteristics of the bolivian Amazon river drainage basin.*

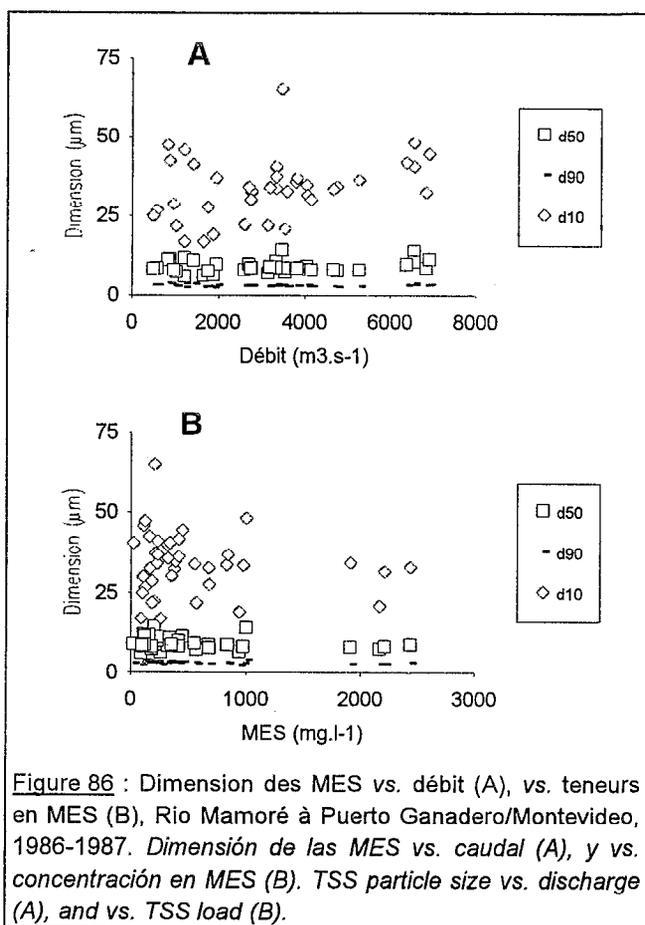
Rio	Station	Dist. (km)	Nb éch.	d50 (µm)	d90 (µm)	d10 (µm)	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)
Béni	Angosto del Bala	810	4	11.0	3.4	39.8	15.8	81.8	2.4
Béni	Portachuelo	200	4	12.0	3.4	41.2	16.1	81	2.9
Béni	Cachuela Esperanza	30	4	9.4	3.1	37.0	17.6	79.6	2.8
Grande	Abapo	1725	4	7.1	2.9	20.5	22.7	76.8	0.5
Ichilo	Puerto Villarroel	1487	4	12.7	4.0	36.5	10.6	85.7	3.7
Mamoré	Puerto Ganadero	920	39	9.0	3.0	33.9	18.8	78.3	2.9
Mamoré	Puerto Siles	436	36	8.1	2.9	28.0	21.8	75.7	2.5
Mamoré	Guayaramerin	55	3	9.4	3.1	32.0	17.5	80.1	2.4

Dist. = Distance depuis Villabella, Nb éch. = Nombre d'échantillons analysés.

Les courbes granulométriques montrent que la variabilité de la taille des matières en suspension est plus importante au cours du cycle hydrologique à une station, que d'une station à une autre pour le même cours d'eau (Figures 84 & 85).

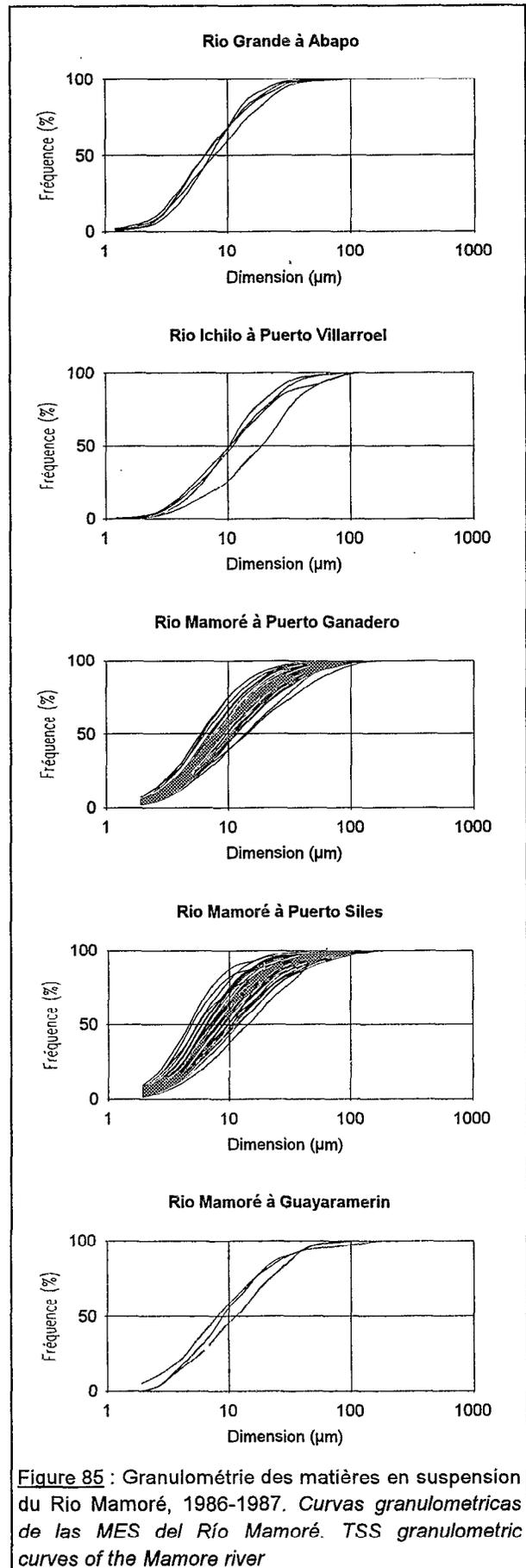
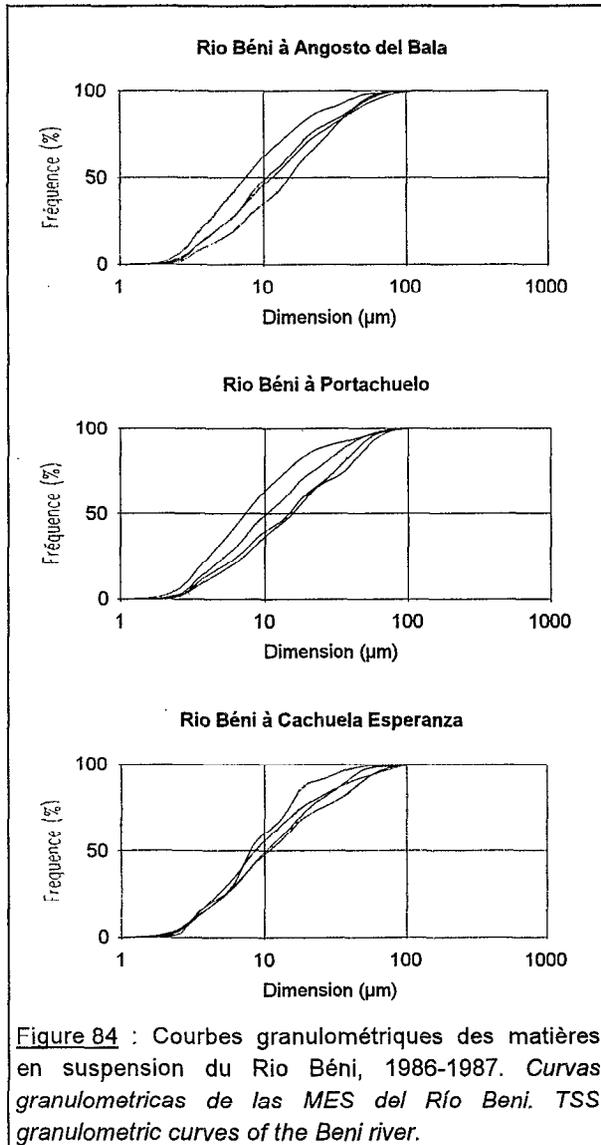
La taille moyenne des matières en suspension sur l'ensemble des stations est comparable, avec un  $d_{50}$  variant de 7 à 13 µm (silts fins). Le diamètre caractéristique des matières en suspension varie de 2 à 20 µm sur l'Amazonie (Meade, 1985), de 6 à 16 µm sur le Paraná (Drago & Amsler, 1988), alors que sur le Congo, le  $d_{50}$  varie de 9 à 14 µm (Jouanneau & al., 1990; Tastet & al., 1989). Comme pour les sédiments de fond, cette dimension des particules n'évolue pas de façon significative d'amont en aval. Les matières en suspension des deux grands fleuves (Rio Béni et Rio

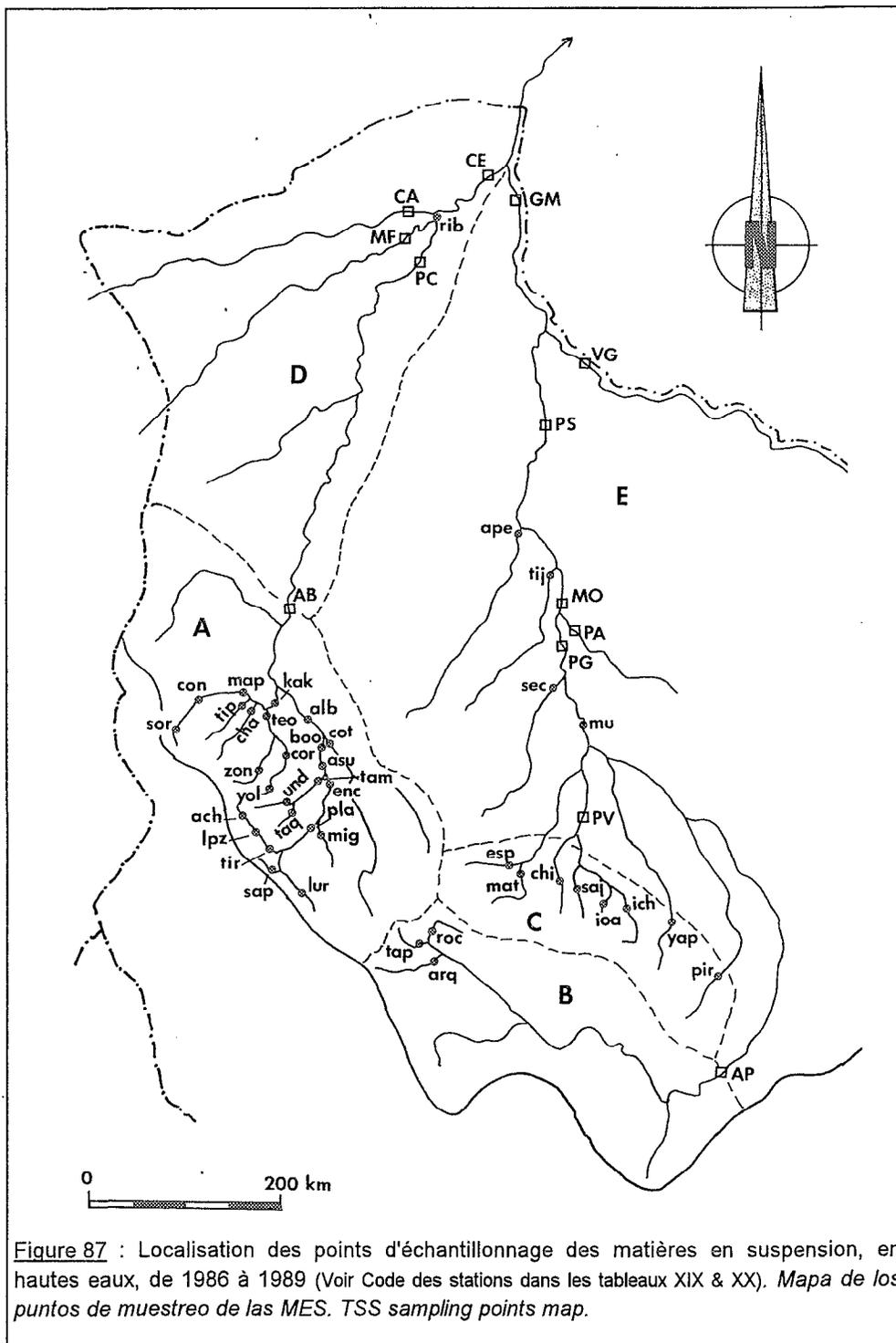
Mamoré) sont de même taille ( $d_{50} = 9 \mu\text{m}$ ), ce qui équivaut au 1/10<sup>ème</sup> environ de la taille des sédiments de fond.



L'analyse granulométrique systématique des matières en suspension au cours du cycle hydrologique, a été réalisée sur les échantillons décennaux de deux stations du Rio Mamoré (Puerto Ganadero-Montevideo et Puerto Siles-Cooperativa). Les résultats obtenus montrent que les dimensions des matières en suspension ( $d_{50}$ ,  $d_{10}$  et  $d_{90}$ ) varient peu au cours de l'année, et qu'il n'existe aucune relation liant les diamètres caractéristiques au débit ou aux teneurs en matières en suspension (Figure 86).

La granulométrie des matières en suspension du Rio Itenez, issu du bouclier brésilien, n'a pas été effectuée compte tenu des très faibles teneurs observées dans ce cours d'eau (en moyenne 30 mg.l<sup>-1</sup>).



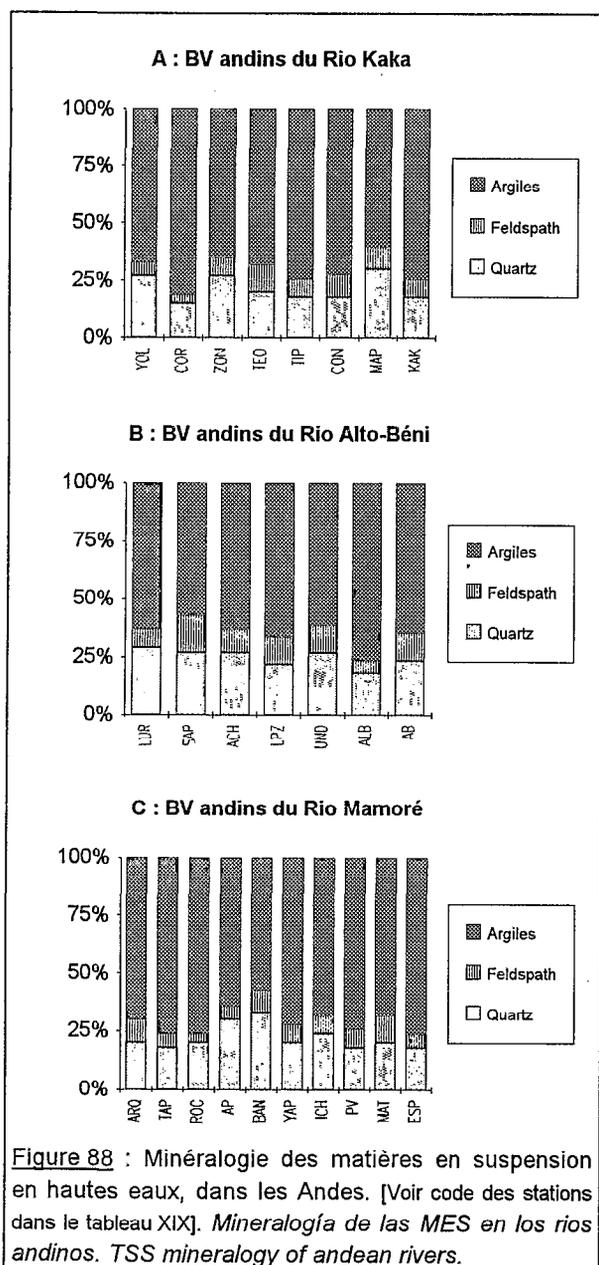


**V.C. LA MINÉRALOGIE.**

**V.C.1. Minéralogie globale.**

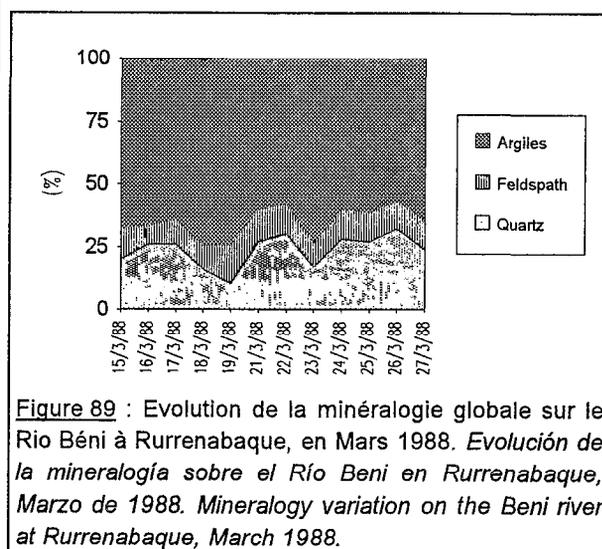
**V.C.1.a. Dans les Andes.**

Des déterminations minéralogiques globales semi-quantitatives ont été effectuées sur des échantillons de matières en suspension de quelques tributaires andins des rios Béni et Mamoré (Figure 87), prélevés de 1986 à 1989 en périodes de hautes eaux (Novembre à Mars). Les résultats obtenus (Tableau XIX) montrent une nette prédominance du matériel argileux sur l'ensemble des cours d'eau andins, avec des proportions allant de 57 à 76%. Le Quartz représente de 15 à 33% des



matières en suspension, et les teneurs en feldspath (plagioclases et alcalins indifférenciés) varient de 4 à 16% (Figure 88). Ces pourcentages diffèrent de ceux observés pour la granulométrie des matières en suspension de ces mêmes cours d'eau (Figure 83), du fait que certaines argiles minéralogiques dépassent sous forme d'agglomérats les 2  $\mu\text{m}$ , limite conventionnelle pour les argiles en granulométrie.

La variation saisonnière de la minéralogie globale des matières en suspension a été appréhendée, grâce aux échantillons journaliers de la crue de Mars 1988 du Rio Béni à Rurrenabaque (Figure 89). Les teneurs relatives en quartz, feldspath et argiles varient respectivement de 10 à 32%, de 8 à 16%, et de 57 à 74% au cours de la crue. Cette variabilité en hautes eaux de la minéralogie globale est au moins équivalente à celle observée à un moment donné sur l'ensemble des cours d'eau andins (Figure 88), comme cela a été observé pour la granulométrie.



### V.C.1.b. Dans les Llanos.

Quelques échantillons de sédiments ont été prélevés en Octobre 1987 aux stations du réseau PHICAB (Figure 87), permettant ainsi de comparer la minéralogie globale des matières en suspension, avec celle des sédiments du lit des cours d'eau (Tableau XX). Ces échantillons présentent une gamme de variation plus importante, qui reflète en réalité l'absence de représentativité d'un seul échantillon ponctuel. Cependant, une tendance à l'augmentation des teneurs en quartz au détriment des teneurs en argiles est observée, ce qui correspond en fait à une granulométrie plus grossière. Ce décalage est d'ailleurs nettement plus grand pour le Rio Béni, où le  $d_{50}$  des échantillons de fond est trois fois plus fort que pour le Rio Mamoré.

## 5. Les matières particulaires.

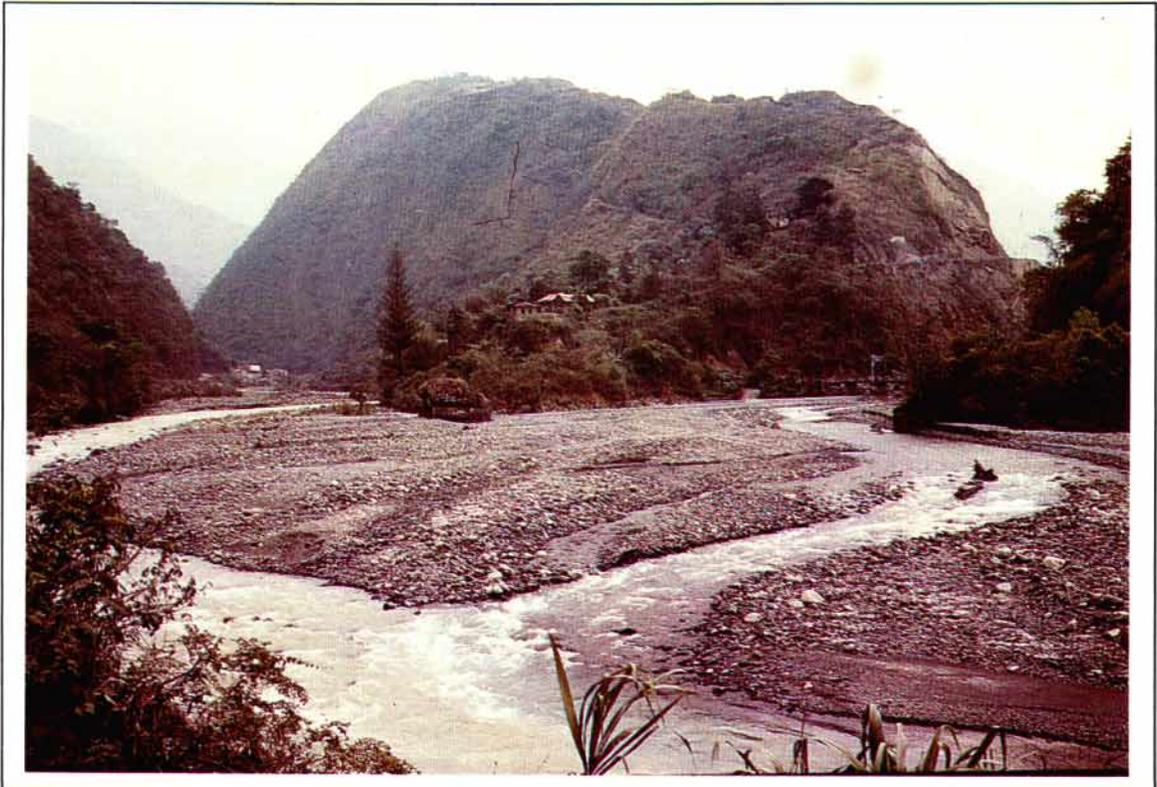
Tableau XIX : Minéralogie des matières en suspension, valeurs moyennes 1986-1989.  
*Mineralogía de las materias en suspensión. Suspended sediment mineralogy.*

Code	Rio	Nb. d'éch.	M.E.S. (mg/l)	Quar. (%)	Feld. (%)	Arg. (%)	Illite (%)	Chl. (%)	Kaol. (%)	Sme. (%)	Ver. (%)
ARQ	Arque à Capinota	1	3140	20	10	70	65	14	19	2	0
TAP	Tapacari à Parotani	2	1720	18	6	76	57	16	28	0	0
ROC	Rocha à Parotani	1	79	20	4	76					
AP	Grande à Abapo	9	16800	30	6	64	62	16	17	5	0
BAN	Grande à Puerto Banegas	2	12100	33	10	57	56	14	23	8	0
PIR	Piray à Puente Eisenhower	1	342				48	11	37	4	0
YAP	Yapacani à Yapacani	2	83	20	8	72	37	18	26	19	0
ICH	Ichilo à Puerto Grether	1	28	24	8	68					
PV	Ichilo à Puerto Villarroel	5	382	18	8	74	48	16	35	2	0
MAT	San Mateo à Villa Tunari	1	30	20	12	68					
ESP	Esperitu Santos à Villa Tunari	2	319	18	6	76	45	41	15	0	0
PA	Ibaré à Puerto Almacen	2	107				58	12	20	12	0
PG	Mamoré à Puerto Ganadero	1	679				52	19	29	0	0
PS	Mamoré à Puerto Siles	1	268				51	17	27	5	0
VG	Itenez à Vuelta Grande	2	40				59	14	29	0	0
GM	Mamoré à Guayaramerin	2	445				56	17	21	8	0
LUR	Luribay à Luribay	1	35900	29	8	63	51	7	37	5	0
SAP	Sapahaqui à Sapahaqui	1	3180	27	16	57	61	30	9	0	0
ACH	Achumani à Achumani	1	79400	27	10	63	78	12	6	4	0
LPZ	La Paz à Tahuapalca	1	12400	22	12	66	60	13	13	14	0
PLA	La Paz à La Plazuela	1	15700				43	10	32	15	0
UND	Unduavi à Puente Villa	2	708	27	12	61	46	53	0	1	1
TAQ	Taquesi à Puente Villa	1	716				68	15	15	2	0
BOO	Boopi à San Miguel Huachi	1	1040				52	28	17	3	0
ALB	Alto-Béni à Sapecho	2	5680	18	6	76	61	19	18	3	0
YOL	San Juan à Yolosa	1	289	27	6	67	59	39	0	0	2
COR	Coroico à Santa Barbara	1	624	15	4	81	71	29	0	0	0
ZON	Zongo à Islani	1	722	27	8	65	70	30	0	0	0
TEO	Coroico à Teoponte	2	751	20	12	68	60	36	3	1	1
CHA	Challana à Guanay	1	68				57	43	0	0	0
TIP	Tipuani à Guanay	2	362	18	8	74	62	16	21	2	0
CON	Consata à Consata	1	6400	18	10	72	59	34	7	0	0
MAP	Mapiri à Guanay	2	1430	30	10	60	76	20	0	0	5
KAK	Kaka à Teoponte	1	1750	18	8	74	68	26	6	0	0
AB	Béni à Angosto del Bala	17	4360	24	12	65	66	23	8	2	0
PC	Béni à Portachuelo	1	1010				67	18	15	0	0
MF	Madre de Dios à Miraflores	1	445				54	25	17	4	0

Tableau XX : Minéralogie des sédiments, stations du réseau PHICAB, Octobre 1987.  
*Mineralogía de los sedimentos de fondo. Bottom sediment mineralogy.*

Code	Rio	Nb. d'éch.	Quar. (%)	Feld. (%)	Arg. (%)	Illite (%)	Chl. (%)	Kaol. (%)	Sme. (%)	Ver. (%)
AP	Grande à Abapo	1	26	8	66	65	10	21	4	0
PV	Ichilo à Puerto Villarroel	1	15	8	77	59	9	27	5	0
MU	Mamoré à Muyurina	1	30	14	56	34	15	34	17	0
PG	Mamoré à Puerto Ganadero	1	36	5	59	36	5	50	9	0
PS	Mamoré à Puerto Siles	1	29	12	59	42	12	31	15	0
GM	Mamoré à Guayaramerin	1	46	8	46	37	10	37	16	0
AB	Béni à Angosto del Bala	1	70	5	25	62	27	11	0	0
PC	Béni à Portachuelo	1	46	16	38	52	18	21	9	0
MF	Madre de Dios à Miraflores	1	24	6	70	43	14	21	22	0
CA	Orthon à Caracoles	1	65	16	19	27	3	16	54	0
CE	Béni à Cachuela Esperanza	1	58	12	30	50	18	18	14	0

(Nb. d'éch.=nombre d'échantillons, MES=teneur en matières en suspension, Quar.=Quartz, Feld.=Feldspath, Arg.=Argiles, Chl.=Chlorite, Kaol.=Kaolinite, Sme.=Smectite, Ver.=Vermiculite).



↑ **Photo 26** : La confluence des rios Taquesi et Unduavi à Puente Villa (1200 m). *La confluencia de los rios Taquesi y Unduavi en Puente Villa. The Taquesi and Unduavi rivers confluence at Puente Villa.*

↓ **Photo 27** : La confluence des rios Consata et Camata (750 m) près de Mapiri. *La confluencia de los rios Consata y Camata cerca de Mapiri. The Consata and Camata rivers confluence near Mapiri.*



### V.C.2. Minéralogie des argiles.

#### V.C.2.a. Dans les Andes.

La minéralogie de la phase argileuse des matières en suspension des rivières andines présente des variations géographiques plus importantes que celles observées pour la minéralogie globale (Figure 90 & Tableau XIX). Le minéral argileux dominant dans tous les cours d'eau des Andes est l'illite, mis à part le Rio Unduavi où prédomine la chlorite. La kaolinite arrive en seconde position pour les cours d'eau andins du Rio Mamoré, ainsi que sur quelques rivières de l'Alto-Béni. La chlorite est manifestement le deuxième minéral argileux observé dans le bassin du Rio Kaka, sauf pour le Rio Tipuani où des teneurs plus élevées en kaolinite sont notées. Cette différence de composition minéralogique des matières en suspension, observée entre le Rio Tipuani et le Rio Challana, cours d'eau de vallées adjacentes aux caractéristiques topographiques, géologiques et climatologiques voisines, est probablement due à l'exploitation aurifère intense de placers alluviaux dans la vallée du Rio Tipuani, par remise en suspension de dépôts sédimentaires tertiaires (Guyot & Héraïl, 1989). La smectite apparaît sur les bassins andins du Mamoré et de l'Alto-Béni, mais est absente des cours d'eau du bassin du Rio Kaka, sauf dans le cas du Rio Tipuani. La smectite semble donc être liée à la Kaolinite. La vermiculite est plus rarement observée, principalement sur les rivières du bassin du Rio Kaka.

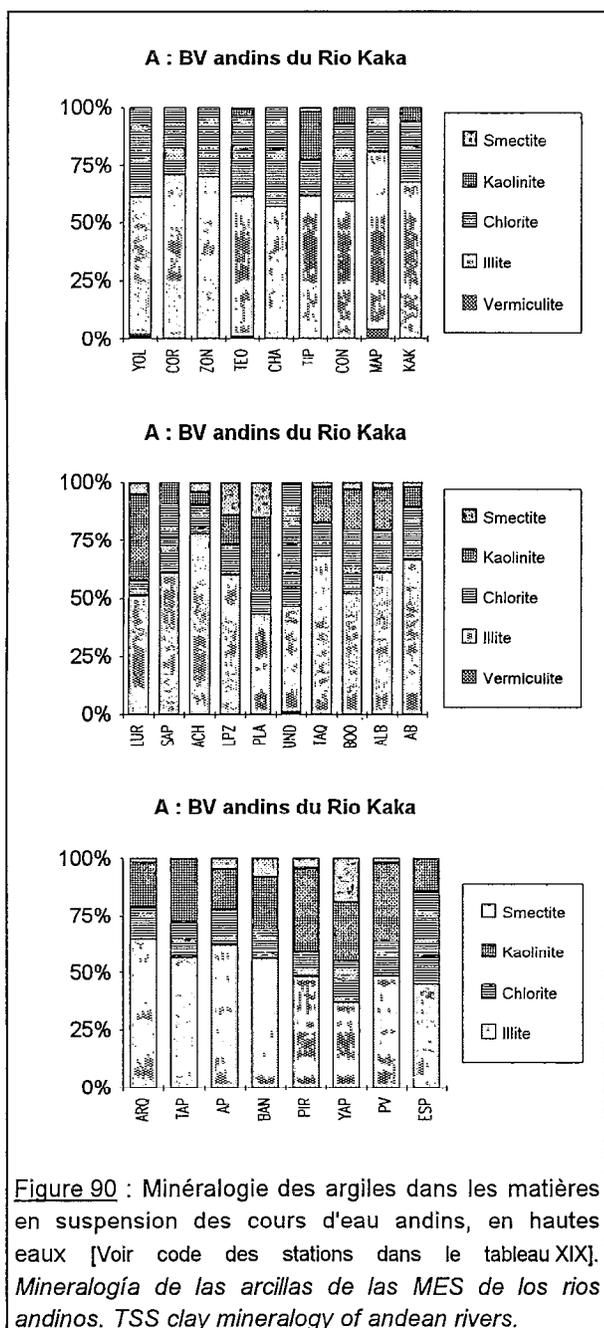


Figure 90 : Minéralogie des argiles dans les matières en suspension des cours d'eau andins, en hautes eaux [Voir code des stations dans le tableau XIX]. *Mineralogía de las arcillas de las MES de los ríos andinos. TSS clay mineralogy of andean rivers.*

L'illite et la vermiculite dérivent de l'altération des micas (argiles micacées), et proviennent respectivement de la dégradation de la muscovite et de la biotite (Duchaufour, 1991). La kaolinite et la smectite proviennent d'une altération géochimique sous climat chaud et humide. La différenciation entre ces deux espèces minéralogiques est conditionnée, d'une

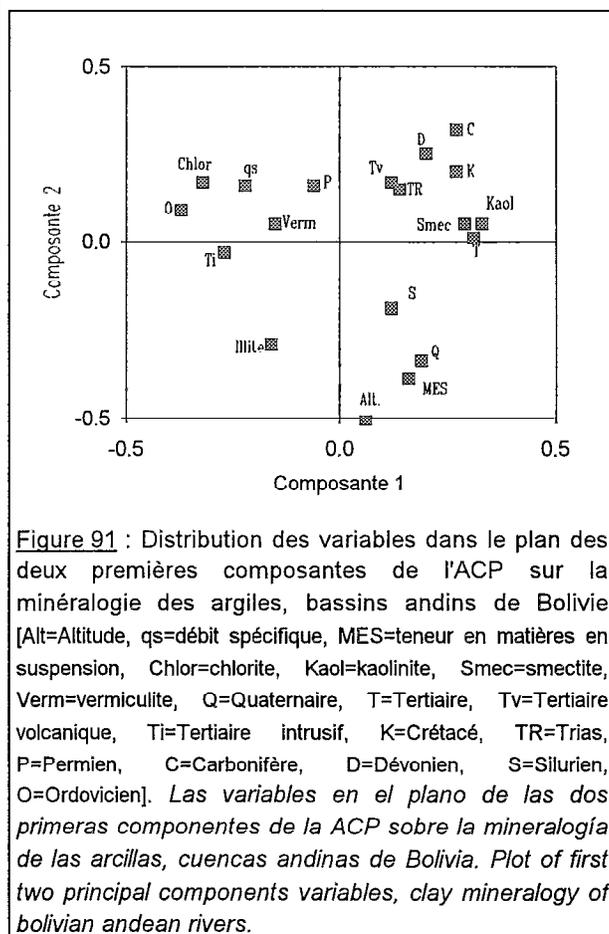


Figure 91 : Distribution des variables dans le plan des deux premières composantes de l'ACP sur la minéralogie des argiles, bassins andins de Bolivie [Alt=Altitude, qs=débit spécifique, MES=teneur en matières en suspension, Chlor=chlorite, Kaol=kaolinite, Smec=smectite, Verm=vermiculite, Q=Quaternaire, T=Tertiaire, Tv=Tertiaire volcanique, Ti=Tertiaire intrusif, K=Crétacé, TR=Trias, P=Permien, C=Carbonifère, D=Dévonien, S=Silurien, O=Ordovicien]. *Las variables en el plano de las dos primeras componentes de la ACP sobre la mineralogía de las arcillas, cuencas andinas de Bolivia. Plot of first two principal components variables, clay mineralogy of bolivian andean rivers.*

part par la nature de la roche mère, d'autre part par les conditions de drainage. Ainsi, dans un milieu confiné, il y a néoformation de smectite-montmorillonite (bisiállításion), alors qu'un milieu lessivant à semi-confiné est le siège de monosiallitisésion entraînant la néoformation de kaolinite (Pedro, 1968).

Au Brésil, les cours d'eau andins du bassin amazonien sont caractérisés par des matières en suspension riches en illite et en chlorite (Irion, 1983, 1984; Irion & Zöllmer, 1990), qui correspondent à des minéraux argileux produit par érosion physique (Gibbs, 1967). En zone tempérée, l'illite est fréquemment le minéral argileux dominant (Meybeck, 1970; Walling & Kane, 1982; Probst, 1983; 1986; Probst & Bazerbach, 1986).

Les données obtenues dans les Andes boliviennes confirment les observations réalisées au Brésil. Toutefois, dans certaines régions, les teneurs en kaolinite et smectite, liées à l'altération géochimique, peuvent atteindre 40% du cortège argileux (Rios La Paz, Luribay, Piray et Yapacani). Sur l'Altiplano, les cours d'eau du versant péruvien du lac Titicaca (rios Ramis, llave et Coata), ainsi que le Rio Desaguadero, qui traversent les séries sédimentaires quaternaires présentent des matières en suspension riches en montmorillonite. Par contre, le Rio Suches qui ne traverse pas ces dépôts sédimentaires montre un cortège argileux où domine l'illite (Boulangé & al., 1978, 1981).

Une analyse factorielle en composantes principales (ACP), sur variables centrées réduites, a été effectuée sur l'ensemble des données des 27 cours d'eau andins, afin d'essayer de déterminer l'origine des différentes argiles. Outre les teneurs relatives des minéraux argileux (illite, chlorite, kaolinite, smectite et vermiculite), les variables utilisées sont : l'altitude de la station, le débit spécifique (ou ruissellement), la concentration en matières en suspension, et le pourcentage d'affleurement sur le bassin versant des différentes séries géologiques, d'après la carte géologique de Bolivie au 1/1,000,000<sup>ème</sup> (YPFB/GEOBOL, 1978). Les résultats obtenus sur les deux premières composantes (Figure 91), qui représentent 46% de la variance totale, permettent de distinguer certaines tendances quant à l'origine des minéraux argileux. Le premier axe (abscisses) peut être assimilé à un axe d'altération géochimique, car les minéraux argileux produit par cette altération (kaolinite et smectite) s'opposent aux minéraux peu altérés produit par l'érosion physique des Andes (illite, chlorite et vermiculite). Le second axe (ordonnées) correspond aux altitudes décroissantes. Les matières en suspension (MES) sont très liées aux séries sédimentaires quaternaires (Q) et dans une moindre mesure à l'altitude, et sont opposées au ruissellement (qs). Les bassins à forte production de MES sont effectivement ceux des régions semi-arides de La Paz-Luribay et du bassin du Rio Grande, qui correspondent à ces caractéristiques. L'altitude, et par conséquent la couverture forestière, ne sont pas des facteurs déterminants pour la minéralogie des argiles, qui semble plus liée à la nature géologique des bassins versants. La production de chlorite est liée au fort ruissellement, mais surtout à l'abondance de l'Ordovicien (O), ainsi que dans une moindre mesure au Tertiaire intrusif (granites). L'illite semble

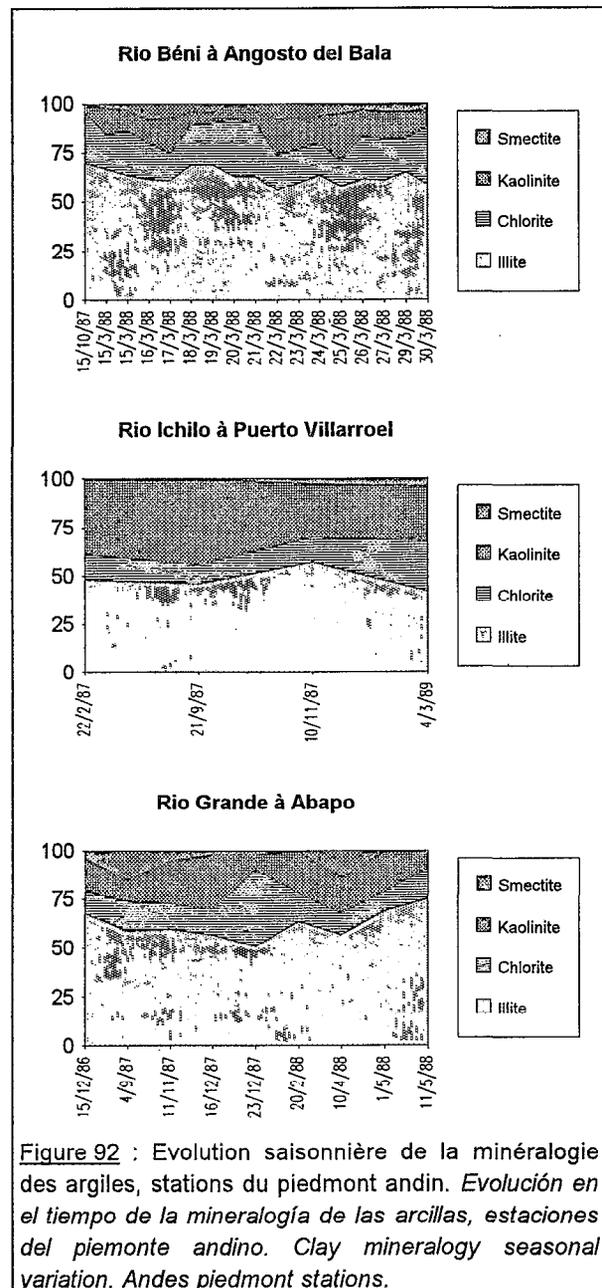


Figure 92 : Evolution saisonnière de la minéralogie des argiles, stations du piedmont andin. *Evolución en el tiempo de la mineralogía de las arcillas, estaciones del piemonte andino. Clay mineralogy seasonal variation, Andes piedmont stations.*

indépendante des paramètres choisis. La production de kaolinite et de smectite est fortement liée aux séries sédimentaires du Tertiaire (T).

L'évolution saisonnière des différents minéraux argileux a pu être suivie sur les trois stations du PHICAB situées au piedmont andin (Figure 92). La comparaison des figures 90 et 92 montre que la variabilité régionale de la minéralogie des argiles est plus grande que la variabilité temporelle au cours du cycle hydrologique, à une station donnée.

Les variations observées dans la composition du cortège argileux correspondent donc aux apports relatifs de régions différentes, où deux bassins voisins peuvent présenter une minéralogie contrastée, comme cela est observé entre le bassin du Rio Kaka et celui du Rio Alto-Béni, tous deux formateurs du Rio Béni à Angosto del Bala. La présence de kaolinite et de smectite dans les sédiments tertiaires de certains bassins andins (Alto-Béni et Grande) indique que ces régions ont été soumises à une altération géochimique sous climat chaud au cours de leur histoire géologique, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui pour certaines d'entre elles (Altiplano, bassin du Rio La Paz). La minéralogie des MES correspond alors à l'héritage d'une altération géochimique plus ancienne.

### V.C.2.b. Dans les Llanos.

La minéralogie des argiles des cours d'eau des Llanos, a été étudiée à partir des matières en suspension, mais aussi avec des sédiments prélevés sous le niveau de l'eau, pour les fleuves dont la charge en matières particulaires est faible (Tableaux XIX & XX). La relation entre les échantillons du fond et ceux des MES pour la même date, montre que les teneurs en illite et kaolinite, qui

représentent dans les Llanos l'essentiel des minéraux argileux, sont comparables (Figure 93). Par contre, les échantillons de sédiments présentent des teneurs en smectite plus élevées, et des teneurs en chlorite plus faibles, que les échantillons des matières en suspension. Ces écarts peuvent être dus à la différence de granulométrie entre échantillons de fond et matières en suspension.

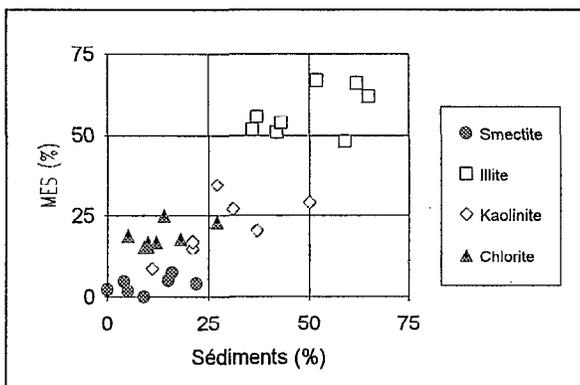


Figure 93 : Minéralogie des argiles : échantillon de MES vs. échantillon de sédiments, stations du réseau PHICAB dans les Llanos de Bolivie. *Mineralogía de las arcillas : MES vs. sedimentos del fondo, estaciones de la red PHICAB. Clay mineralogy : TSS vs. bottom sediments, PHICAB network stations.*

La distribution de la minéralogie des argiles des matières en suspension et des sédiments dans les Llanos de Bolivie permet de suivre l'évolution amont-aval le long des rios Béni et Mamoré (Figure 94). Dans le cas du Rio Béni, une décroissance des teneurs en illite-chlorite est observée de l'amont vers l'aval, surtout visible pour les échantillons de sédiments. Cette diminution des teneurs s'effectue au profit de la kaolinite, mais surtout de la smectite. Cet enrichissement en minéraux issus d'une altération plus poussée, est également observé sur le cours

de l'Amazone (Johnsson & Meade, 1990). Le Rio Orthon s'individualise nettement, avec la smectite largement dominante (54%), et la quasi-disparition de la chlorite. Ce fleuve possède la même composition argileuse que les rios Purus, Juruá et Javará qui drainent les séries tertiaires de l'avant pays andins du bassin du Rio Solimões (Irion, 1984). Enfin, le Rio Béni à Cachuela Esperanza présente une composition intermédiaire, avec prédominance des minéraux issus de l'érosion andine (Illite et chlorite : 68%), mais avec un enrichissement en kaolinite et smectite, observé au cours de la traversée des Llanos, par les apports des affluents. Le bassin du Rio Mamoré s'individualise de celui du Rio Béni, par une teneur relative en kaolinite plus élevée, qui rend la composition minéralogique de ce fleuve comparable à celles observées dans le bassin du Rio Paraguay (Depetris & Griffin, 1968; Depetris & Lenardón, 1982). Cette particularité est en fait déjà présente dans les tributaires andins du Rio Mamoré (Figure 90), et il ne semble pas que la traversée des Llanos affecte la composition minéralogique des argiles dans les matières en suspension. Par contre, un enrichissement en kaolinite et smectite est observé pour les échantillons de sédiments où la kaolinite peut devenir localement le minéral argileux dominant. La minéralogie du Rio Ibaré (fleuve de plaine) est

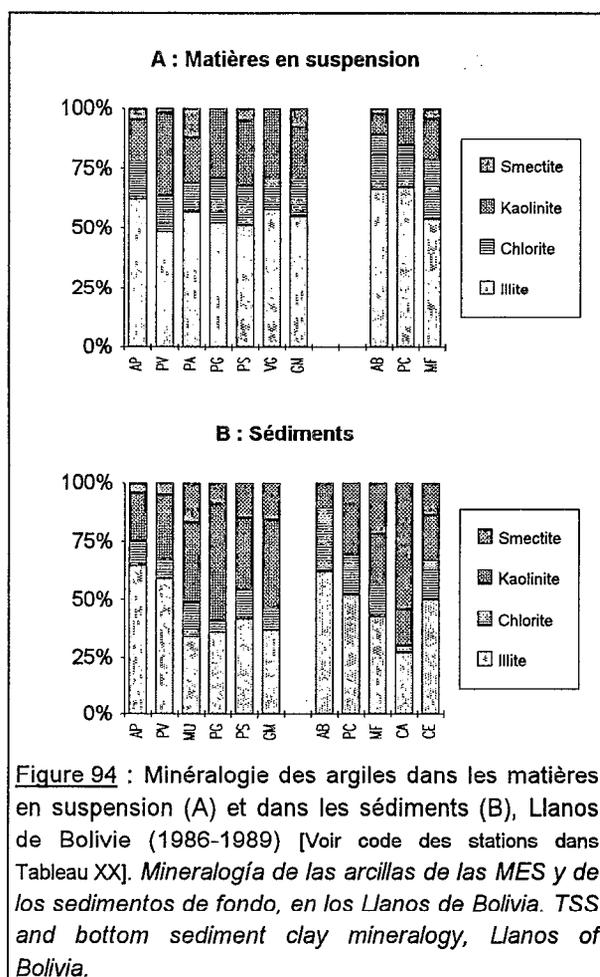


Figure 94 : Minéralogie des argiles dans les matières en suspension (A) et dans les sédiments (B), Llanos de Bolivie (1986-1989) [Voir code des stations dans Tableau XX]. *Mineralogía de las arcillas de las MES y de los sedimentos de fondo, en los Llanos de Bolivia. TSS and bottom sediment clay mineralogy, Llanos of Bolivia.*

comparable à celle du Rio Mamoré d'origine andine, avec toutefois une teneur en smectite plus élevée, voisine de celle mesurée dans les sédiments de cette région. En fait, les sédiments du Rio Ibaré proviennent de l'invasion des eaux du Rio Mamoré lors des périodes d'inondations, le sens de l'écoulement du Rio Ibaré pouvant alors s'inverser (Guyot & al., 1991). Enfin, le Rio Itenez dont une grande partie du bassin versant (66%) draine les affleurements du bouclier brésilien, montre un cortège argileux semblable à celui du Rio Mamoré, alors que les cours d'eaux du bassin amazonien issus du socle ont généralement un faciès à kaolinite dominante (Irion, 1984), ainsi que les fleuves de l'Afrique tropicale (Chouret, 1977; Eisma & al., 1978; Gac, 1980; Gac & Kane, 1986; Jouanneau & al., 1990; Orange, 1990; Orange & Gac, 1990). Comme dans le cas du Rio Ibaré, les matières en suspension du Rio Itenez à Vuelta Grande doivent provenir de l'invasion en hautes eaux de matériel sédimentaire du Rio Mamoré.

Contrairement à ce qui est observé dans l'avant-pays andin du bassin du Rio Solimões, il n'y a pas en Bolivie de passage d'une argile à prédominance illite-chlorite à une argile à smectite dominante le long d'un même cours d'eau. Cette différence provient de la nature des dépôts sédimentaires, la montmorillonite du bassin amazonien étant liée

à la présence de roches calcaïques dans le bassin versant (Gibbs, 1967). Aussi, malgré une légère augmentation en smectite et en kaolinite, les grands fleuves de l'Amazonie bolivienne conservent un caractère minéralogique andin marqué par une nette prédominance de produit d'érosion mécanique.

En utilisant les résultats sur la minéralogie des argiles obtenus sur le Rio Béni et le Rio Mamoré, pondérés par la valeur des flux de matières en suspension de chacun de ces deux fleuves, la composition minéralogique de la phase argileuse du Rio Madeira à Villabella a pu être estimée (Figure 95).

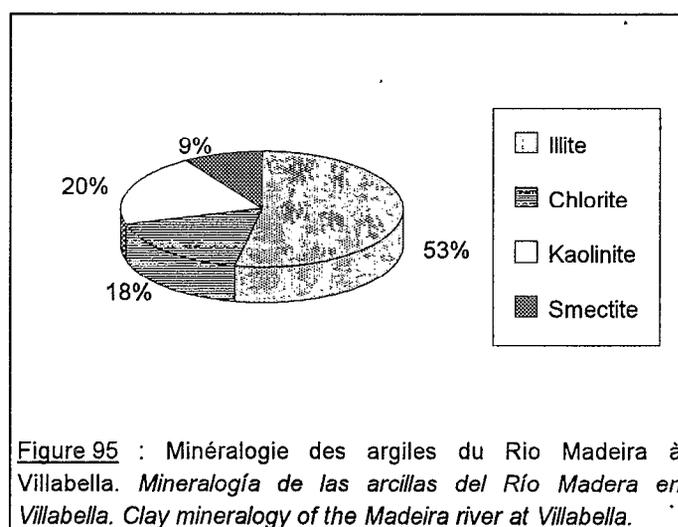


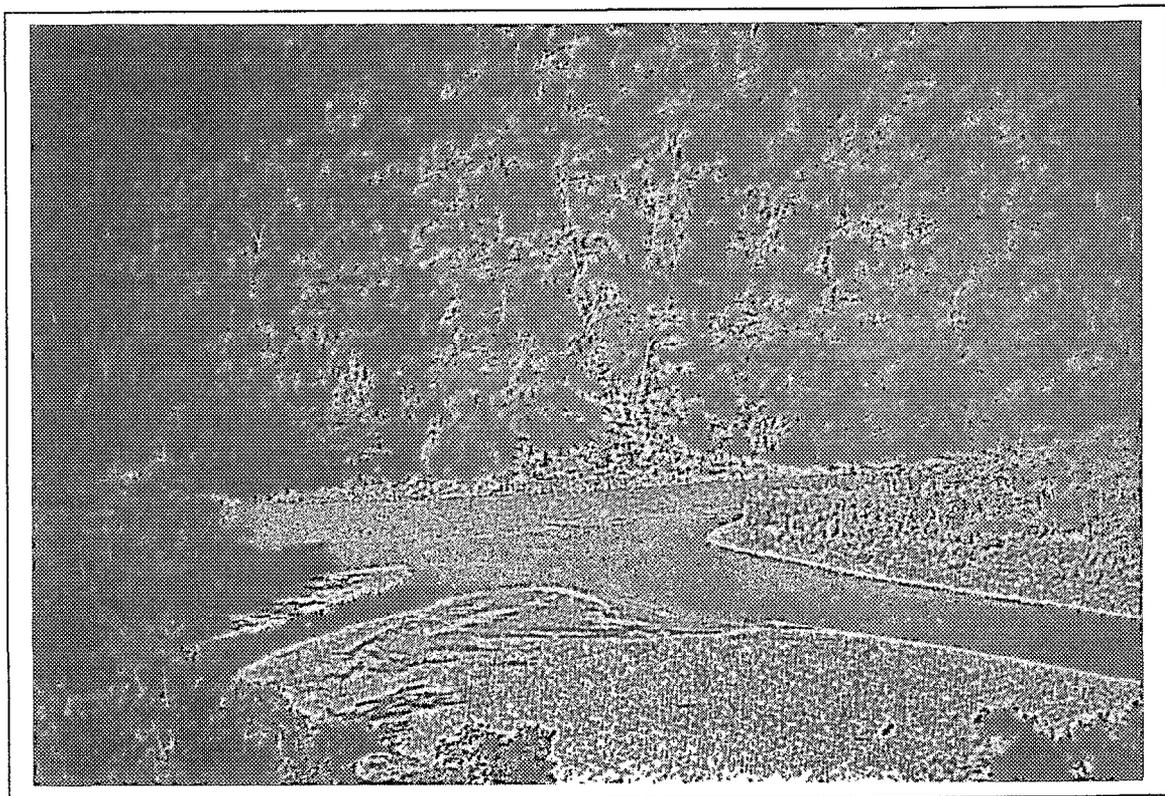
Figure 95 : Minéralogie des argiles du Rio Madeira à Villabella. *Mineralogía de las arcillas del Río Madera en Villabella. Clay mineralogy of the Madeira river at Villabella.*



Photo 28 : L'exploitation aurifère dans les alluvions du Rio Tipuani (600 m). *Explotación del oro en el Río Tipuani. Gold alluvial working in the Tipuani river.*



Photo 29 : La confluence des rios Mapiri et Coroico (450 m). *La confluencia de los rios Mapiri y Coroico. The Mapiri and Coroico rivers confluence.*



**V.D. LA GEOCHIMIE.**

L'analyse géochimique (éléments majeurs et traces) a été réalisée sur une cinquantaine d'échantillons de matières en suspension, et une dizaine d'échantillons de sédiments (Tableaux XXI à XXIV).

**V.D.1. Les éléments majeurs.**

**V.D.1.a. Dans les Andes.**

La distribution géographique des éléments majeurs dans les matières en suspension montre une grande stabilité régionale des teneurs (Tableau XXI & Figure 97), avec des coefficients de variation ne dépassant pas la valeur de 0.7. Les éléments qui présentent la plus grande variation (Na, Ca, Mg) sont les éléments les plus solubles (Martin & Meybeck, 1979; Walling & Kane, 1982). Dans les bassins andins, ces éléments sont surtout présents dans les zones semi-arides et sont donc inversement proportionnels au ruissellement (Figure 96).

La perte au feu à 1000°C est ici un indicateur de pollution organique affectant le Rio La Paz (Roche et al. 1986, Guyot & al., 1989), mais aussi le Rio Coroico-Kaka qui draine une région à forte production agro-

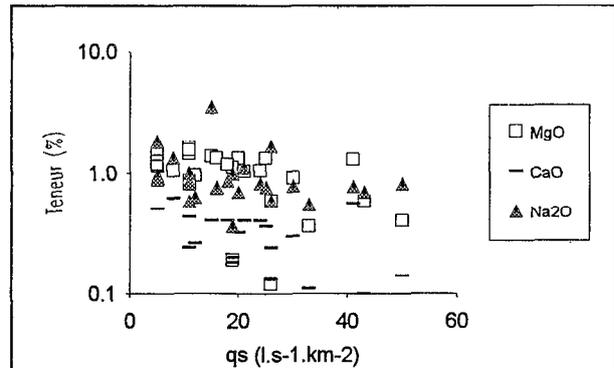


Figure 96 : Teneur relative en MgO, CaO et Na<sub>2</sub>O des matières en suspension vs. débit spécifique, bassins andins de Bolivie, 1986-1989. Concentraciones relativas de las MES vs. caudal, cuencas andinas de Bolivia. TSS relative contents vs. discharge, bolivian andean drainage basins.

alimentaire (vallée de Caranavi). P présente également un pic sur le Rio La Paz, en relation avec une contamination organique Le Rio Taquesi s'individualise par des teneurs relativement plus fortes en Ti et Mn, alors que Na est particulièrement bien représenté sur le Rio Boopi.

Le rapport  $R = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ , permet de mettre en évidence un appauvrissement en éléments mobiles dû à un lessivage plus important dans les régions les plus humides (Tardy, 1969; Gac, 1980; Orange, 1990). Dans les Andes de Bolivie, ce rapport varie de 1.8 à 2.7, et il est dans l'ensemble inversement proportionnel au ruissellement (Figure 98), mise à part la valeur observée sur le Rio Zongo.

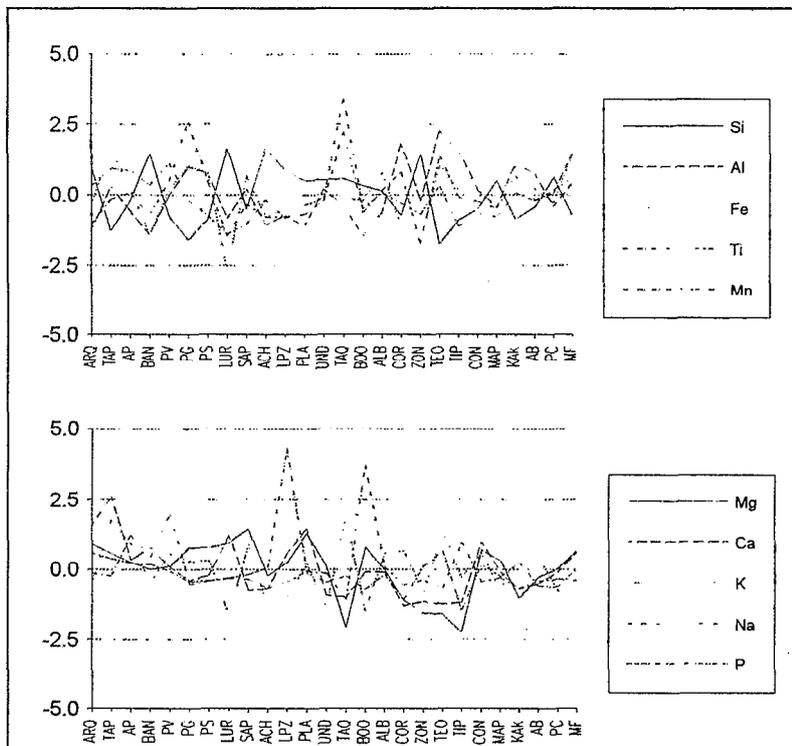


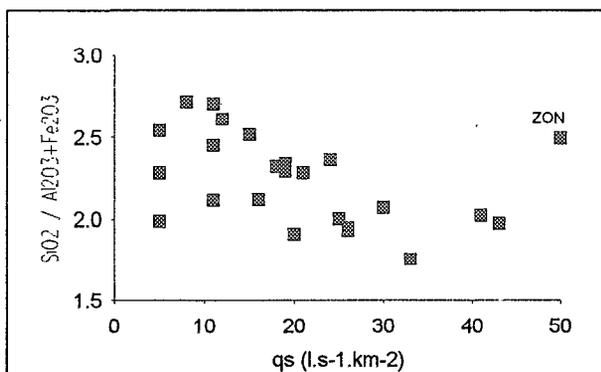
Figure 97 : Géochimie (éléments majeurs) des matières en suspension en hautes eaux, en Amazonie bolivienne, variables centrées réduites (Voir code des stations dans Tableau XIX). Geoquímica (elementos mayores) de las MES. TSS geochemistry (major elements).

5. Les matières particulaires.

**Tableau XXI** : Géochimie des matières en suspension (1986-1989), éléments majeurs, valeurs moyennes.  
*Geoquímica de las materias en suspensión (elementos mayores).*  
*Suspended sediment geochemistry (major elements).*

Code	Nb d'éch	M.E.S. (mg/l)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	TiO2 (%)	K2O (%)	Na2O (%)	P2O5 (%)	P.Feu (%)	R
ARQ	1	3140	62.1	16.7	7.7	0.09	1.43	0.82	0.83	3.34	0.97	0.23	5.6	2.5
TAP	2	1720	55.6	19.1	8.9	0.10	1.26	1.05	0.98	4.07	0.89	0.22	7.7	2.0
AP	7	20000	59.1	17.8	8.1	0.10	1.15	0.51	1.04	3.84	1.85	0.22	6.1	2.3
BAN	2	12100	63.3	16.4	6.9	0.09	1.05	0.62	0.90	3.34	1.35	0.22	5.7	2.7
PV	2	589	57.0	18.6	7.9	0.11	1.07	0.43	1.09	3.66	2.31	0.21	7.5	2.2
PG	1	679	54.5	20.2	8.4	0.08	1.34	0.32	1.47	3.52	0.70	0.20	8.3	1.9
PS	1	268	55.9	19.7	8.2	0.06	1.33	0.36	1.08	3.51	0.77	0.20	8.8	2.0
LUR	1	35900	64.0	17.6	6.1	0.05	1.45	0.73	0.75	2.94	0.86	0.21	5.3	2.7
SAP	1	3180	58.2	19.2	8.3	0.06	1.64	0.24	0.96	3.82	0.82	0.21	6.5	2.1
ACH	1	79400	64.5	17.3	7.5	0.08	0.96	0.26	0.89	3.06	0.63	0.22	4.6	2.6
LPZ	1	12400	46.7	13.3	5.7	0.05	0.87	0.43	0.67	2.39	0.58	0.24	28.9	2.4
PLA	1	15700	60.2	16.7	7.9	0.07	1.57	0.78	0.89	3.54	1.00	0.21	6.9	2.5
UND	1	1250	62.4	19.8	7.4	0.08	1.12	0.20	1.01	3.10	0.99	0.21	3.6	2.3
TAQ	1	716	61.1	18.3	7.9	0.16	0.19	0.18	1.45	4.19	0.36	0.21	5.8	2.3
BOO	1	1040	60.8	16.3	7.8	0.07	1.38	0.40	0.91	2.98	3.54	0.20	5.4	2.5
ALB	2	5680	59.7	17.8	8.4	0.09	1.04	0.40	1.05	3.71	1.12	0.21	6.3	2.3
COR	1	624	57.9	22.2	7.1	0.08	0.59	0.10	1.17	3.75	0.70	0.19	6.2	2.0
ZON	1	722	63.7	18.7	6.8	0.07	0.40	0.14	0.70	3.23	0.82	0.22	5.2	2.5
TEO	1	1430	50.5	21.0	7.9	0.08	0.36	0.11	1.17	3.65	0.55	0.21	14.4	1.8
TIP	1	346	57.2	21.6	8.0	0.06	0.12	0.13	1.00	3.38	1.69	0.18	6.4	1.9
CON	1	6400	58.6	19.3	8.4	0.07	1.34	0.67	0.99	3.74	0.77	0.22	5.8	2.1
MAP	2	1430	61.0	18.2	8.1	0.06	1.18	0.40	0.94	3.24	0.87	0.21	5.7	2.3
KAK	1	1750	54.8	19.9	8.2	0.08	0.59	0.24	1.09	3.61	0.59	0.21	10.6	1.9
AB	16	4360	58.2	20.1	8.0	0.08	0.93	0.30	0.98	3.65	0.78	0.20	6.6	2.1
PC	1	1010	60.8	18.1	7.7	0.08	1.05	0.40	1.05	3.21	0.83	0.20	6.5	2.4
MF	1	445	56.2	19.1	8.7	0.12	1.30	0.56	1.10	3.02	0.78	0.21	8.8	2.0
cv			0.07	0.10	0.09	0.29	0.41	0.59	0.18	0.11	0.64	0.06	0.63	

[Nb. d'éch.=nombre d'échantillons, P. Feu=perte au feu, R= $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ ,  
 cv (coefficient de variation)=écart type/moyenne, voir code des stations dans Tableau XIX].



**Figure 98** :  $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  vs. débit spécifique pour les bassins andins.  $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  vs. caudal específico, cuencas andinas.  $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  vs. specific discharge, andean drainage basins.

L'évolution en crue des teneurs en éléments majeurs du Rio Béni à Rurrenabaque montre que la variabilité temporelle à cette station est moins importante que la variabilité géographique des teneurs (Figure 99). Il en est de même pour les variations de ces éléments au cours du cycle hydrologique, pour les différentes stations du piedmont andin : Angosto del Bala, Puerto Villarroel et Abapo. Les variations observées lors de la crue de Mars 1988 à Rurrenabaque correspondent probablement aux apports de tributaires dont les caractéristiques géochimiques sont quelque peu différentes. Cette constance de la qualité géochimique des matières en suspension au cours du temps a été observée pratiquement sous tous les climats (Ongley, 1982; Meybeck, 1984).

**V.D.1.b. Dans les Llanos.**

La géochimie des éléments majeurs des matières en suspension aux stations de Puerto Ganadero, Puerto Siles, Portachuelo et Miraflores, est voisine de celle observée dans les Andes (Tableau XXI & Figure 97). Le rapport  $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  est inférieur ou égal à deux dans le bassin du Rio Mamoré, attestant ainsi une plus forte altération géochimique, alors que pour le Rio Béni, ce rapport (2.4) est comparable à celui des rivières andines.

Les sédiments prélevés aux stations du réseau PHICAB (Tableau XXII), présentent en plaine un léger enrichissement en  $\text{SiO}_2$  au détriment des autres éléments, du fait d'une granulométrie plus grossière. Le rapport  $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  est donc nettement plus élevé dans les sédiments que dans les matières en suspension. Toutefois, la relation générale entre les éléments majeurs des suspensions et des sédiments est bonne, attestant l'absence de modification notable de leur composition géochimique (Figure 100).

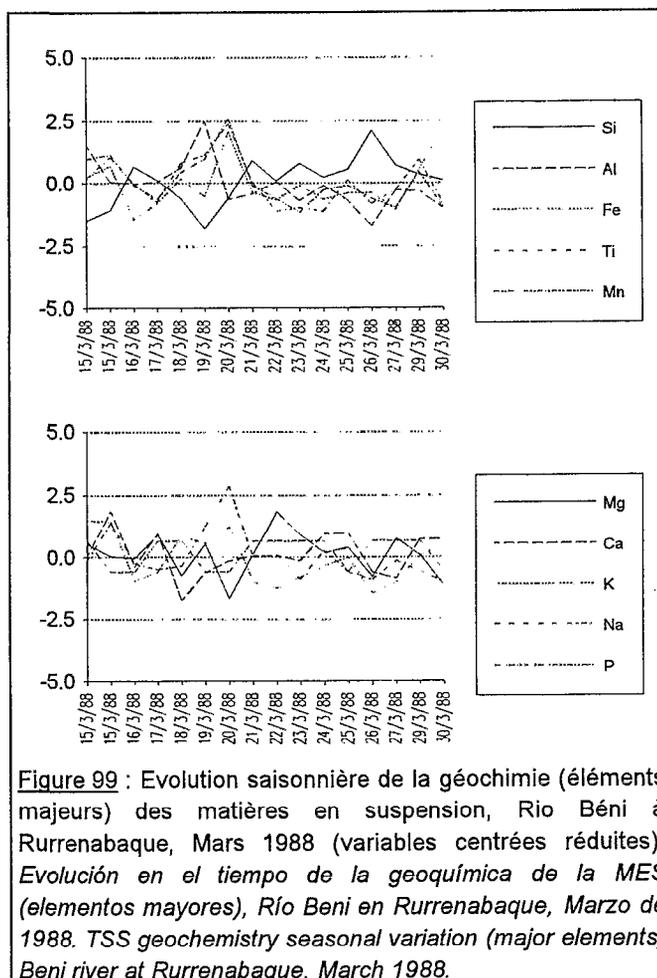


Figure 99 : Evolution saisonnière de la géochimie (éléments majeurs) des matières en suspension, Rio Béni à Rurrenabaque, Mars 1988 (variables centrées réduites). *Evolución en el tiempo de la geoquímica de la MES (elementos mayores), Río Beni en Rurrenabaque, Marzo de 1988. TSS geochemistry seasonal variation (major elements) Beni river at Rurrenabaque, March 1988.*

Tableau XXII : Géochimie des sédiments, éléments majeurs, stations du réseau PHICAB, Octobre 1987. *Geoquímica de los sedimentos de fondo (elementos mayores), estaciones de la red PHICAB, Octubre de 1987. Bottom sediment geochemistry (major elements), PHICAB network stations, October 1987.*

Code	Nb. d'éch	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	TiO2 (%)	K2O (%)	Na2O (%)	P2O5 (%)	P.Feu (%)	R
AP	1	58.8	19.6	7.4	0.11	1.02	0.51	1.07	3.66	0.73	0.22	6.7	2.2
PV	1	55.8	20.8	8.0	0.11	1.17	0.51	1.10	3.95	0.76	0.22	7.4	1.9
MU	1	65.6	15.9	6.5	0.06	1.14	0.27	0.94	2.60	0.89	0.21	5.7	2.9
PG	1	65.4	16.6	6.3	0.07	0.84	0.27	0.88	2.52	0.67	0.20	6.2	2.9
PS	1	62.0	17.9	6.8	0.07	1.46	0.41	0.99	2.89	1.02	0.22	6.0	2.5
GM	1	75.0	12.9	4.0	0.06	0.71	0.20	0.82	2.31	0.71	0.20	3.0	4.4
AB	1	63.0	17.9	7.1	0.07	0.79	0.30	0.86	2.94	0.61	0.21	6.1	2.5
PC	1	65.6	15.8	7.3	0.09	0.92	0.32	0.95	2.76	0.69	0.21	5.3	2.8
MF	1	62.5	16.8	8.0	0.11	1.15	0.74	1.25	2.39	0.81	0.22	5.9	2.5
CA	1	78.3	10.1	3.4	0.11	0.48	0.30	1.12	1.59	0.63	0.17	3.6	5.8
CE	1	69.9	14.8	5.8	0.07	0.98	0.44	0.94	2.14	0.85	0.21	3.8	3.4
cv		0.10	0.18	0.23	0.25	0.27	0.40	0.13	0.25	0.16	0.07	0.26	

[Nb. d'éch.=nombre d'échantillons, P.Feu=perte au feu, R= $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ ]  
(Voir code des stations dans Tableau XX).

Les sédiments du Rio Orthon (Caracoles) présentent une composition géochimique légèrement différente (Figure 101), pouvant provenir de la granulométrie, mais aussi des séries sédimentaires tertiaires, qui sont drainées par ce cours d'eau. De la même manière, la différence entre Puerto Siles et Guayaramerin sur le Rio Mamoré, correspond aux apports du Rio Itenez.

5. Les matières particulaires.

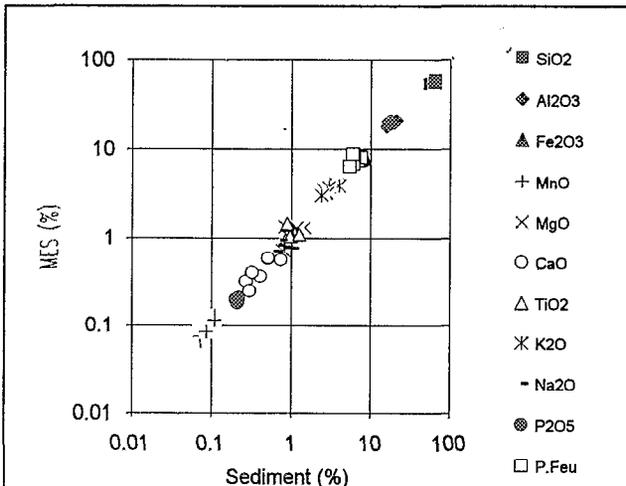


Figure 100 : Géochimie des MES vs. géochimie des sédiments (éléments majeurs), stations du réseau PHICAB dans les Llanos de Bolivie. *Geoquímica de la MES vs. geoquímica de los sedimentos de fondo. Suspended sediment geochemistry vs. bottom sediment geochemistry.*

Les résultats obtenus pour les matières en suspension et les sédiments des principaux tributaires des rios Béni, Mamoré et Madeira, permettent d'estimer la teneur moyenne en éléments majeurs de la phase particulaire de ces cours d'eau, et de la comparer avec les données des autres grands fleuves d'Amérique du Sud (Tableau XXV).

Le Rio Béni et le Rio Mamoré, donc le Rio Madeira, présentent des teneurs très voisines, s'approchant assez de la moyenne mondiale (Martin & Meybeck, 1979). Les teneurs en Si du Rio Madeira sont plus fortes que celles de l'Amazone, au détriment de Al et Fe, traduisant un caractère géochimique plus jeune, plus andin. Les teneurs en Mg et surtout Ca sont nettement plus faibles sur le Madeira par rapport à l'Amazone ou à la moyenne mondiale, du fait de l'absence de séries sédimentaires carbonatées dans les Andes boliviennes, contrairement à ce qui est observé au Pérou.

V.D.2. Les éléments traces.

V.D.2.a. Dans les Andes.

La géochimie des éléments traces ne présente pas la même monotonie que la minéralogie ou la géochimie des éléments majeurs. Si la plupart des teneurs en éléments traces varient peu d'un cours d'eau à l'autre ( $cv < 1$ ), quelques éléments dont les concentrations sont généralement faibles, voire inférieures à la limite de détection (As, Sn), se détachent avec des teneurs élevées sur quelques cours d'eau andins ( $cv > 1$ ). Ainsi les matières en suspension du Rio Taquesi montrent un enrichissement en As, Co, Cr, Ni, Pb, Sn, Zn, celles du Rio Arque en Sn et Zn, celles du Rio Grande en As et Sn, et celles du Rio La Paz en Pb, Sn, Zn (Tableau XXIII et Figure 102). Ces différences semblent être essentiellement liées à des contaminations urbaines et industrielles (Rio La Paz) ou aux nombreuses

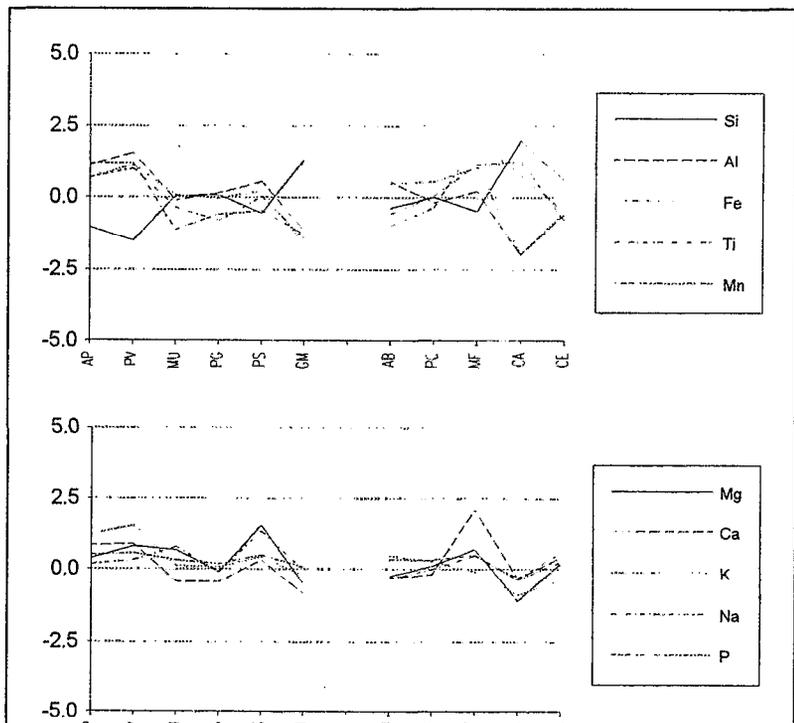


Figure 101 : Géochimie (éléments majeurs) des sédiments en Amazonie bolivienne, stations du réseau PHICAB, Octobre 1987, variables centrées réduites (Voir code des stations dans Tableau XX). *Geoquímica de los sedimentos de fondo (elementos mayores), estaciones de la red PHICAB, Octubre de 1987. Bottom sediment geochemistry (major elements), PHICAB network stations, October 1987.*

exploitations minières du domaine andin de Bolivie (Ahlfeld & Schneider-Scherbina, 1964). La présence de la mine de Chojlla dans le bassin du Rio Taquesi explique les teneurs particulières de ce cours d'eau.

Toutefois, une analyse multivariée en composantes principales, réalisée avec les teneurs en éléments traces et la géologie des bassins versants apporte quelques indications supplémentaires. Le plan des deux premières composantes qui exprime 43% de la variance totale, permet de regrouper plusieurs éléments. Un premier nuage individualise le Ba, Co, Cr, Ga et le Ni, indépendamment des variables géologiques, et semble correspondre à la contamination minière (Rio Taquesi). Un deuxième nuage regroupe l'As, le Pb, Rb et Sr, en opposition avec le Cu, qui est fortement lié aux séries intrusives du Tertiaire (Rios Unduavi, Zongo et Coroico). Le Sr apparaît proche du carbonifère et des séries volcaniques du Tertiaire (Bassin du Rio Grande), alors que l'As, le Pb et le Rb sont corrélés aux affleurements de Permien.

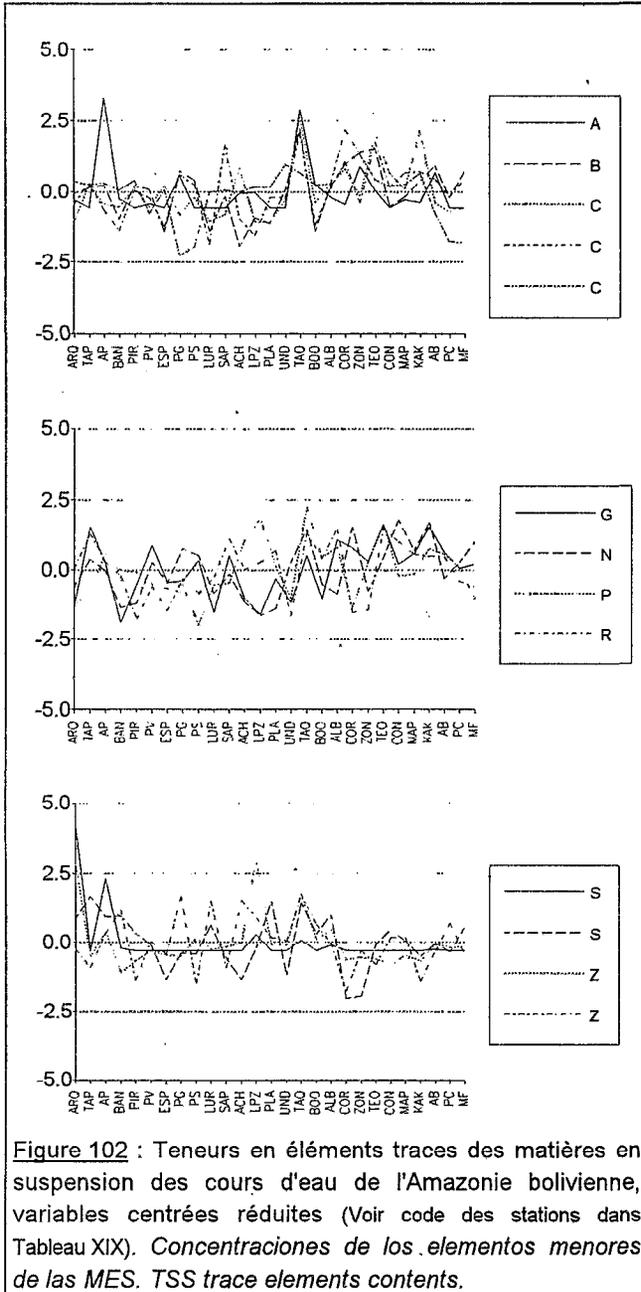
Tableau XXIII : Géochimie des matières en suspension (1986-1989), éléments traces, valeurs moyennes.  
*Geoquímica de las materias en suspensión (elementos menores).*  
*Suspended sediment geochemistry (trace elements).*

Code	Nb. d'éch.	MES (mg/l)	As (µg/g)	Ba (µg/g)	Co (µg/g)	Cr (µg/g)	Cu (µg/g)	Ga (µg/g)	Ni (µg/g)	Pb (µg/g)	Rb (µg/g)	Sn (µg/g)	Sr (µg/g)	Zn (µg/g)	Zr (µg/g)
ARQ	1	3140	3	539	10	71	65	23	40	20	204	62	253	220	127
TAP	2	1720	<0.1	562	24	79	63	31	45	24	240	<0.1	280	110	106
AP	6	20800	35	573	17	69	64	27	43	35	212	35	256	139	146
BAN	2	12100	3	444	16	62	58	21	36	30	197	1	257	91	173
PIR	1	342	<0.1	568	23	76	66	25	37	30	153	<0.1	236	105	91
PV	2	589	1	555	16	74	39	29	45	26	187	<0.1	220	117	136
ESP	1	310	<0.1	395	24	63	58	25	41	25	161	<0.1	178	112	121
PG	1	679	11	627	13	82	6	25	47	26	195	<0.1	210	110	190
PS	1	268	<0.1	590	19	78	13	28	46	15	179	<0.1	209	133	87
LUR	1	35900	<0.1	397	11	57	56	22	39	26	196	<0.1	245	118	184
SAP	1	3180	<0.1	528	13	93	58	28	43	27	235	<0.1	203	121	105
ACH	1	79400	5	342	31	66	56	24	37	38	204	<0.1	177	126	184
LPZ	1	12400	5	449	10	60	61	22	35	45	211	8	216	224	165
PLA	1	15700	<0.1	426	10	74	61	26	36	31	223	<0.1	275	123	141
UND	2	708	<0.1	554	19	74	79	23	45	22	156	<0.1	182	123	138
TAQ	1	716	31	782	49	97	72	28	51	48	241	5	272	182	191
BOO	1	1040	8	397	17	64	62	24	41	34	214	<0.1	235	130	157
ALB	2	5680	4	567	24	77	63	30	39	36	245	3	258	142	135
COR	1	624	1	652	30	87	105	29	51	20	160	<0.1	155	106	78
ZON	1	722	13	696	20	72	86	28	39	32	162	<0.1	157	108	125
TEO	1	1430	6	708	43	94	67	32	45	43	245	<0.1	221	107	109
CON	1	6400	<0.1	492	28	78	61	27	52	29	232	<0.1	240	100	141
MAP	2	1430	3	527	23	83	63	28	47	29	219	<0.1	225	111	141
KAK	1	1750	2	588	44	84	72	31	52	36	217	<0.1	206	105	89
AB	16	4360	11	645	18	81	40	29	42	35	216	1	222	124	126
PC	1	1010	<0.1	525	14	74	17	27	45	31	192	<0.1	211	121	158
MF	1	445	<0.1	624	16	81	17	27	48	22	186	<0.1	244	121	120
cv			1.69	0.19	0.49	0.13	0.39	0.11	0.12	0.26	0.14	3.08	0.15	0.25	0.24

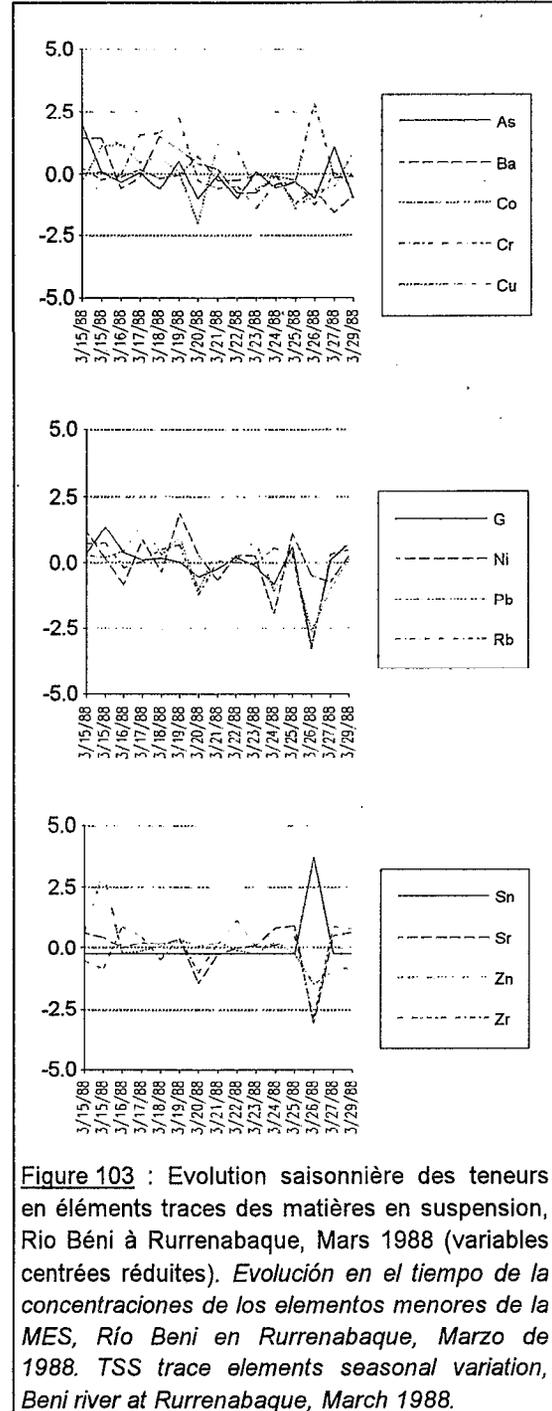
(Voir code des stations dans Tableau XIX).

L'évolution saisonnière des teneurs en éléments traces, sur le Rio Grande à Abapo et le Rio Béni à Angosto del Bala montre que la variabilité temporelle de ces éléments est du même ordre de grandeur que la variabilité géographique, avec des coefficients de variation faibles ( $cv < 1$ ), sauf pour quelques éléments particuliers (As, Zn). Le suivi en hautes eaux (Mars 1988) de la géochimie des matières en suspension sur le Rio Béni à Rurrenabaque (Figure 103) montre que certains éléments traces présentent des variations sensibles au cours de la crue. Ainsi, le 26 Mars est marqué par un enrichissement notable en Cu et Sn, et un appauvrissement en Ga, Pb, Rb, Sr et Zr, conséquence de

5. Les matières particulaires.



l'apport préférentiel de tributaires andins aux caractéristiques géochimiques propres, correspondant aux vallées des rios Unduavi, Coroico ou Zongo, situées dans la même région.



**V.D.2.b. Dans les Llanos.**

La géochimie des éléments traces des sédiments (Tableau XXIV et Figure 104) montre la même faible variabilité des teneurs d'un site à l'autre, comme cela a été observé pour les matières en suspension, avec des coefficients de variation inférieurs à 1, sauf pour l'As et le Sn.

Les teneurs relatives en éléments traces des sédiments soulignent, par rapport aux teneurs des matières en suspension, un enrichissement en Cu et Zr, et un appauvrissement en Ba et Ni. Ces tendances, qui ne sont pas toujours vérifiées à Abapo et Puerto Villarroel, sont encore probablement liées à la différence de granulométrie entre sédiments et matières en suspension. Le Rio Orthon s'individualise à nouveau avec des teneurs en Zr plus élevées et en Cr, Cu, Ga, Ni et Rb plus faibles.

Tableau XXIV : Géochimie des sédiments, éléments traces, stations du réseau PHICAB, Octobre 1987.  
*Geoquímica de los sedimentos de fondo (elementos menores), estaciones de la red PHICAB, Octubre de 1987.*  
*Bottom sediment geochemistry (trace elements), PHICAB network stations, October 1987.*

Code	Nb. éch.	As µg/g	Ba µg/g	Co µg/g	Cr µg/g	Cu µg/g	Ga µg/g	Ni µg/g	Pb µg/g	Rb µg/g	Sn µg/g	Sr µg/g	Zn µg/g	Zr µg/g
AP	1	2	645	12	79	60	24	45	40	218	2	269	131	148
PV	1	1	703	20	88	64	28	49	41	222	10	268	133	130
MU	1	3	319	17	66	65	26	37	27	170	7	214	92	252
PG	1	<0.1	430	19	67	60	24	37	25	173	11	204	80	303
PS	1	<0.1	473	13	67	60	22	37	27	180	6	220	93	224
GM	1	<0.1	284	9	39	61	15	28	22	130	<0.1	180	62	368
AB	1	5	517	11	69	63	23	37	24	191	<0.1	210	121	211
PC	1	7	394	16	68	64	20	35	33	179	<0.1	206	111	230
MF	1	<0.1	510	24	68	67	20	42	23	144	<0.1	245	101	245
CA	1	4	356	13	40	56	10	21	26	118	<0.1	195	62	608
CE	1	5	490	11	53	61	19	36	24	136	<0.1	211	83	247
cv		1.02	0.28	0.30	0.23	0.04	0.24	0.21	0.23	0.20	1.33	0.13	0.26	0.48

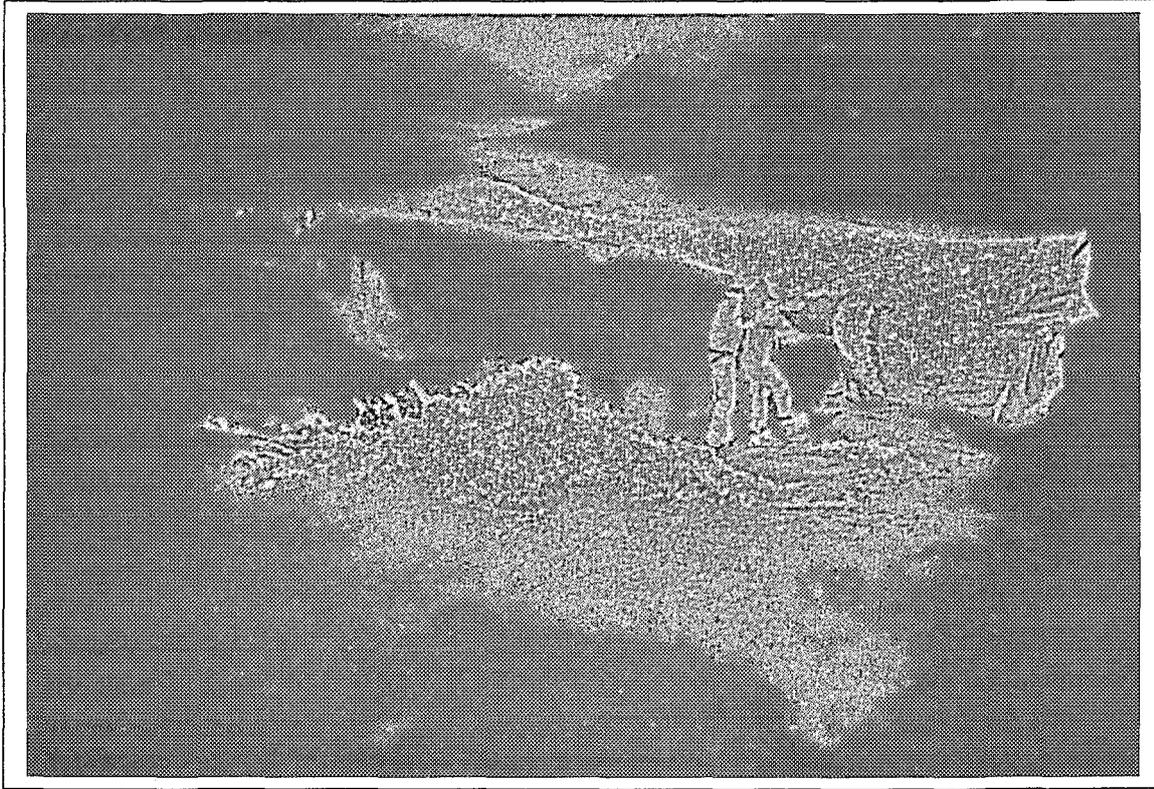
(Voir code des stations dans Tableau XX).

Tableau XXV : Teneurs élémentaires de la phase particulaire des fleuves de l'Amazonie bolivienne, comparées à celles des grands fleuves de l'Amérique du Sud, et de la moyenne mondiale (en µg.g<sup>-1</sup>). *Concentraciones de los elementos de la materias en suspensión. Major and trace contents of suspended sediment.*

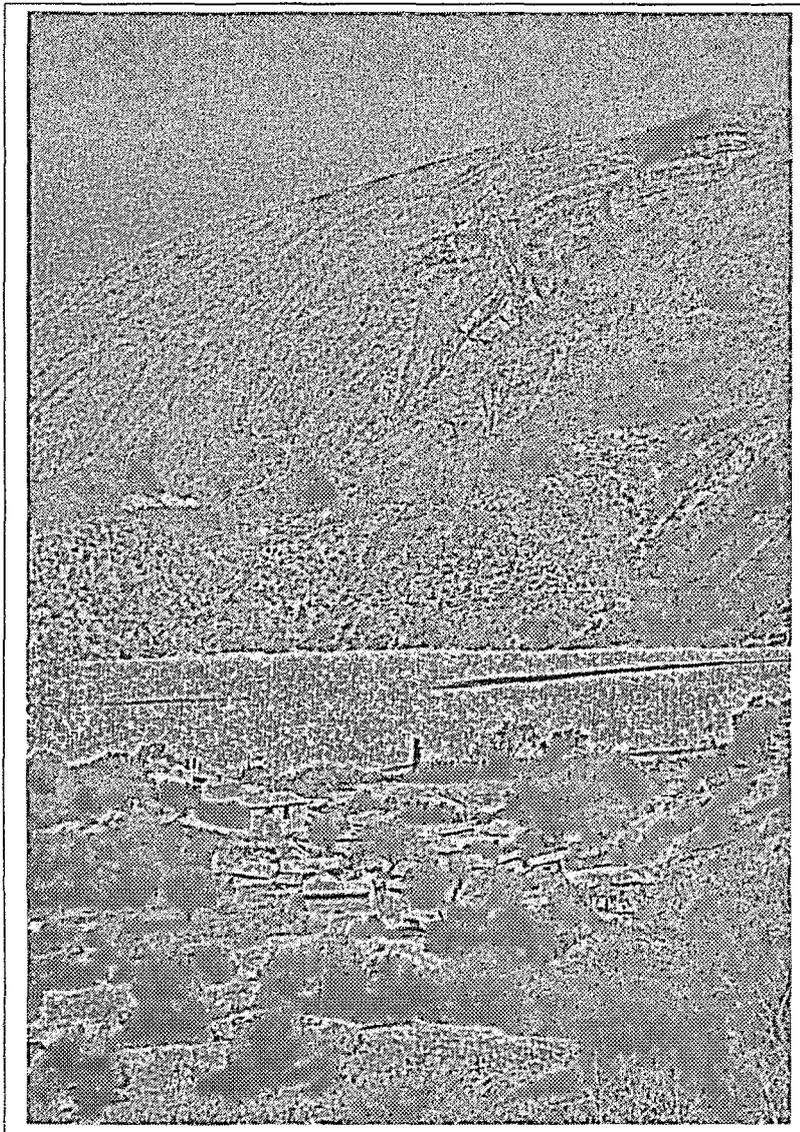
Élément	Béni	Mamoré	Madeira	Amazonie	Orénoque	Parana	Monde
Si	294000	291000	293000	267000	292000	289000	285000
Al	90800	92200	91200	115000	113000	106000	94000
Fe	50800	47500	49900	55000	58000	48000	48000
K	23200	25800	24000	18000	27000	18000	20000
Mg	6510	6770	6580	11200	5800	10900	11800
Ti	6150	5960	6100	7000	8600	9400	5600
Na	6120	5570	5960	7850		6700	7100
Ca	3210	2190	2920	16000	3000	5900	21500
P	900	870	890	1650		1300	1150
Mn	660	460	610	1030	740	270	1050
Ba	534	488	521	700	270		600
Sr	218	199	213	309	83	150	150
Zr	182	181	182				
Rb	172	163	169	138		100	100
Zn	108	109	108	426	119		350
Cr	68	65	67	193	70	90	100
Ni	42	40	42	105	30		90
Cu	32	29	31	266	73		100
Pb	26	17	24	105	76		150
Ga	24	24	24	19	28		25
Co	13	16	14	41	10	23	20

(Amazonie, Orénoque, Parana, et moyenne mondiale d'après Martin & Meybeck, 1979).

Comme pour les éléments majeurs, les éléments traces du Rio Béni et du Rio Mamoré, donc du Rio Madeira, ont des teneurs relatives très voisines. Par contre, ces fleuves de l'Amazonie bolivienne s'individualisent nettement de la moyenne mondiale, mais aussi de l'Amazonie par des teneurs en Rb légèrement plus fortes, mais surtout des teneurs en Ba, Zn, Cr, Ni, Cu, Pb et Co plus faibles. L'abondance de certains de ces derniers éléments dans l'Amazonie, mais aussi dans le Rio Negro (Gordeev & al., 1985), est liée aux affleurements du socle précambrien.



↑ Photo 30 La rivière souterraine de Umajalanta (2500 m), région karstique de Torotoro. *El río subterráneo de Umajalanta, región de Torotoro. The Umajalanta cave river, Torotoro area*



← Photo 31 Le Rio Grande a La Viña (1800 m) et les séries carbonatées du Crétacé *El Río Grande en La Viña y los calcarios del Cretáceo. The Grande river at La Viña and cretaceous limestones*

**V.E. LE CARBONE ORGANIQUE PARTICULAIRE (COP).**

Le carbone organique, dissous et particulaire, a fait l'objet d'une étude portant sur 52 cours d'eau boliviens, dont 41 dans les Andes et 11 dans les Llanos (Figure 87 & Tableau XXVI). Les valeurs obtenues montrent que le carbone organique particulaire dans les Andes (COP) est très lié aux matières en suspension (Figure 105), avec des teneurs variant de 0 à 113 mg.l<sup>-1</sup>. Les valeurs les plus fortes sont observées en zone semi-aride, dans des bassins soumis à une très forte érosion physique, où le COP représente alors jusqu'à 98% du carbone organique total.

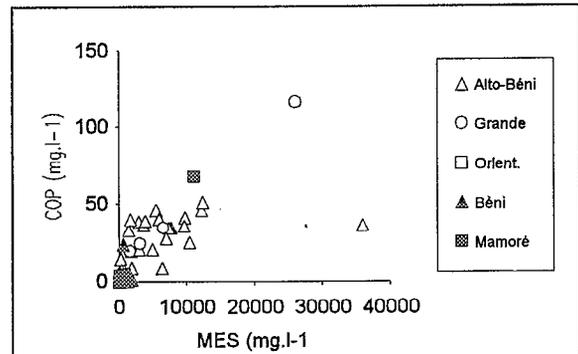


Figure 105 : Carbone organique particulaire (COP) vs. matières en suspension (MES). COP vs. MES. POC vs. TSS.

Pour l'ensemble des données boliviennes, le rapport COP/MES varie de 0.1 à 20% (Figure 106), et présente ses valeurs maximales en basses eaux, quand les teneurs en MES sont faibles, ce qui est généralement observé (Meybeck, 1982, in press). Par contre, un phénomène inverse est quelquefois observé, avec un fort rapport COP/MES durant les épisodes de montée de crue (Malcom & Durum, 1976; Milliman & al., 1984; Wasson & al., 1991).

Ces résultats classés par gammes de teneurs en MES (Tableau XXVII) sont comparables à ceux portant sur la moyenne mondiale (Meybeck, 1982, 1984; Ittekkot, 1988; Ittekkot & Laane, 1991; Martins & Probst, 1991).

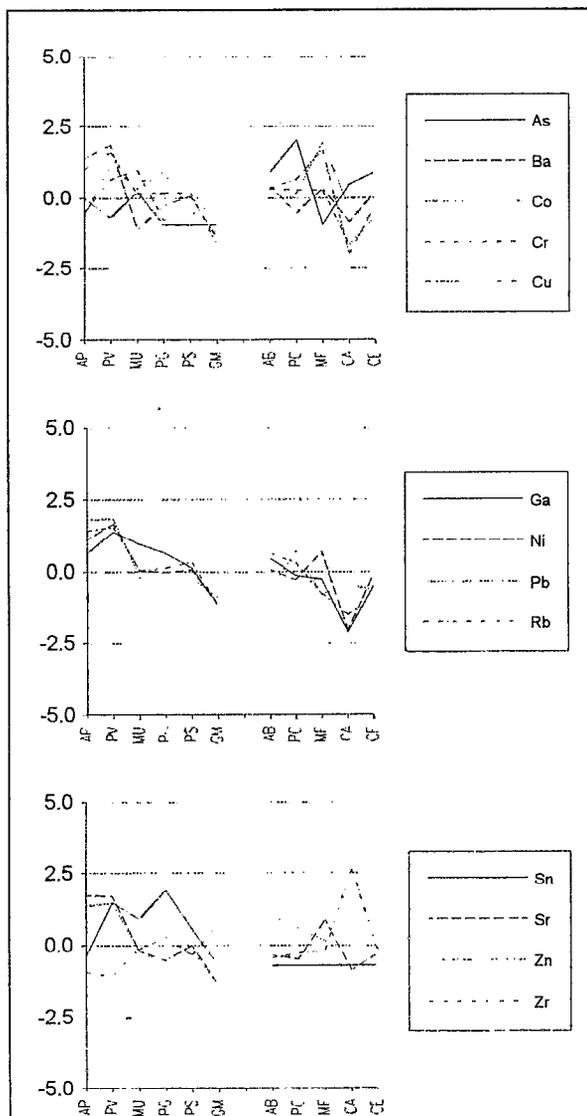


Figure 104 : Géochimie (éléments traces) des sédiments en Amazonie bolivienne, stations du réseau PHICAB, Octobre 1987, variables centrées réduites (Voir code des stations dans Tableau XX). *Geoquímica de los sedimentos de fondo (elementos menores), estaciones de la red PHICAB, Octubre de 1987. Bottom sediment geochemistry (trace elements), PHICAB network stations, October 1987.*

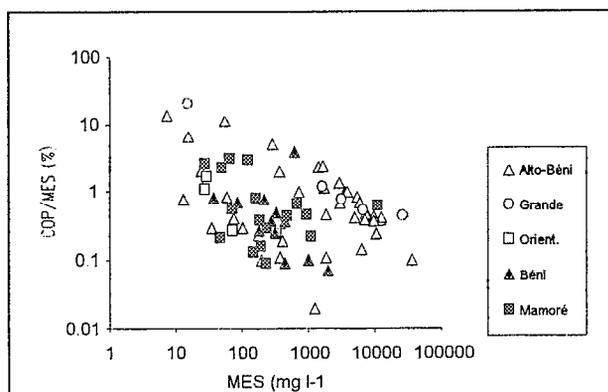


Figure 106 : COP/MES vs. MES en Amazonie bolivienne. COP/MES vs. MES. POC/TSS vs. TSS.

## 5. Les matières particulaires.

Tableau XXVI : Carbone organique particulaire en Amazonie bolivienne, (valeurs moyennes), caractéristiques des cours d'eau échantillonnés, 1987-1988. *Carbono organico particular y características de los rios muestreados. Particulate organic carbon and sampled rivers characteristics.*

Zone	Code	Rio	Alt. (m)	Sup. (km <sup>2</sup> )	qs (l/s.km <sup>2</sup> )	Forêt (%)	Nb. éch.	MES (mg/l)	COP (mg/l)
A	SOR	San Cristobal à Sorata	2400	110	16	0	1	368	7.3
	CON	Consata à Consata	900	2400	16	0	1	6400	8.9
	MAP	Mapiri à Guanay	500	10100	18	47	2	994	1.2
	TIP	Tipuani à Guanay	500	1400	26	34	2	378	0.8
	CHA	Challana à Guanay	500	1900	55	66	1	55	6.3
	ZON	Zongo à Islani	1200	330	50	15	1	721	7.2
	YOL	San Juan à Yolosa	1200	100	50	4	1	288	14.5
	COR	Coroico à Santa Barbara	800	610	43	34	1	624	23.9
	TEO	Coroico à Teoponte	500	5400	33	77	2	719	17.0
	KAK	Kaka à Teoponte	480	18800	26	57	2	914	10.1
	UND	Unduavi à Puente Villa	1190	360	19	0	1	1250	0.3
	TAQ	Taquesi à Puente Villa	1190	590	19	0	1	59	0.5
	TAM	Tamampaya à Villa Barrientos	1050	1900	19	15	1	34	0.1
	LPZ	La Paz à Tahuapalca	2400	930	11	0	1	7850	27.3
	TIR	La Paz à Tirata	2000	1100	11	0	1		19.8
	LUR	Luribay à Luribay	2550	810	11	0	1	35900	36.1
	PLA	La Paz à La Plazuela	800	5200	11	0	1	1260	1.9
	MIG	Miguillas à La Plazuela	800	1000	11	0	1	15	1.0
	ENC	La Paz à El Encuentro	500	7400	11	2	1	413	0.8
	ASU	Boopi à La Asunta	450	10900	13	11	1	177	0.4
BOO	Boopi à San Miguel Huachi	400	12500	15	22	1	201	0.2	
COT	Cotacajes à San Miguel Huachi	400	16000	20	46	1	13	0.1	
ALB	Alto-Béni à Sapecho	380	29100	21	37	2	5250	12.9	
AB	Béni à Angosto del Bala	280	67500	30	58	17	2730	15.1	
B	ROC	Rocha à Parotani	2450	3600	5	1	1	79	1.4
	TAP	Tapacari à Parotani	2500	940	5	0	1	1640	19.5
	ARQ	Arque à Capinota	2400	2300	5	0	1	3140	24.3
	AP	Grande à Abapo	450	59800	5	18	3	10900	51.2
C	ESP	Esperitu Santos à Villa Tunari	300	2700	70	76	1	328	0.8
	MAT	San Mateo à Villa Tunari	300	2400	70	77	1	29	0.5
	CHI	Chimoré (puente)	210	1900	70	100	1	8	0.0
	SAJ	Sajta (puente)	220	2100	70	97	1	8	0.0
	IOA	Ichoa (puente)	230	670	70	100	1	2	0.0
	ICH	Ichilo (puente)	240	2100	70	100	1	27	0.3
	YAP	Yapacani à Yapacani	280	6900	13	77	1	73	0.2
PIR	Piray à puente Eisenhower	280	4100	13	63	1	83	1.1	
D	PC	Béni à Portachuelo	130	119000	24	62	3	536	1.3
	MF	Madre de Dios à Miraflores	130	124200	41	[89]	3	912	1.3
	RIB	Béni à Riberalta	125	243000	34	[68]	1		1.2
	CA	Orthon à Caracoles	125	32300	14	[100]	3	162	0.7
	CE	Béni à Cachuela Esperanza	120	282500	32	[72]	3	367	7.9
E	BAN	Grande à Puerto Banegas	250	67000	8	27	1	11100	68.0
	PV	Ichilo à Puerto Villaruel	170	7600	78	99	2	251	1.4
	MU	Mamoré à Muyurina	160	124000	30	49	2	663	1.3
	SEC	Securé (confluence Mamoré)	150	17000	30	77	1	192	0.3
	PG	Mamoré à Puerto Ganadero	140	144000	22	53	1	940	4.3
	MO	Mamoré à Montevideo	140	159100	20	52	3	318	2.8
	TIJ	Tijamuchi (confluence Mamoré)	140	7600	30	15	1	71	0.4
	APE	Aperé (confluence Mamoré)	135	17000	30	60	1	49	1.1
	PS	Mamoré à Puerto Siles	130	216200	25	48	4	263	0.4
	VG	Itenez à Vuelta Grande	130	354300	6	[74]	2	38	0.2
	GM	Mamoré à Guayamerin	120	599400	14	[62]	3	248	0.9

(Alt.=altitude du point d'eau, Sup.=superficie du bassin versant, qs=débit spécifique, Forêt=pourcentage du bassin versant possédant une couverture forestière {d'après la carte de végétation de Bolivie}, les valeurs entre [--] correspondent à la seule partie bolivienne du bassin, Nb. éch.=nombre d'échantillons).

Tableau XXVII : COP/MES en Amazonie bolivienne, valeurs moyennes, 1987-1988.

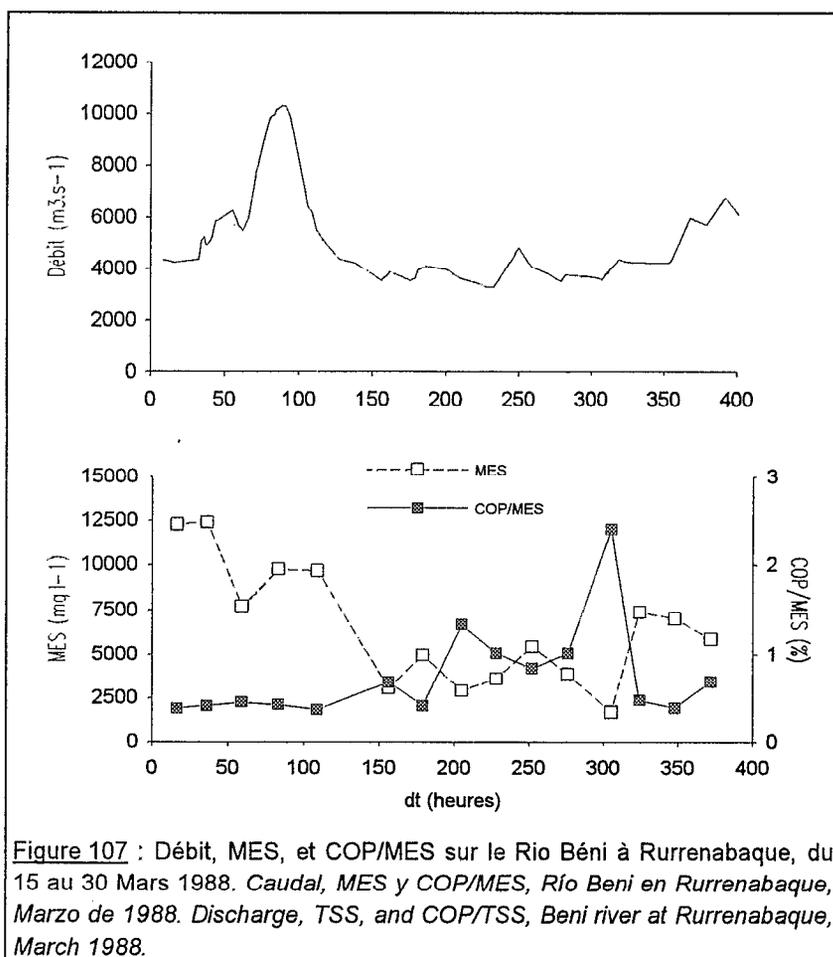
*COP/MES en la cuenca amazónica de Bolivia, valores medias 1987-1988.**POC/TSS in the bolivian Amazon drainage basin, mean values 1987-1988.*

MES (mg.l-1)	Nombre éch.	COP/MES Amazonie Bolivienne (%)	COP/MES Moyenne mondiale (%)
15-50	12	3.2	3.6
50-150	11	2.1	2.2
150-500	24	0.5	1.3
500-1500	10	1.3	1.6
1500-5000	12	0.9	0.6
5000-15000	14	0.5	0.5
15000-50000	2	0.3	0.5
Total	91		

(Moyenne mondiale d'après Meybeck, 1982 et Ittekkot, 1988).

Jusqu'à présent, peu de données de carbone organique particulaire concernait des teneurs en matières en suspension supérieure à 1.5 g.l<sup>-1</sup>. Les fortes teneurs en COP observées pour de telles valeurs de MES sur le YangTse, étaient attribuées à une influence anthropique (Milliman & al., 1984). Les résultats obtenus en Amazonie bolivienne indiquent des teneurs en COP plus faibles pour une région où la densité de population est extrêmement réduite : 7 hab.km<sup>-2</sup> pour l'ensemble du bassin en incluant les grandes villes (La Paz, Santa Cruz, Cochabamba), et environ 1 hab.km<sup>-2</sup> dans les Llanos (Brockmann, 1986; Montes de Oca, 1982).

Dans les Andes (régions A, B et C), les teneurs en COP, comme les MES, peuvent être élevées ou faibles, en fonction des saisons et des bassins. De même, le rapport COP/MES peut présenter des variations importantes d'un jour sur l'autre en période de hautes eaux, comme cela a été observé sur le Rio Béni à Rurrenabaque en Mars 1988 (Figure 107).



Durant cet épisode de crue, le rapport COP/MES présente un pic correspondant à une baisse des teneurs en MES, qui coïncide avec les anomalies observées sur la géochimie des matières en suspension. Ce jour là (26 Mars), le Rio Béni à Rurrenabaque a reçu les apports des vallées des rios Unduavi, Coroico et Zongo, relativement plus riches en COP, et qui sont toujours moins chargés en MES (Guyot & al., 1988). L'évolution dans le temps des teneurs en COP à Rurrenabaque est fonction des apports relatifs des différents tributaires andins du Rio Béni, rivières qui drainent des régions très contrastées.

Figure 107 : Débit, MES, et COP/MES sur le Rio Béni à Rurrenabaque, du 15 au 30 Mars 1988. Caudal, MES y COP/MES, Río Beni en Rurrenabaque, Marzo de 1988. Discharge, TSS, and COP/TSS, Beni river at Rurrenabaque, March 1988.

Dans les Llanos (régions D & E), le COP présente toujours des valeurs faibles sauf dans le cas du Rio Grande à Puerto Banegas, qui est en fait encore un cours d'eau andin.

Les fleuves drainant la chaîne himalayenne transportent du carbone organique particulaire, aux caractéristiques différentes correspondant à des origines distinctes, suivant les saisons hydrologiques (Ittekot & Arain, 1986; Subramanian & Ittekot, 1991). Au Brésil, le carbone organique particulaire de l'Amazonie provient de deux sources différentes : les Andes et les plaines d'inondation (Richey & al., 1991). Dans les Andes boliviennes, les matières en suspension des cours d'eau proviennent de l'érosion massive des versants (Guyot & al., 1988, 1989, 1990). Les débris organiques, faiblement altérés en zone semi-aride, sont mélangés avec les matières en suspension, le COP et les MES ayant alors la même origine. Dans les Llanos, le COP produit dans les plaines d'inondation, est drainé vers le fleuve, comme cela est observé pour l'Amazonie (Hedges & al., 1986), et n'est pas lié aux matières particulaires d'origine andine. La même hypothèse a été avancée au sujet de la production de carbone organique particulaire sur l'Altiplano bolivien (Wasson & al., 1991).

A partir de ces résultats, pondérés par la valeur des flux de matières en suspension des rios Béni et Mamoré, la concentration moyenne en carbone organique particulaire du Rio Madeira à Villabella est estimée à  $4.4 \text{ mg.l}^{-1}$ .

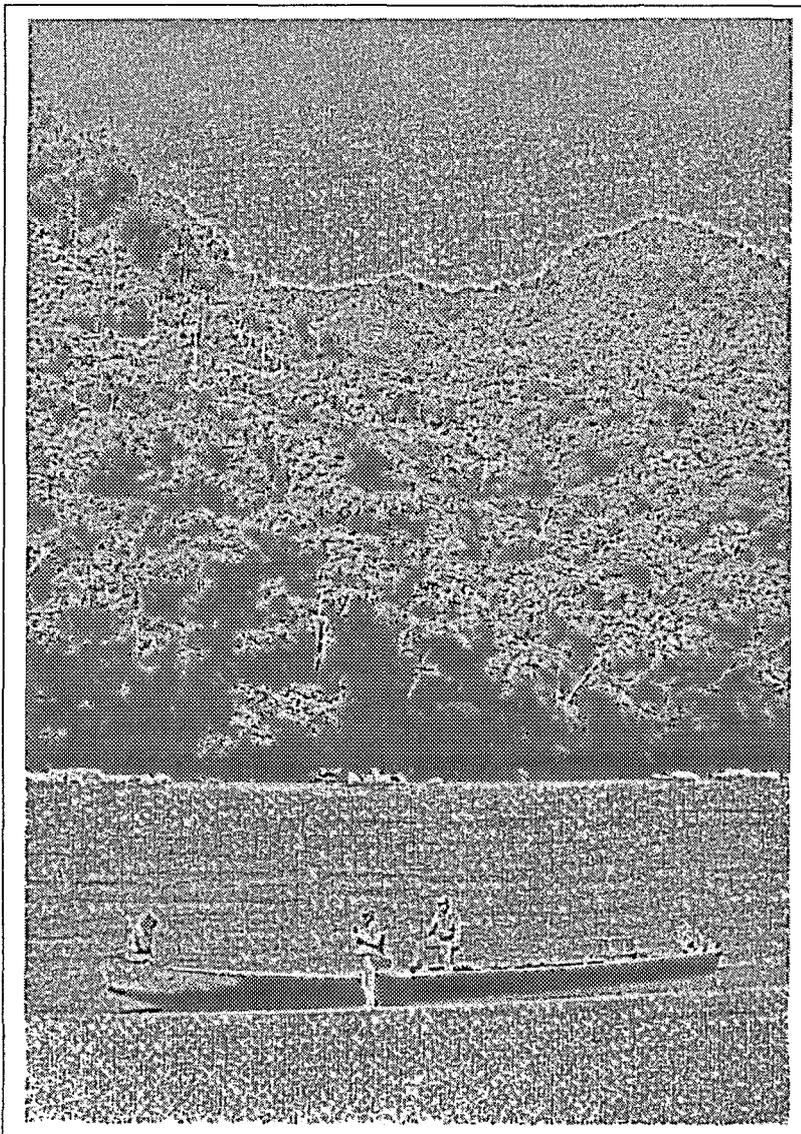


Photo 32 : Tournée hydrologique dans l'Alto-Béni (500 m). *Comisión hidrológica en el Alto-Beni. Hydrology field trip on the Alto-Beni river.*

## V.F. LE REGIME.

### V.F.1. Les matières en suspension.

#### V.F.1.a. Dans les Andes.

Le régime des flux de matières en suspension dans les Andes de Bolivie a fait l'objet d'un certain nombre de travaux du PHICAB, concernant les bassins du versant amazonien (Molina, 1986; Guyot & al., 1988, 1989, 1991; Barragan, 1990), mais aussi de l'Altiplano et du bassin du Rio Paraguay (Guyot & al., 1990). Ces travaux se sont référés essentiellement à des données anciennes largement inédites, et provenant de différents services nationaux (SENAMHI, SEARPI & ENDE). Dans le cas des trois stations du piedmont andin (AB, AP, & PV), les données anciennes ont été complétées par celles du PHICAB portant sur la période 1983-1989. Les résultats obtenus (Tableau XXVIII) présentent quelquefois des différences sensibles par rapport aux premières publications, provenant d'un nouveau traitement des données hydrométriques (modification des courbes de tarage), et/ou de l'utilisation de cartes plus récentes pour le calcul de la superficie des bassins versants.

Le flux de matières en suspension sur l'ensemble des cours d'eau andins présente de fortes variations saisonnières, plus importantes que celles observées pour les débits (Tableau X). Les coefficients de variation (cv) des flux moyens mensuels sont toujours largement supérieurs à ceux des débits moyens mensuels pour la même station, et le volume de sédiments exportés lors des trois mois de plus hautes eaux (de Janvier à Mars) dépassent fréquemment 80% du total annuel. A certaines stations drainant des petits bassins, ce pourcentage dépasse 90% et atteint même 99% sur le Rio Huayllani, cours d'eau du bassin montagneux semi-aride de la région de La Paz.

Le poids des mois de Janvier-Février-Mars sur l'exportation annuelle de sédiments (Figure 108) ne semble pas être lié à l'altitude, contrairement à ce qui est observé pour le débit liquide (Figure 55). De même, il n'existe aucune relation entre ce pourcentage et la valeur du débit spécifique du bassin. Le poids des trois mois de hautes eaux sur l'exportation de sédiments est logiquement lié au poids de ces mêmes mois sur le volume annuel écoulé, mais avec une valeur supérieure, généralement de l'ordre de 10%.

Les matières en suspension sont donc exportées essentiellement durant les mois de hautes eaux, et principalement sous formes de "bouffées" durant les crues. Ainsi, en dehors des épisodes de crue, le flux de sédiments peut être faible, voire nul, même en période de hautes eaux, surtout pour les bassins de faible extension (Figure 109).

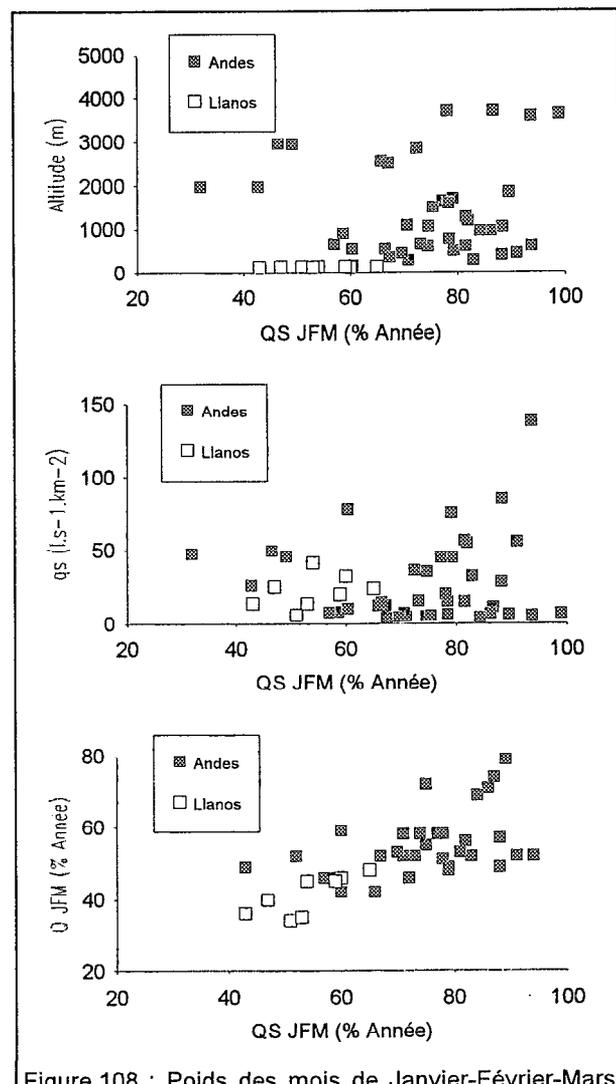


Figure 108 : Poids des mois de Janvier-Février-Mars sur l'exportation annuelle de sédiments, en fonction de l'altitude, du ruissellement et du poids de ces mois sur l'écoulement annuel. *Influencia de los meses de Enero, Febrero y Marzo sobre la exportación anual de sedimentos vs. altitud y escurrimiento. January-February-March influence on the annual TSS yield vs. altitude and runoff.*

5. Les matières particulaires.

**Tableau XXVIII** : Les matières en suspension dans les bassins andins de l'Amazonie bolivienne [Alt.= altitude de la station, Sup.= superficie du bassin versant, Pér.= période d'observation, Org.= organisme gestionnaire, Nb.éch.= nombre d'échantillons, MES= teneur moyenne en matières en suspension, MESp= teneur moyenne en matières en suspension pondérée par le débit, QS= flux moyen annuel de matières en suspension, CV= coefficient de variation des flux moyens mensuels au cours de l'année, JFM= poids des mois de Janvier-Février-Mars sur le volume annuel exporté]. *Las materias en suspensión en la cuenca amazónica de Bolivia. Suspended sediment in the bolivian Amazon drainage basin.*

Code	Rio	Alt. m	Sup. km <sup>2</sup>	Pér.	Org.	Références	Débit m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Nb. éch.	MES mg.l <sup>-1</sup>	MESp mg.l <sup>-1</sup>	QS 10 <sup>3</sup> t.an <sup>-1</sup>	CV %	JFM
AQM	Mapiri à Angosto Quercano	500	9400	75-79	Senamhi	Guyot & al., 1988	420	351	1930	2780	36800	1.3	79
SRC	Coroico à Santa Rita de B. Aires	440	4700	76-77	Senamhi	Guyot & al., 1988	260	49	590	870	7100	2.2	91
ACM	Aceramarca à Unduavi	2960	61	87-88	Orstom	Guyot & Wasson	3	36	11	11	1	1.1	47
UNV	Unduavi à Unduavi	2940	66	87-88	Orstom	Guyot & Wasson	3	38	15	21	2	1.5	49
SIR	Unduavi à Sirupaya	1640	270	80-86	Senamhi	Guyot & al., 1988	12	194	3070	5290	2000	1.6	77
UND	Unduavi à Puente Villa	1190	360	83-85	Senamhi	Guyot & al., 1988		84	1080				
TAQ	Taquesi à Puente Villa	1190	590	83-85	Senamhi	Guyot & al., 1988		76	280				
TAM	Tamampaya à Puente Villa	1185	950	75-85	Senamhi	Guyot & al., 1988	52	320	800	1460	2400	1.5	82
VBA	Tamampaya à Villa Barrientos	1050	1900	75-84	Senamhi	Guyot & al., 1988	67	353	1950	3690	7800	1.3	75
HUL	Huayllani à Achumani	3620	17	89-91	Phicab	Bourges & Guyot	0.1	349	2720	21900	69	2.4	99
ACH	Achumani à Achumani	3580	38	90-91	Phicab	Bourges & Guyot	0.2	131	4000	31900	201	2.1	94
LUR	Luribay à Luribay	2550	810	87-88	Orstom	Guyot & Wasson	10	39	12000	20300	6400	1.6	66
POR	Porvenir à Asanbo	2500	240	87-88	Orstom	Guyot & Wasson	3	36	5000	8400	790	1.9	67
VER	Miguillas à Vertedero Carabuco	2830	140	72-73	Ende		5	146	48	70	11	1.3	72
MIG	Miguillas à Humapalca	1980	360	72-76	Ende		17	87	150	88	47	1.0	52
CAJ	La Paz à Cajetillas	760	6500	73-75	Senamhi	Bourges & al., 1990	99	332	19600	38100	119000	1.6	78
COT	Cotacajes à Cotacajes	1270	5600	73-75	Senamhi		84	105	11500	15300	40600	1.5	82
MIS	Misicuni à Angosto Sivingani	3700	350	74-75	Ende		4	153	85	95	12	1.5	87
AIN	Alto Béni à Angosto Inicua	400	29900	75-83	Senamhi	Guyot & al., 1988	840	157	1920	4340	115000	1.6	88
AB	Béni à Angosto del Bala	280	67500	69-89	Senamhi	Guyot & al., 1988	2170	456	1610	3200	219000	1.5	83
VIN	Vinto à Vinto	3700	50	72-81	Ende		1	1141	68	95	3	2.3	78
LOC	Santa Isabel à Locotal	1700	200	71-75	Ende		15	1000	630	1420	670	1.5	79
SPE	Paracti à San Pedro	1040	320	72-73	Ende		27	190	2310	4110	3500	1.8	88
ICO	Juntas Corani à Icona	600	2300	72-73	Ende		130	186	1790	2780	11400	1.5	81
PPA	Esperitu Santos à Palmar Pampa	600	160	71-74	Ende		22	970	4640	15400	10700	2.1	94
SEH	Ivirizu à Sehuencas	1980	420	73-74	Ende		11	330	290	270	95	1.3	43
PV	Ichilo à Puerto Villarroel	170	7800	84-89	Phicab	Guyot & al., 1989	590	118	230	290	5400	1.1	60
BER	Bermejo à Bermejo	900	480	77-83	Searpi		4	2220	1000	4760	600	1.2	59
ANG	Piray à Angostura	650	1420	76-85	Searpi	Guyot & al., 1989	11	3027	1400	8360	2900	1.0	57
TAR	Piray à Taruma	600	1590	76-83	Searpi		8	2264	1230	5150	1300	1.3	74
ELV	Elvira à Elvira	650	64	77-83	Searpi		1	2162	470	950	30	1.4	73
EPS	Espejos à Espejos	550	203	77-83	Searpi	Guyot & al., 1989	3	2186	1170	4440	420	1.3	66
CSO	Piray à Club Social	450	2440	77-81	Searpi			1580	1670				
JBO	Piray à Jardin Botanico	400	2530	77-81	Searpi			1614	930				
LBE	Piray à La Belgica	350	2880	77-82	Searpi	Guyot & al., 1989	12	1684	2220	6080	2300	1.1	67
PEI	Piray à Puente Eisenhower	280	4160	77-82	Searpi		21	3900	560	1510	1000	1.2	71
AMO	Caine à Angosto Molineros	1850	9200	71-74	Senamhi		59	580	17900	67700	126000	2.1	89
HUR	Chayanta à Huayrapata	1600	11200	76-82	Senamhi	Guyot & al., 1989	70	282	4100	6390	14100	1.7	78
ARC	Grande à Puente Arce	1500	23700	69-74	Senamhi		130	868	17700	37600	154000	1.4	75
PNA	Grande à Puesto Nava	950	31200	71-74	Senamhi		220	938	9710	29800	207000	1.5	86
MIZ	Mizque à Puesto Nava	950	10800	71-75	Senamhi		47	897	4990	9510	14100	1.5	84
PAZ	Azero à Puente Azero	1080	4360	75-82	Senamhi	Guyot & al., 1989	32	557	1210	2180	2200	1.2	71
AP	Grande à Abapo	450	59800	76-89	Senamhi	Guyot & al., 1989	290	851	8410	13700	125000	1.2	70
SAN	Parapeti à San Antonio	550	7500	76-83	Senamhi	Guyot & al., 1989	79	642	4270	7790	19400	1.2	60

Le régime moyen mensuel du flux de matières en suspension (Figures 110 & 111) montre bien cette accentuation de l'irrégularité du régime des matières en suspension par rapport au régime hydrologique.

La relation entre teneur en matières en suspension et débit, décrit au cours du cycle hydrologique une courbe en forme de cloche (Figure 112), traduisant des capacités d'érosion du bassin qui augmentent pendant la montée des hautes eaux pour atteindre un maximum des concentrations antérieur à celui de la crue annuelle. A partir d'un certain seuil d'écoulement, il y a dilution des matières en suspension. A la décrue, la baisse des concentrations indique l'arrêt des processus actifs d'érosion pour la saison considérée (Olivry & al., 1988).

Dans les Andes boliviennes, cette relation entre teneurs en matières en suspension et débit présente souvent la même forme de courbe en cloche (Figure 70). En utilisant les moyennes mensuelles interannuelles, une enveloppe moyenne a ainsi été déterminée pour chaque station (Figure 113). L'évolution saisonnière observée sur l'ensemble de ces cours d'eau montre le phénomène classique d'augmentation plus rapide des concentrations lors du début de la crue, suivie d'une dilution des matières en suspension.

L'aire comprise dans l'enveloppe des valeurs moyennes peut être considérée comme un indice de non-univocité de la relation  $MES = f(\text{débit})$ . Cette aire semble être proportionnellement liée à l'aridité du bassin. Dans les quatre sous-bassins considérés, l'évolution de ces courbes de l'amont vers l'aval se traduit par une diminution de la variation des matières en suspension et des débits. Dans le bassin du Rio Piray, cette diminution de la variation des débits vers l'aval n'apparaît pas, au contraire, du fait de l'intense activité agricole de cette région où les prélèvements d'eau pour l'irrigation sont fréquents.

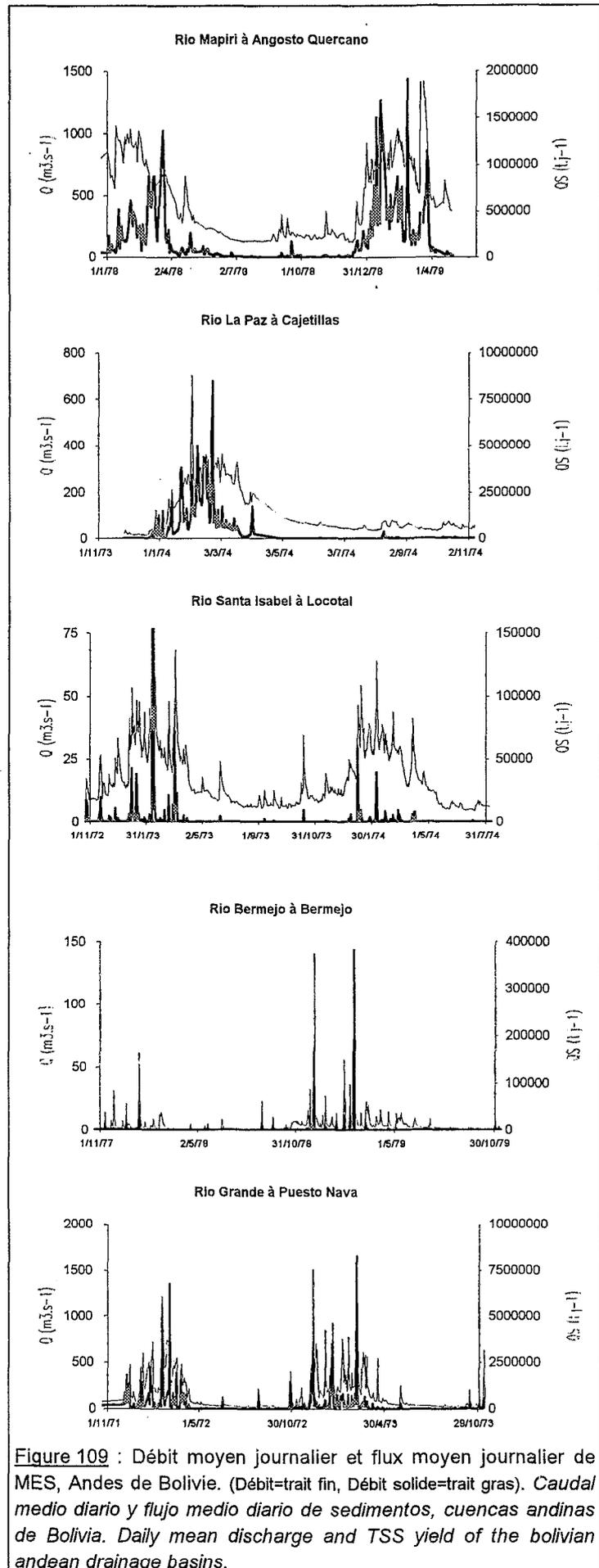


Figure 109 : Débit moyen journalier et flux moyen journalier de MES, Andes de Bolivie. (Débit=trait fin, Débit solide=trait gras). *Caudal medio diario y flujo medio diario de sedimentos, cuencas andinas de Bolivia. Daily mean discharge and TSS yield of the bolivian andean drainage basins.*

5. Les matières particulaires.

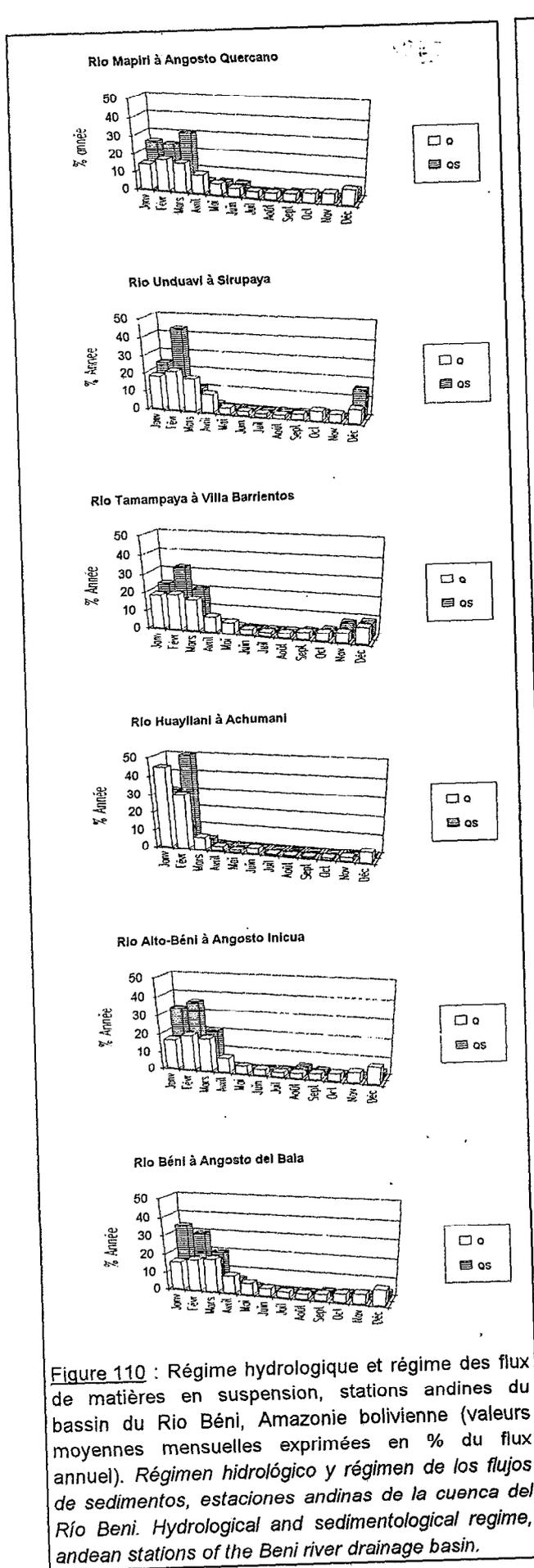


Figure 110 : Régime hydrologique et régime des flux de matières en suspension, stations andines du bassin du Rio Béni, Amazonie bolivienne (valeurs moyennes mensuelles exprimées en % du flux annuel). Régimen hidrológico y régimen de los flujos de sedimentos, estaciones andinas de la cuenca del Río Beni. Hydrological and sedimentological regime, andean stations of the Beni river drainage basin.

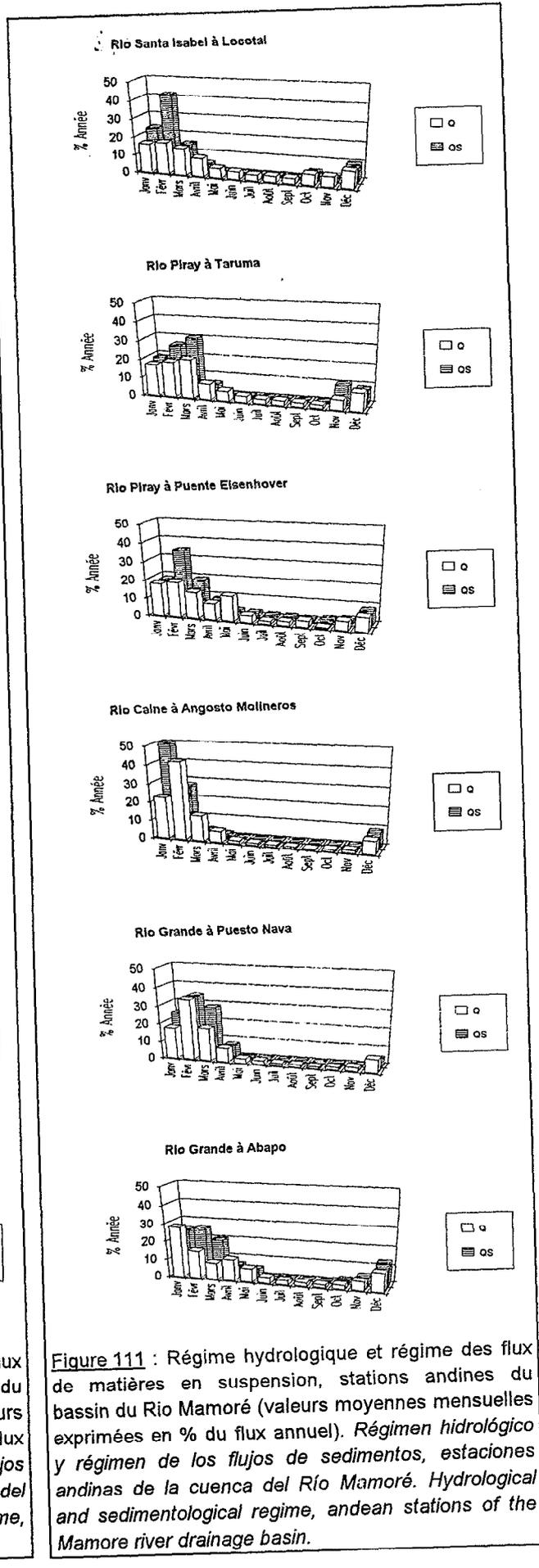


Figure 111 : Régime hydrologique et régime des flux de matières en suspension, stations andines du bassin du Rio Mamoré (valeurs moyennes mensuelles exprimées en % du flux annuel). Régimen hidrológico y régimen de los flujos de sedimentos, estaciones andinas de la cuenca del Río Mamoré. Hydrological and sedimentological regime, andean stations of the Mamore river drainage basin.



Photo : 33 : Jaugeage du Rio Béni à Angosto del Bala (280 m). Aforro del Río Beni en Angosto del Bala. Beni river gauging at Angosto del Bala.

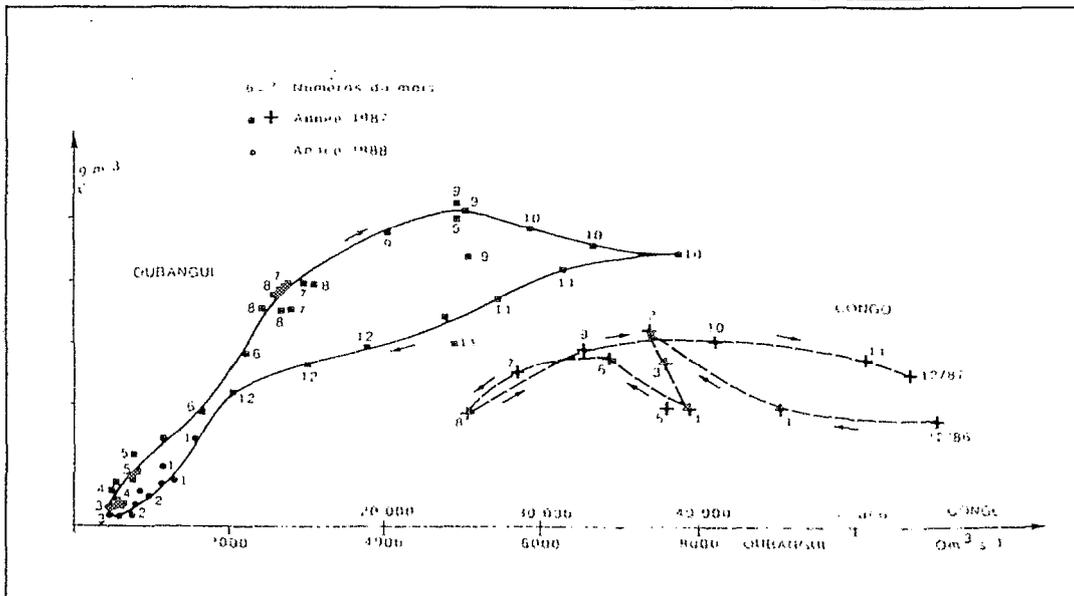
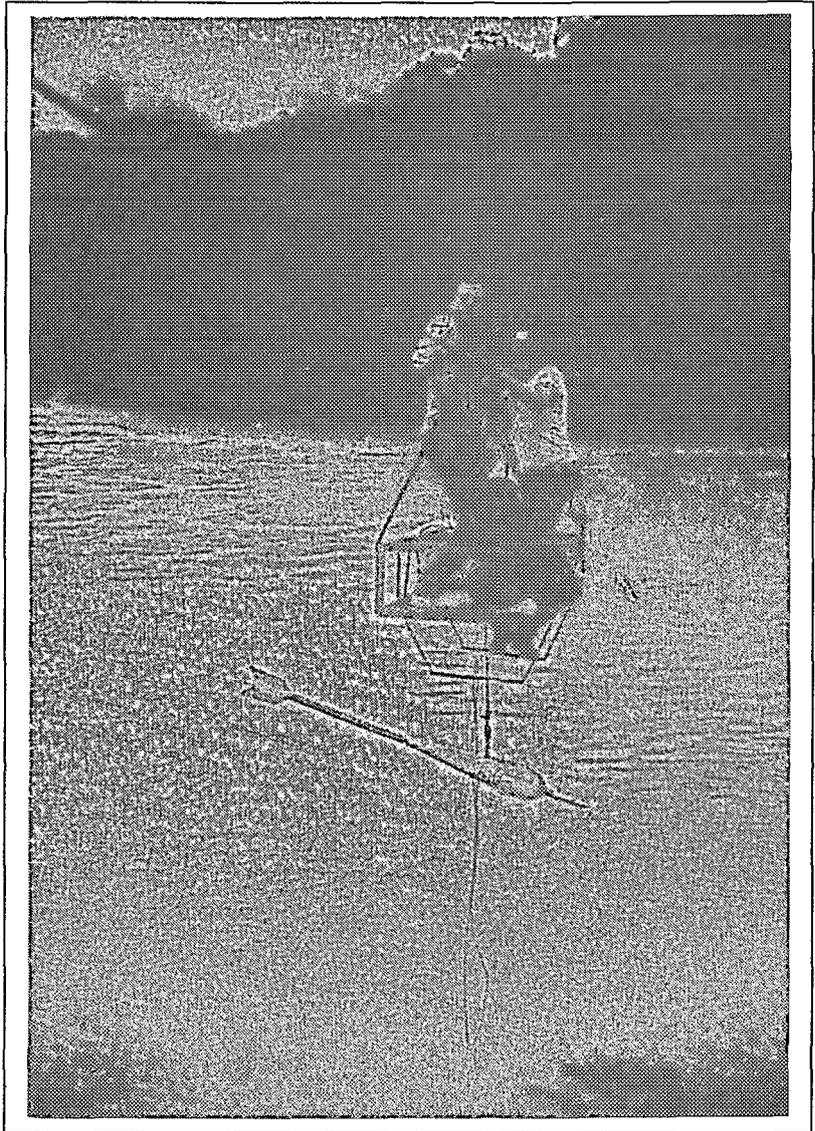
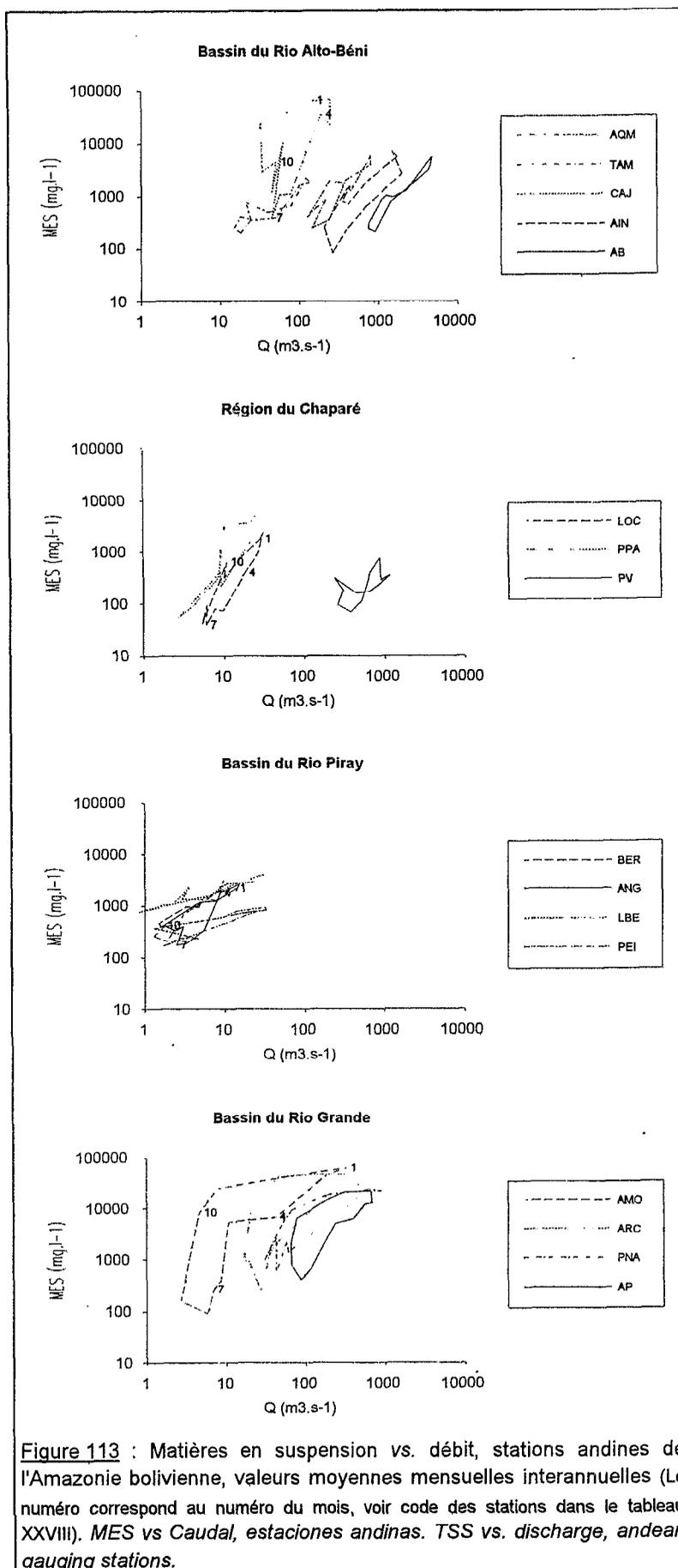


Figure 112 : Concentration des matières en suspension en fonction des débits sur le Congo et l'Oubangui, 1987-1988 (d'après Olivry & al., 1988). MES vs. caudal, rios Congo y Oubangui. TSS vs. discharge, Congo and Oubangui rivers.

5. Les matières particulaires.



### V.F.1.b. Dans les Llanos.

Les flux de matières en suspension présentent dans les Llanos des variations saisonnières nettement plus faibles que dans les Andes (Tableau XXIX). Les coefficients de variation (cv) des flux moyens mensuels sont toujours supérieurs à ceux des débits moyens mensuels pour la même station (Tableau X). Cette différence est moins sensible en plaine dans le bassin du Rio Mamoré. Les trois mois de hautes eaux andines (de Janvier à Mars) sont responsables de la moitié de l'exportation de sédiments en plaine, et ce pourcentage peut atteindre 80% aux stations du piedmont andin.

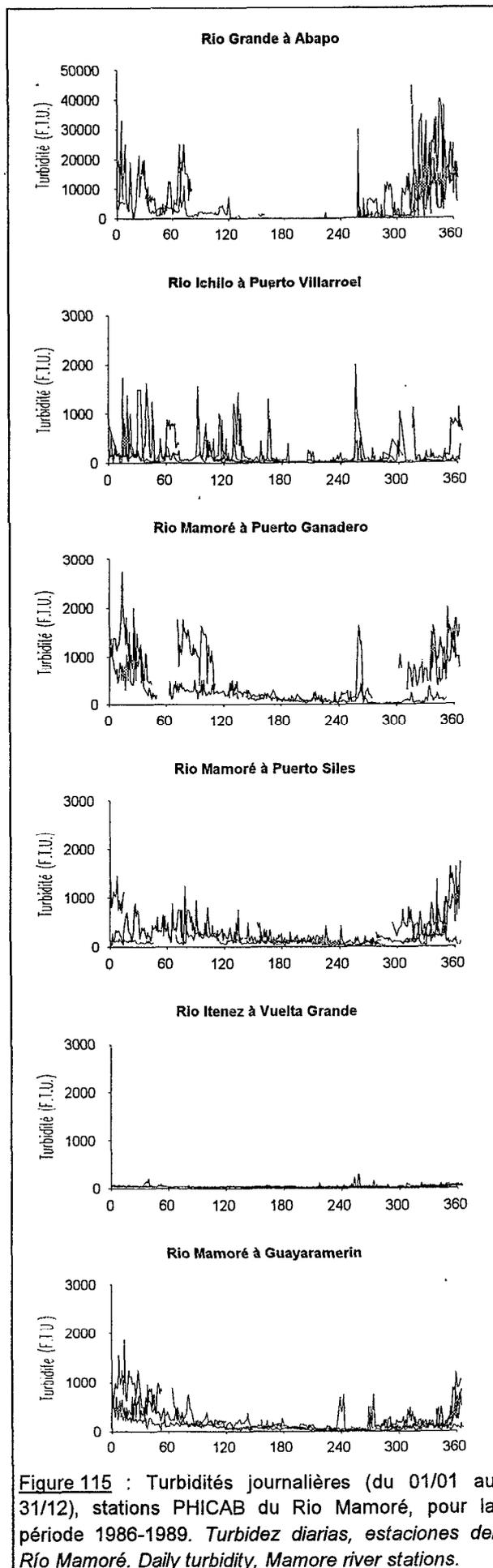
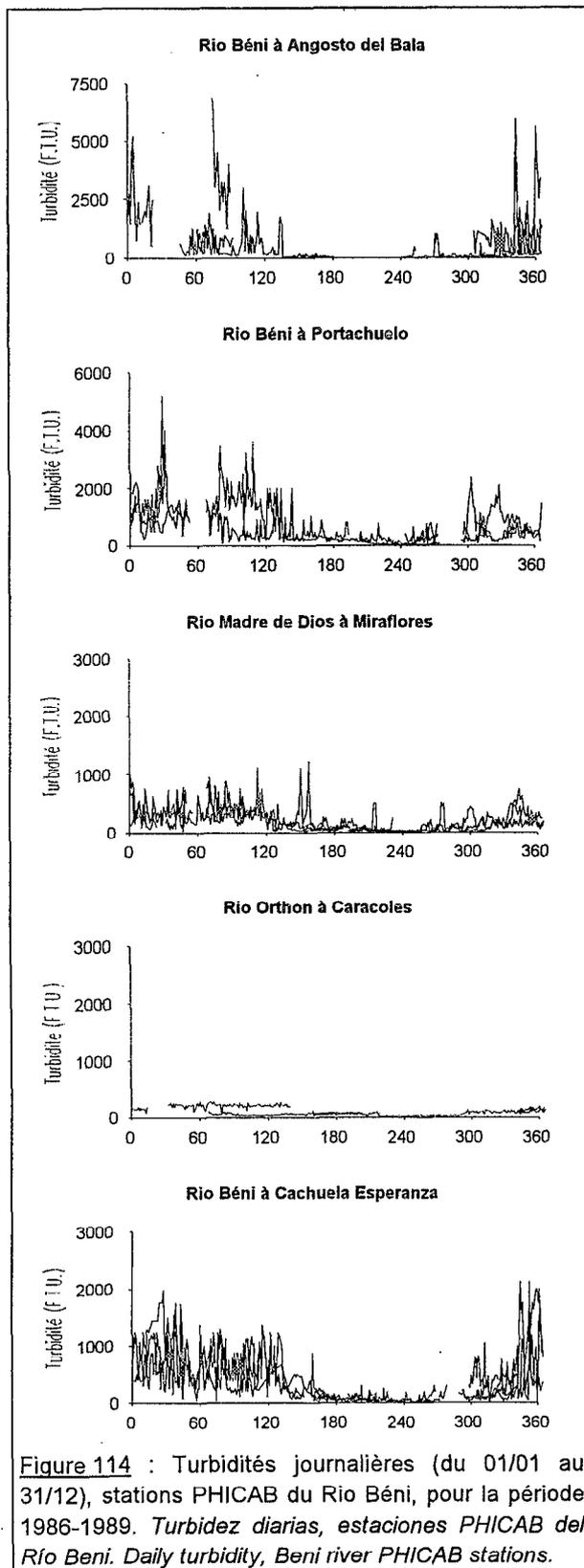
**Tableau XXIX** : Les matières en suspension aux stations du réseau PHICAB en Amazonie bolivienne [Alt.= altitude de la station, Sup.= superficie du bassin versant, Pér.= période d'observation, Nb.éch.= nombre d'échantillons de MES et de turbidité (Turb), MES= teneur moyenne en matières en suspension, MESp= teneur moyenne en matières en suspension pondérée par le débit, QS= flux moyen annuel de matières en suspension, CV= coefficient de variation des flux moyens mensuels au cours de l'année, JFM= poids des mois de Janvier-Février-Mars sur le volume annuel exporté]. *Las materias en suspension en las estaciones de la red PHICAB. Suspended sediment, PHICAB network stations.*

Code	Rio	Alt. (m)	Sup. (km <sup>2</sup> )	Pér.	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Nb. MES	éch. Turb.	MES (mg.l <sup>-1</sup> )	MESp (mg.l <sup>-1</sup> )	QS (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	CV	JFM (%)
AB	Béni à Angosto del Bala	280	67500	83-89	2050	107	541	1420	2550	165	1.4	81
PC	Béni à Portachuelo	130	119000	83-89	2870	91	745	740	1110	100	1.1	65
MF	Madre de Dios à Miraflores	130	124200	83-89	5090	226	1085	250	320	51	0.9	54
CA	Orthon à Caracoles	125	32300	83-89	460	112	483	110	100	1.5	0.7	43
CE	Béni à Cachuela Esperanza	120	282500	83-89	8920	174	1040	400	570	161	1.0	60
AP	Grande à Abapo	450	59800	83-89	300	221	876	7670	10600	100	1.5	61
PV	Ichilo à Puerto Villarroel	170	7600	83-89	590	118	857	230	330	6.1	0.7	50
PG	Mamoré à Puerto Ganadero	140	159100	83-89	3150	120	643	470	570	57	1.0	59
PS	Mamoré à Puerto Siles	130	216200	83-89	5350	148	883	230	250	42	0.8	47
VG	Itenez à Vuelta Grande	130	354300	83-89	2260	244	1181	30	20	1.6	0.8	51
GM	Mamoré à Guayaramerin	120	599400	83-89	8340	219	1236	230	240	62	0.8	53
	Madeira à Villabella	115	903500	83-89	17600			400		224	0.9	58

L'évolution saisonnière des turbidités journalières aux stations du réseau PHICAB (Figures 114 & 115) montre l'extrême variabilité temporelle des teneurs en matières en suspension au cours du cycle hydrologique. Malgré de fréquentes lacunes d'observation, les grandes tendances de la variabilité temporelle des teneurs sont nettement visibles.

Dans le bassin du Rio Béni (Figure 114), une diminution de l'amplitude de variation des turbidités est observée de l'amont vers l'aval, mais la distribution saisonnière reste la même. Au piedmont andin, à Angosto del Bala, les teneurs les plus fortes sont rencontrées lors des hautes eaux, mais aussi en fin d'étiage, en Décembre. En période de basses eaux, de Juin à Octobre, le flux de matières en suspension est quasiment nul. La même distribution saisonnière des teneurs sur le Rio Béni est observée à l'aval à Portachuelo, avec des concentrations légèrement plus faibles. Le Rio Madre de Dios présente un régime saisonnier des teneurs marqué, mais avec des concentrations beaucoup plus faibles que sur le Rio Béni à Portachuelo. En outre, des pics importants de turbidité sont fréquemment observés en basses eaux, traduisant des apports andins moins saisonniers que ceux du Rio Béni. Cette particularité est nettement visible sur l'hydrogramme de ce cours d'eau (Figure 52) dont le bassin andin du Pérou est soumis à un climat extrêmement pluvieux tout au long de l'année. Le Rio Orthon, où de très nombreuses lacunes d'échantillonnage affectent la qualité de l'information, présente toujours des turbidités faibles et relativement constantes au cours du cycle hydrologique. Enfin, à Cachuela Esperanza, le Rio Béni présente une synthèse des apports des rios Béni (66%) et Madre de Dios (33%), avec un régime saisonnier bien marqué où les plus fortes turbidités sont mesurées en fin d'étiage.

5. Les matières particulaires.



Dans le bassin du Rio Mamoré (Figure 115), les deux stations du piedmont andin ont des régimes différents. A Abapo sur le Rio Grande, le régime s'apparente assez à celui du Rio Béni à Angosto del Bala, avec une forte distribution saisonnière, et des maximums de turbidités en fin d'été. A Puerto Villarroel, le Rio Ichilo présente des bouffées de matières en suspension, étalées au cours de l'année, régime comparable à celui observé sur le Rio Piray (Figure 59), mais aussi à celui du Rio Madre de Dios. Cette différence provient sans doute de la taille du bassin, mais également de l'abondance des précipitations dans le Chaparé tout au long de l'année. Lors de la traversée des Llanos, le Rio Mamoré conserve un caractère nettement saisonnier, mais avec des teneurs de plus en plus faibles vers l'aval. Le Rio Itenez-Guaporé présente toujours des turbidités très faibles, et avec de très faibles variations au cours du cycle hydrologique.

Les distributions de fréquence des turbidités journalières montrent pour l'ensemble des stations du réseau PHICAB des courbes voisines, présentant une distribution normale à dissymétrie positive (Figure 116). Les fleuves d'origine andine (Rios Béni, Madre de Dios, Ichilo, Grande et Mamoré) se distinguent des autres (Rios Itenez et Orthon), par une dispersion plus grande des teneurs. Dans le bassin du Rio Béni, un second mode est perceptible aux stations de Angosto del Bala, Portachuelo et Cachuela Esperanza. Cette pluri-modalité est à rattacher à la forte hétérogénéité des bassins andins du Rio Béni, où certaines vallées (Rio La Paz, Luribay,...) présentent des teneurs en matières en suspension 1000 fois plus élevées que dans certaines vallées adjacentes.

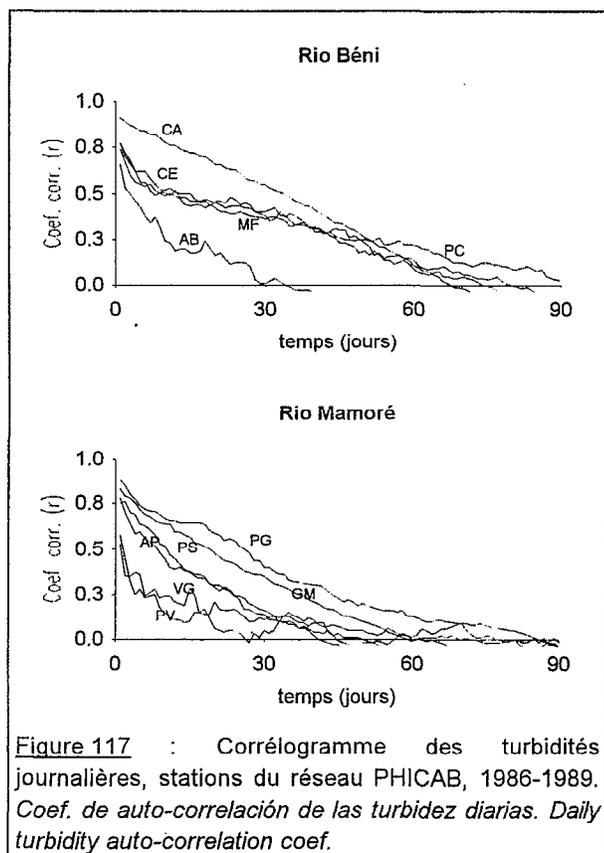


Figure 117 : Corrélogramme des turbidités journalières, stations du réseau PHICAB, 1986-1989. Coef. de auto-correlación de las turbidez diarias. Daily turbidity auto-correlation coef.

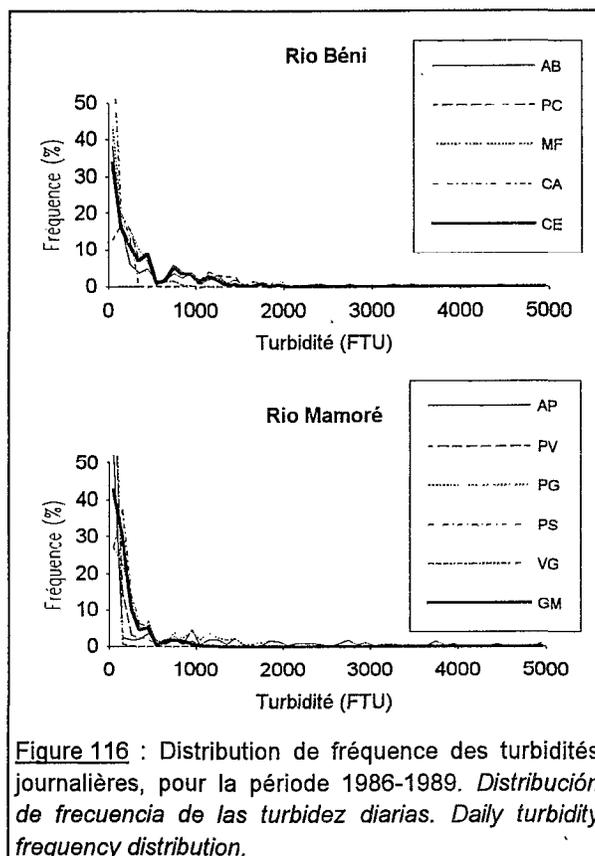


Figure 116 : Distribution de fréquence des turbidités journalières, pour la période 1986-1989. Distribución de frecuencia de las turbidez diarias. Daily turbidity frequency distribution.

Les résultats de l'analyse corrélatrice effectuée sur les valeurs journalières de la turbidité (Figure 117 et tableau XXX), confirment les observations faites pour les Rios Pilcomayo et Piray. Les coefficients d'auto-corrélation obtenus avec les turbidités sont toujours inférieurs, quand ils sont significatifs, à ceux des débits moyens journaliers (Tableau XI), et les valeurs du seuil de validité de ces coefficients (dts) sont nettement plus faibles ; de 10 à 20 jours pour les stations du piedmont andin, et de 25 à 50 jours pour les stations des Llanos.

Dans le bassin du Rio Béni, la station du piedmont andin (AB) montre une décroissance plus rapide du degré de liaison de valeurs successives, alors que le Rio Orthon en plaine présente des valeurs plus inter-dépendantes. Le Rio Béni en plaine (PC & CE), et le Rio Madre de Dios (MF) ont des courbes voisines.

Dans le bassin du Rio Béni, la station du piedmont andin (AB) montre une décroissance plus rapide du degré de liaison de valeurs successives, alors que le Rio Orthon en plaine présente des valeurs plus inter-dépendantes. Le Rio Béni en plaine (PC & CE), et le Rio Madre de Dios (MF) ont des courbes voisines.

## 5. Les matières particulaires.

Dans le bassin du Rio Mamoré, la station andine de Abapo sur le Rio Grande (AP) montre un résultat surprenant, avec une courbe voisine de celles des stations de plaine du Rio Mamoré. De même, le Rio Itenez présente une courbe comparable à celles des stations andines de Puerto Villarroel ou Angosto del Bala. Ces anomalies sont probablement dues aux lacunes d'observation, mais aussi à la précision des mesures en ce qui concerne le Rio Itenez, où les teneurs sont toujours très faibles.

Au vu de ces résultats, l'évaluation précise des flux de matières en suspension dans les fleuves du bassin amazonien de Bolivie, passe par un échantillonnage bimensuel (tous les 15 jours) à décadaire pour les stations des Llanos, et par un échantillonnage journalier à tous les 5 jours pour les stations du piedmont andin. La comparaison du régime des matières en suspension exportées (QS) avec le régime hydrologique (Q) aux mêmes stations (Figures 118 & 119) montre nettement la plus forte irrégularité du régime des matières particulaires.

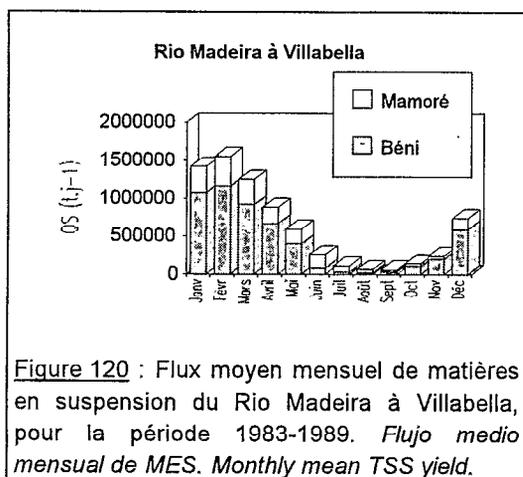
**Tableau XXX** : Coefficient de corrélation des turbidités journalières, aux stations du réseau PHICAB, pour la période 1986-1989, pour différents pas de temps [dts= seuil de validité au delà duquel le coefficient de corrélation n'est pas significativement différent de zéro] (Voir Tableau VII pour le code des stations).

*Coef. de auto-correlación de las turbidez diarias, estaciones de la red PHICAB.*

*Daily turbidity auto-correlation coef., PHICAB network stations.*

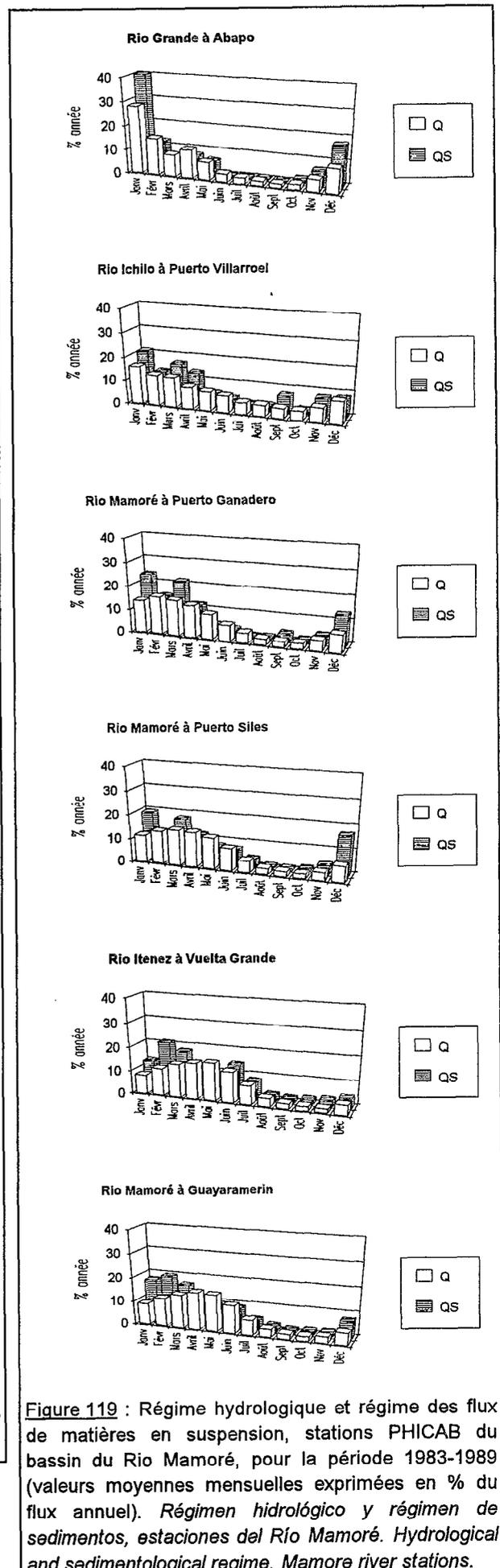
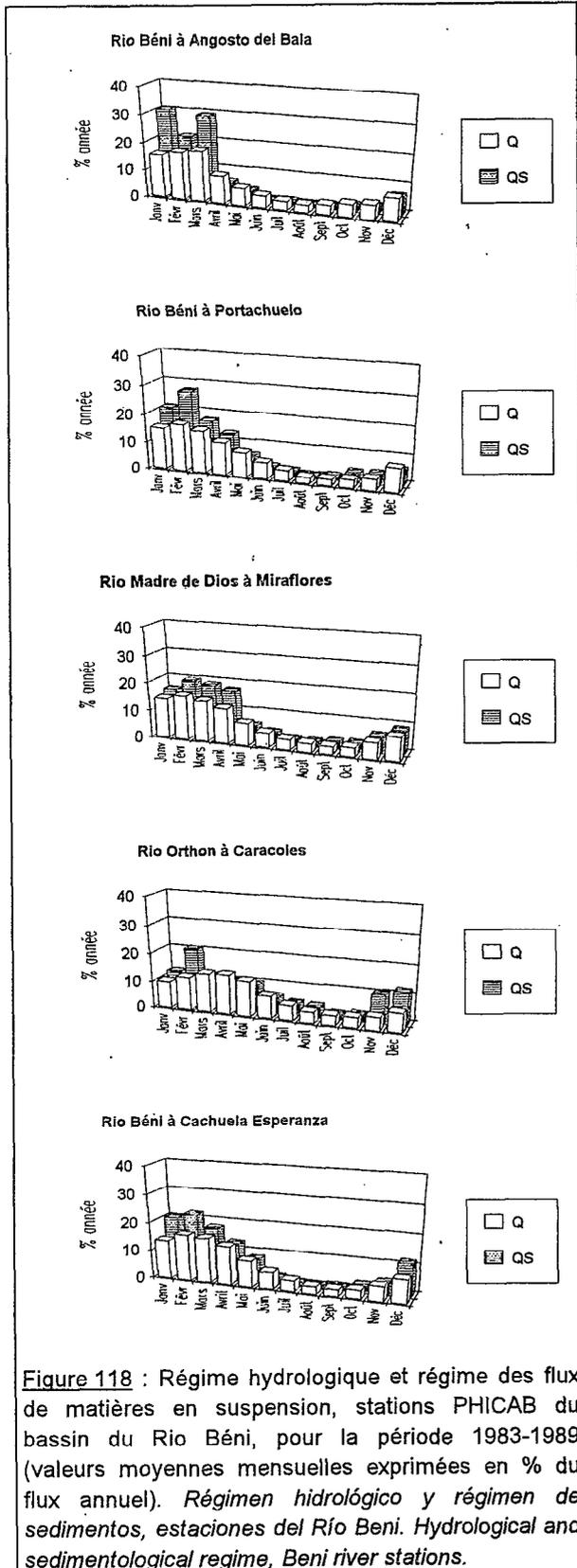
Code Station	dt=1j.	dt=3j.	dt=5j.	dt=10j.	dt=15j.	dt=30j.	dt=60j.	dt=90j.	dts (jours)
AB	0.66	0.50	0.42	0.24	0.18	0.01	-0.13	-0.12	11
PC	0.77	0.68	0.56	0.51	0.46	0.38	0.22	0.03	38
MF	0.74	0.60	0.55	0.49	0.43	0.36	0.14	-0.06	48
CA	0.91	0.87	0.84	0.78	0.72	0.55	0.11	-0.18	31
CE	0.77	0.66	0.62	0.52	0.50	0.40	0.09	-0.16	41
AP	0.78	0.64	0.60	0.45	0.38	0.14	-0.15	-0.21	24
PV	0.58	0.32	0.28	0.15	0.10	0.05	0.01	-0.04	12
PG	0.88	0.80	0.74	0.67	0.65	0.40	0.13	-0.04	30
PS	0.75	0.70	0.64	0.52	0.37	0.16	-0.12	-0.16	25
VG	0.53	0.35	0.36	0.24	0.28	0.11	0.00	-0.02	26
GM	0.83	0.78	0.72	0.64	0.57	0.35	-0.01	-0.15	35

Le maximum hydrologique et le maximum du flux sédimentaire coïncident sur les fleuves présentant un caractère andin (AB, PC, MF, CE, AP). Aux autres stations, un déphasage apparaît, et le maximum de flux de MES correspond toujours au maximum pluviométrique observé sur l'ensemble du bassin, de Décembre à Avril. Le mois de Février apparaît d'ailleurs souvent déficitaire en flux de matières particulaires, tout comme la pluviométrie pour la même période (Figure 40).

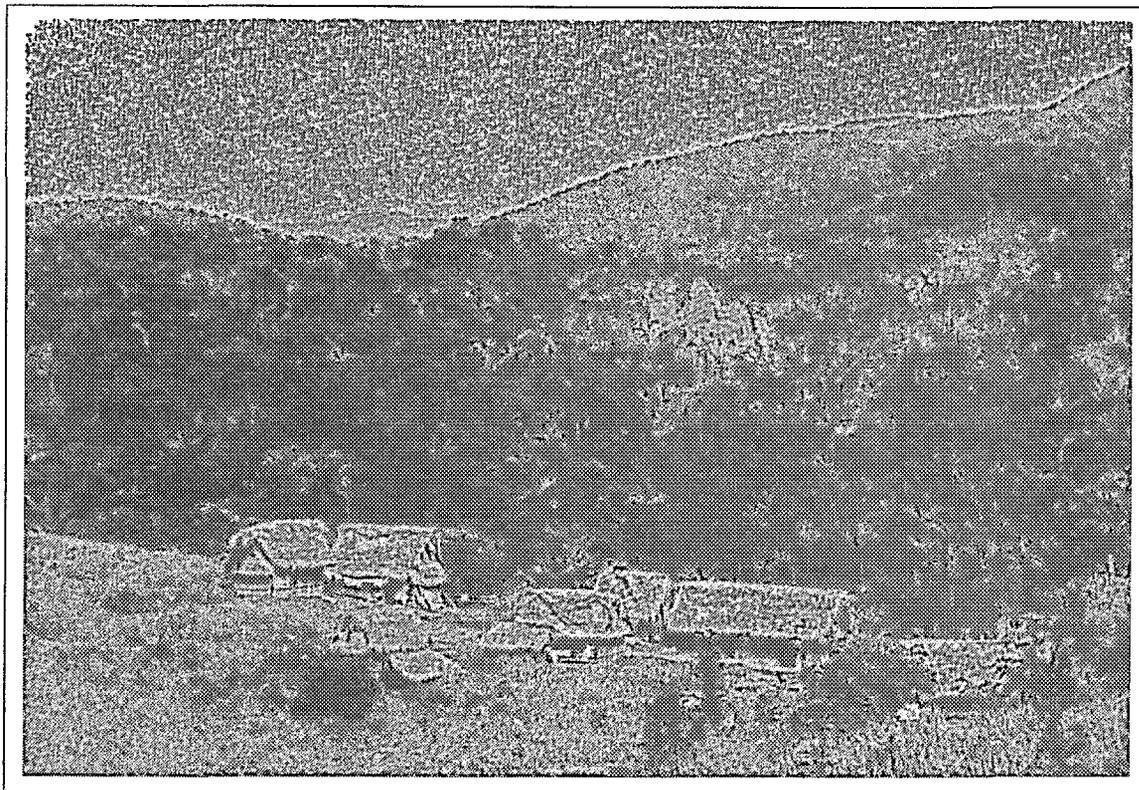


**Figure 120** : Flux moyen mensuel de matières en suspension du Rio Madeira à Villabella, pour la période 1983-1989. *Flujo medio mensual de MES. Monthly mean TSS yield.*

A Villabella, le Rio Madeira présente un régime de matières en suspension qui est la combinaison des flux mesurés sur les rios Béni et Mamoré (Figure 120). Le Rio Béni, qui est responsable de plus de 70% de l'exportation du Rio Madeira, détermine en fait la distribution saisonnière des teneurs du Rio Madeira, qui présente donc à Villabella un net caractère andin avec 58% du volume exporté de Janvier à Mars. La teneur en matières en suspension moyenne du Rio Madeira à Villabella est estimée à  $320 \text{ mg.l}^{-1}$ , à partir des flux respectifs des rios Béni et Mamoré. Pour la région drainée par le Rio Madeira à Villabella, et non incluse par les stations de Cachuela Esperanza et Guayaramerin ( $21600 \text{ km}^2$ ), les valeurs moyennes régionales de débit spécifique ( $14 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ ) et de teneurs en matières en suspension ( $100 \text{ mg.l}^{-1}$ ) ont été utilisées.

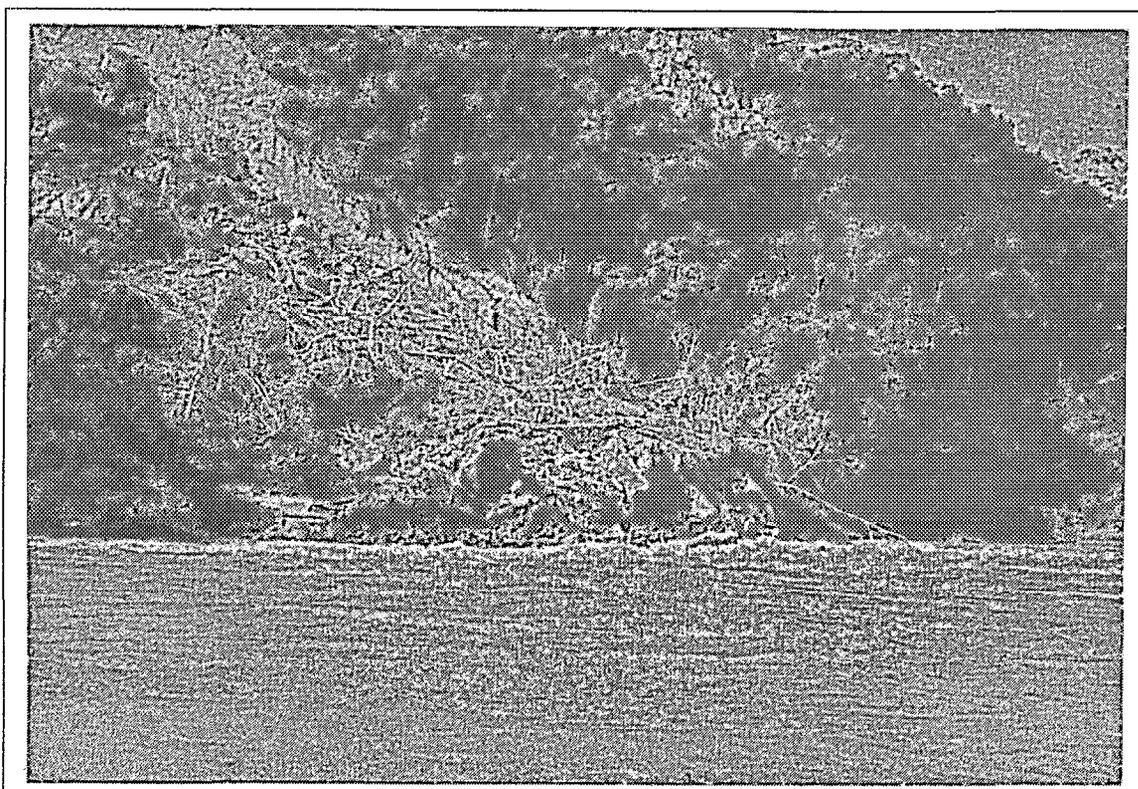


5. Les matières particulaires.



↑ Photo 34 : Les séries sédimentaires tertiaires dans l'Alto-Béni (800 m).  
*Las series sedimentarias terciarias en el Alto-Beni. Tertiary sedimentary series in the Alto-Beni area.*

↓ Photo 35 : Glissement de terrain en bordure du Río Alto-Beni (400 m).  
*Derrumbe en el Río Alto-Beni. Landslide in the Alto-Beni river*



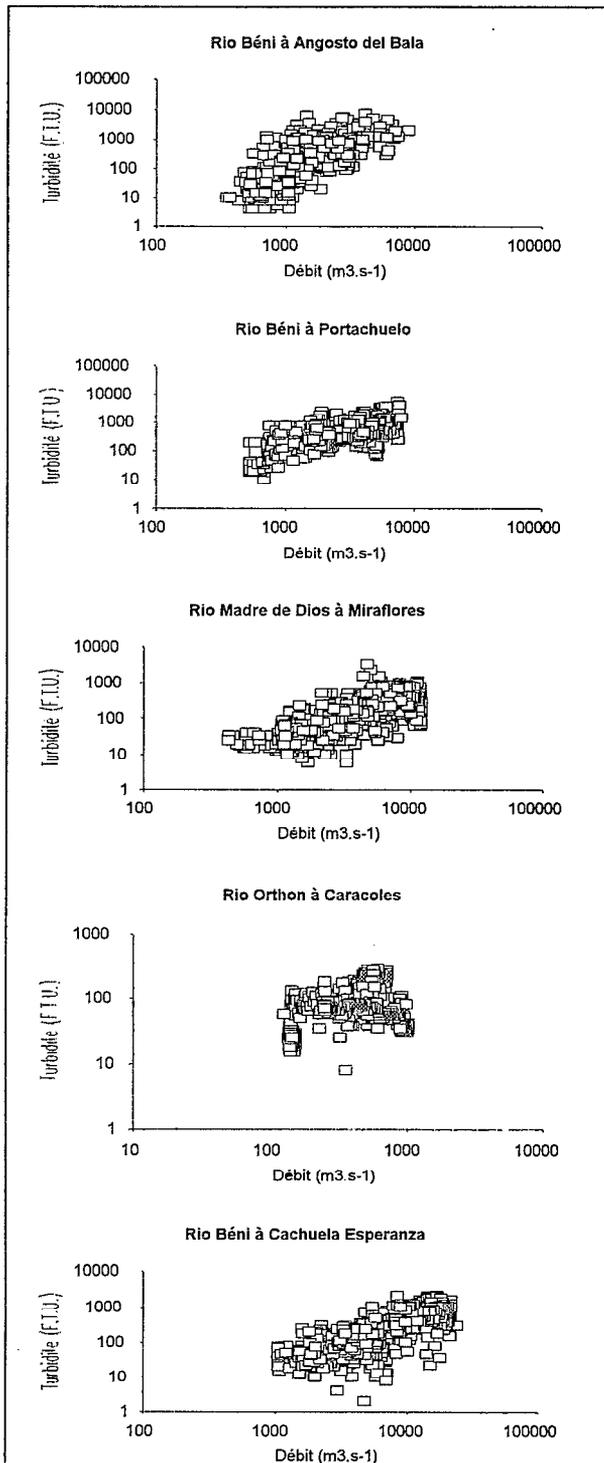


Figure 121 : Turbidité journalière vs. débit moyen journalier, stations PHICAB du bassin du Rio Béni, pour la période 1986-1989. *Turbidez diaria vs. caudal medio diario, estaciones del Río Beni. Daily turbidity vs. daily mean discharge, Beni river stations.*

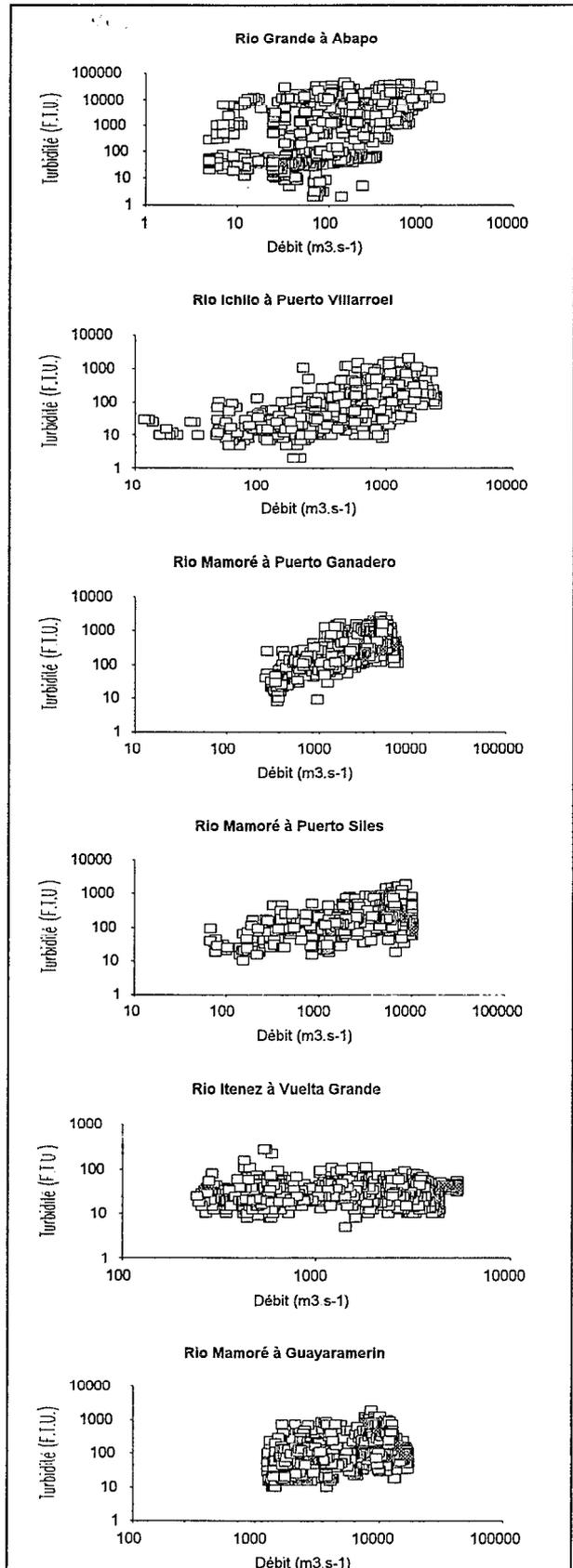
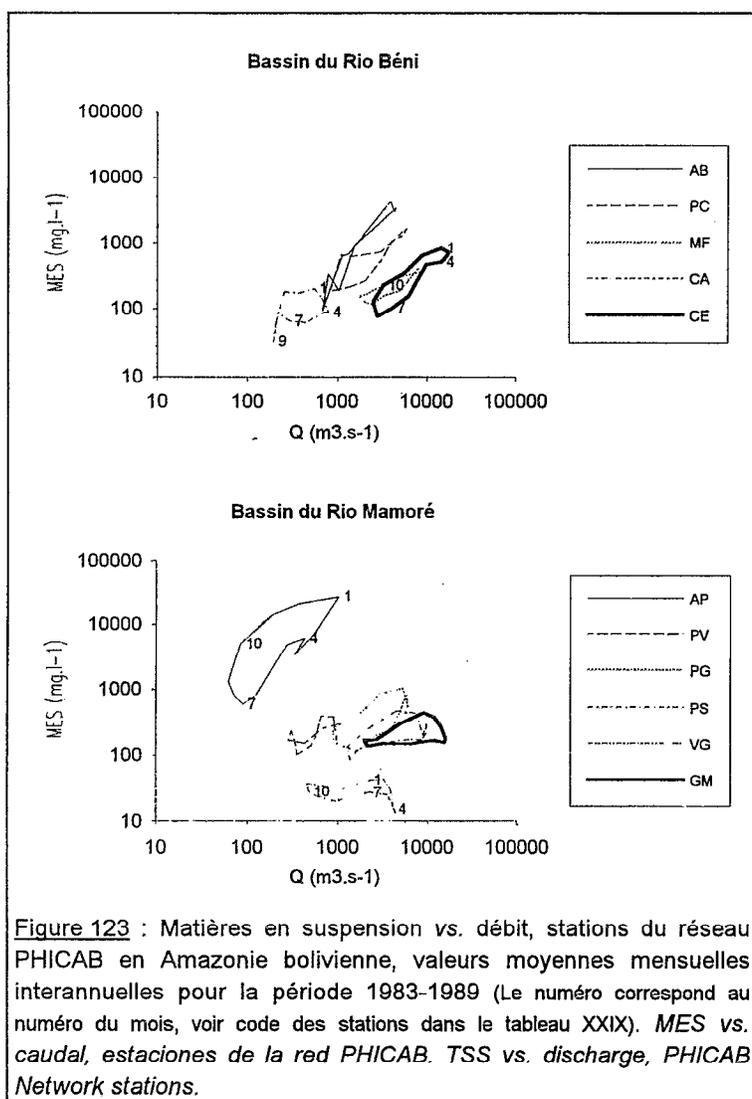


Figure 122 : Turbidité journalière vs. débit moyen journalier, stations PHICAB du bassin du Rio Mamoré, pour la période 1986-1989. *Turbidez diaria vs. caudal medio diario, estaciones del Río Mamoré. Daily turbidity vs. mean discharge, Mamore river stations.*

## 5. Les matières particulaires.



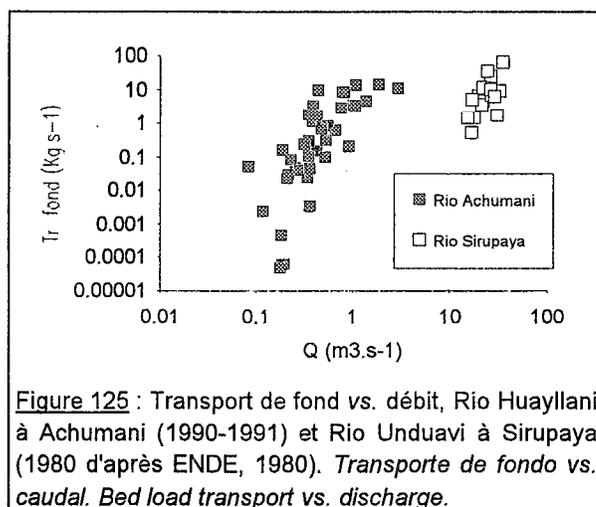
La relation liant la turbidité (ou les matières en suspension) au débit a été établie pour chacune des stations du réseau PHICAB en plaine amazonienne (Figures 121 & 122). Les fleuves à caractère andin présentent une liaison positive, avec une plus ou moins grande dispersion des points suivant les stations. La turbidité des fleuves non andins comme les rios Orthon et Itenez, mais aussi le Rio Mamoré à Guayaramerin apparaît constante et sans relation avec les débits.

En utilisant les valeurs moyennes mensuelles inter-annuelles (1983-1989) du débit et des matières en suspension, une courbe enveloppe moyenne peut être définie pour chaque station (Figure 123). L'évolution saisonnière des cours d'eau à caractère andin est comparable à celle observée dans les Andes (Figure 113), avec une augmentation plus rapide des concentrations lors du début de la période de crue, suivie d'une dilution des matières en suspension. L'évolution de l'amont vers l'aval se traduit par une diminution de la variabilité des débits et des teneurs, et une baisse de la pente liant MES et débit. Les courbes des fleuves de plaine (Rios Orthon et Itenez) s'apparentent à celles de l'Oubangui et du Congo (Figure 112).

### V.F.2. Le transport de fond.

#### V.F.2.a. Dans les Andes.

Les études du charriage ou transport de fond dans les Andes sont très peu nombreuses et concernent des projets d'aménagement hydro-électriques (ENDE, 1980; Asociación ICLA, 1982). A La Paz, une étude du transport solide a été entreprise avec la mairie (HAM), pour développer un plan d'urbanisation dans la zone d'Achumani-Cota Cota (Bourges & Guyot, 1989). A cette occasion, le PHICAB a effectué en 1990 et 1991 des mesures de charriage à l'aide de préleveurs de fabrication locale. Les quelques résultats obtenus ont montré que la totalité du transport de fond s'effectue en période de hautes eaux (Figure 124).



Le transport de fond, lié à la vitesse de l'écoulement (Larras, 1972; Lebreton, 1974; Vanoni, 1977), est donc directement proportionnel au débit (Figure 125). Aucune évolution saisonnière n'a été individualisée du fait de la très courte durée des crues où le charriage a pu être mesuré.

**V.F.2.b. Dans les Llanos.**

Dans les Llanos, aucun prélèvement de transport de fond n'a pu être réalisé sur les fleuves de l'Amazonie bolivienne, du fait de l'absence d'infrastructures adéquates pour l'échantillonnage.

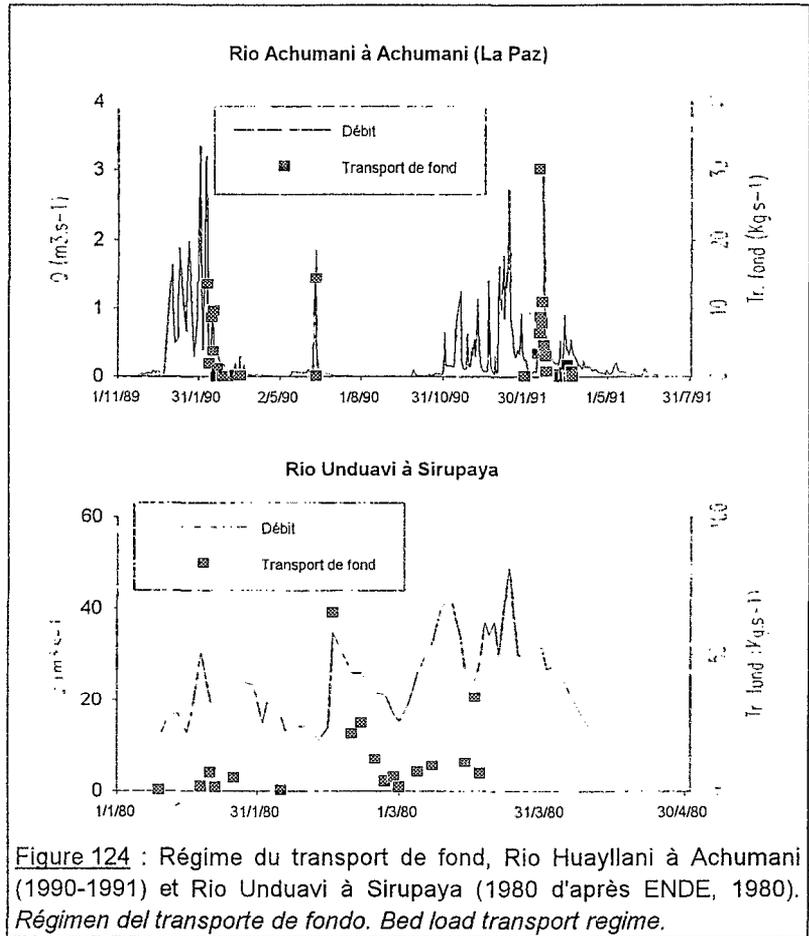


Figure 124 : Régime du transport de fond, Rio Huayllani à Achumani (1990-1991) et Rio Unduavi à Sirupaya (1980 d'après ENDE, 1980). Régimen del transporte de fondo. Bed load transport regime.

↓ Photo 36 : Le Rio Chaparé à Villa Tunari (300 m), au piedmont des Andes.

*El Río Chapare en Villa Tunari, piemonte de los Andes. The Chapare river at Villa Tunari, Andes foothills.*



## **V.G. LE BILAN.**

### **V.G.1. Transport de fond et matières en suspension.**

La part du transport de fond (charriage et saltation) sur le flux total des matières particulaires exportées par un bassin est un paramètre difficile, voire impossible pour les grands fleuves, à mesurer directement. Quelques rares études ont toutefois été réalisées sur des petits bassins versants, parfois sur des parcelles, afin d'estimer cette forme de transport solide.

Au Niger, des mesures effectuées sur fosses à sédiments à l'exutoire de bassins de 3 à 10 hectares ont montré que la valeur moyenne annuelle du charriage varie de 32 à 45% de l'exportation totale de sédiments (Vuillaume, 1968). Des mesures similaires réalisées en Centrafrique sur des bassins de même taille, ont donné des résultats très variables d'un bassin à l'autre, avec un poids moyen annuel de sédiments charriés variant de 20 à 70% (Callède, 1974). Sous forêt tropicale guyanaise, les bassins du programme ECEREX (de 1 à 1.5 ha) présentent également des résultats variables d'un bassin à l'autre, avec des valeurs de transport de fond qui représentent de 23 à 83% des sédiments exportés (Roche, 1982). Des études réalisées sur des parcelles de 100 m<sup>2</sup> en Afrique occidentale ont donné des résultats comparables, avec un transport de fond moyen variant de 10 à 80% du flux total, d'une parcelle à l'autre (Roose, 1981). En Europe, sur des bassins d'échelle kilométrique, le charriage mesuré est généralement faible et représente moins de 5% du volume total de sédiment (Ferguson & al., 1987; Johnson, 1988), mais en zone montagneuse sous glaciers (Alpes suisses), ce pourcentage peut atteindre localement 65% (Gurnell & al., 1988). Aux Etats-Unis, des mesures réalisées sur des rivières de moyenne importance ont montré que le transport de fond est généralement de l'ordre de 5% du flux total de sédiments (Emmett, 1981).

#### **V.G.1.a. Dans les Andes.**

Dans les Andes de Bolivie, les études de faisabilité de retenues d'eau ont permis d'obtenir des résultats pour quelques rivières. Ces données ne concernent que la période de hautes eaux, et les moyennes obtenues sont vraisemblablement supérieures aux moyennes annuelles. Ainsi, le charriage observé sur le Rio Unduavi à Sirupaya (270 km<sup>2</sup>) représente 13% du volume total de sédiments (ENDE, 1980), avec des variations temporelles très importantes : de 0.4 à 61%. Sur le bassin andin du Rio Pilcomayo, formateur du Rio Paraguay, le transport de fond est respectivement responsable de 10 et 11% du flux annuel de sédiments aux stations de Angosto Talula (6340 km<sup>2</sup>) et de Viña Quemada (13200 km<sup>2</sup>), pour la période 1979-1981 (Palenque, 1981; Asociación ICLA, 1982; Vollmers & Palenque, 1983).

A La Paz, l'étude réalisée sur le Rio Achumani en 1990 et 1991 a montré que le transport de fond dans un petit bassin (38 km<sup>2</sup>) est du même ordre de grandeur que celui observé dans des cours d'eau andins plus importants, avec une valeur moyenne de 13% du flux total, et des valeurs extrêmes de 0.1 à 56%. En utilisant les données du comblement de retenues dans le haut bassin du Rio Achumani, par des sédiments grossiers pouvant être assimilés à du transport de fond, la production spécifique en éléments grossiers est estimée à 500 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> (Martin, 1977). Cette valeur correspond à 10% environ du flux de matières en suspension observé aux stations de ce bassin qui contrôlent les rios Huayllani et Achumani (Tableau XXXI).

Au vu de ces résultats peu nombreux, mais homogènes, la valeur moyenne de 10% sera utilisée pour le calcul du flux total de matières particulaires exporté par les bassins andins de l'Amazonie bolivienne.

#### **V.G.1.b. Dans les Llanos.**

Il n'existe aucune mesure de transport de fond concernant les grands fleuves du bassin amazonien. Une estimation de ce flux a été réalisée au Brésil en utilisant la formule de Yalin qui donne pour l'Amazone à Obidos des valeurs variant de 2000 à 20000 t.j<sup>-1</sup> en période de hautes eaux, soit moins de 1% du flux de matières en suspension (Mertes, 1985).

Dans les Llanos de Bolivie, l'utilisation de la même formule de Yalin (Rubio, 1991) a permis d'obtenir des résultats similaires à ceux calculés en Amazonie centrale brésilienne (Mertes, 1985). Ces résultats sont également comparables à ceux calculés dans le bassin du Rio Ichilo-Mamoré par

la même formule de Yalin (Berdeja, 1987 in Cordova, 1988). A Guayaramerin, le transport de fond du Rio Mamoré est ainsi estimé à 1.8% du transport total de matières particulaires, avec des taux variant de 0.4% à 3.8%. A Cachuela Esperanza, sur le Rio Béni, ces pourcentages varient de 0.6% à 3%, pour une valeur moyenne annuelle de 1.3%. La valeur moyenne de 1.5% sera utilisée pour l'estimation du transport de fond dans les Llanos de Bolivie.

**Tableau XXXI** : Taux de transport en suspension et caractéristiques géographiques des bassins andins de l'Amazonie bolivienne. [Sup.= superficie du bassin, Kc= indice de compacité, LRe= Longueur du rectangle équivalent, Alt\_min= altitude de la station, Alt\_max= altitude maximum, Alt\_moy= altitude moyenne du bassin, Pm= indice de pente, Pr= pente du cours d'eau principal, Ruiss.= ruissellement, IL= indice lithologique de sensibilité à l'érosion, IPS= indice de protection du sol, Forêt= partie du bassin possédant une couverture forestière, Ts= taux de transport en suspension moyen].

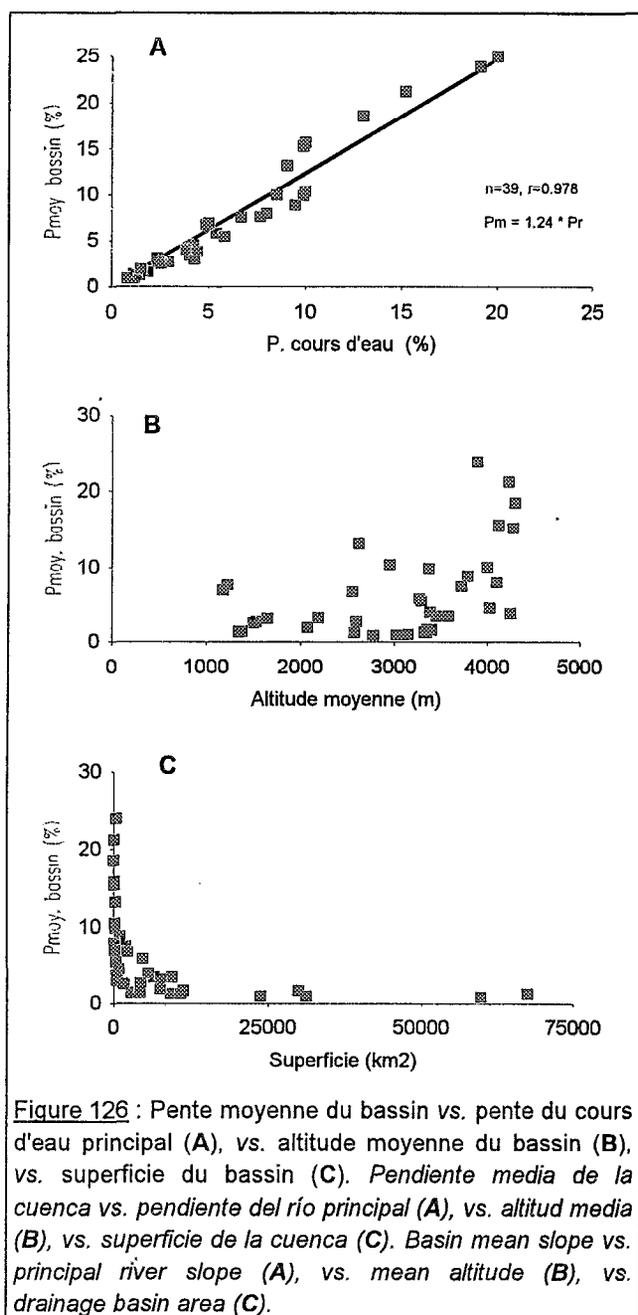
*Transporte de materias en suspensión y características geográficas de las cuencas andinas.*  
*Suspended sediment transport and geographic characteristics of the andean drainage basins.*

Code Station	Sup. (km <sup>2</sup> )	Kc	LRe (km)	Alt_min (m)	Alt_max (m)	Alt_moy (m)	Pm (%)	Pr (%)	Ruiss. (mm/an)	IL	IPS	Forêt (%)	Ts (t/km <sup>2</sup> .an)
AQM	9400	1.30	170	500	6400	3450	3.4	4.1	1410	4.7	4.1	44	3900
SRC	4700	1.19	97	440	6100	3270	5.8	5.4	1750	3.8	5.0	78	1500
ACM	61	1.25	13	2960	5500	4230	21.2	15.2	1450	3.5	0.0	0	16
UNV	66	1.38	16	2940	5300	4120	15.7	10.0	1430	3.2	0.7	0	30
SIR	270	1.47	36	1640	5100	3370	9.9	9.9	1400	3.5	1.7	0	7400
TAM	950	1.37	59	1185	6400	3793	8.8	9.5	1730	3.6	1.2	0	2500
VBA	1900	1.27	73	1050	6400	3725	7.5	6.7	1110	3.8	1.8	9	4100
HUL	17	1.25	7	3620	4975	4298	18.6	13.0	190	30.0	1.8	0	4000
ACH	38	1.23	10	3580	4975	4278	15.3	9.9	170	34.0	1.9	0	5300
LUR	810	1.57	68	2550	5500	4025	4.5	4.2	390	15.4	1.6	0	7900
POR	240	1.37	30	2500	5500	4000	10.0	8.5	380	6.2	1.4	0	3300
VER	140	1.12	12	2830	5800	4315			1130	2.0	2.4	0	79
MIG	360	1.12	19	1980	5800	3890	23.9	19.1	1490	2.0	2.3	0	130
CAJ	6500	1.43	167	760	6400	3580	3.4	4.0	480	7.5	1.7	1	18300
COT	5600	1.19	106	1270	5500	3385	4.0	3.9	470	4.2	2.2	0	7300
MIS	350	1.27	31	3700	4800	4250	3.8	4.4	400	4.5	1.4	0	34
AIN	29900	1.47	374	400	6400	3400	1.6	1.9	890	8.0	3.5	38	3800
AB	67500	1.36	494	280	6400	3340	1.2	1.4	1010	8.9	4.3	57	3200
VIN	50	1.23	11	3700	4500	4100	8.0	8.0	510	4.0	6.0	100	66
LOC	200	1.28	24	1700	4200	2950	10.4	10.0	2370	6.8	5.5	84	3400
SPE	320	1.17	24	1040	4200	2620	13.2	9.0	2660	5.7	5.6	85	11000
ICO	2300	1.14	58	600	4500	2550	6.7	4.9	1780	5.1	4.7	70	5000
SEH	420	1.56	48	1980	4600	3290	5.5	5.8	830	4.0	2.8	16	230
PV	7600	1.21	130	170	4200	2185	3.2	2.4	2450	17.6	6.0	99	710
BER	480	1.55	51	900	2400	1650	3.0	4.3	280	4.6	5.5	100	1300
ANG	1420	1.30	66	650	2400	1525	2.7	2.9	240	4.4	5.3	100	2000
TAR	1590	1.34	74	600	2400	1500	2.5	2.6	160	6.1	5.3	100	820
ELV	64	1.39	16	650	1800	1225	7.7	7.7	250	4.8	5.3	88	470
ESP	203	1.16	19	550	1800	1175	6.9	5.0	400	12.0	5.0	83	2100
LBE	2880	1.75	148	350	2400	1375	1.4	1.3	130	14.5	4.7	86	800
PEI	4160	1.64	163	280	2400	1340	1.3	1.2	160	21.4	4.0	68	240
AMO	9200	1.62	239	1850	4800	3325	1.2	1.4	200	9.4	1.5	0	13700
HUR	11200	1.41	214	1600	5100	3350	1.6	1.6	200	5.0	0.7	0	1300
ARC	23700	1.57	367	1500	4800	3150	0.9	1.2	170	6.8	1.2	0	6500
PNA	31200	1.70	470	950	5100	3025	0.9	1.1	220	6.1	1.6	0	6600
MIZ	10800	1.67	270	950	4200	2575	1.2	1.3	140	4.6	2.5	3	1300
PAZ	4360	1.30	116	1080	4100	2590	2.6	2.4	230	6.2	3.2	10	510
AP	59800	1.55	572	450	5100	2775	0.8	0.8	150	7.2	2.5	18	2100
SAN	7500	1.35	163	550	3600	2075	1.9	1.5	330	18.8	4.7	83	2600

## V.G.2. Bilan global : érosion et sédimentation.

### V.G.2.a. Dans les Andes.

Le bilan de matières particulaires a été établi sur la quarantaine de bassins andins du versant amazonien de Bolivie, pour lesquels il existait des chroniques de données suffisantes (Tableau XXVIII). Le calcul du flux annuel de matières particulaires permet d'estimer dans les Andes un taux de transport en suspension (Ts) moyen annuel (Tableau XXXI). Ce taux de transport peut être assimilé à un taux d'érosion mécanique pour les petits bassins versants de montagne, mais il ne correspond pas à une réalité physique du fait des phénomènes de stockage sédimentaire dans les plaines alluviales et sur le piedmont. Les valeurs ainsi calculées ne sont que des ordres de grandeur, compte tenu de la diversité des sources d'information, de la grande variabilité du nombre d'échantillons, et de périodes d'observations souvent courtes et non concomitantes.



Les résultats obtenus indiquent une très forte hétérogénéité régionale des taux de transport en suspension dans les Andes de Bolivie. Les valeurs les plus faibles ( $T_s < 100$ ) sont observées en tête de petits bassins dont la superficie reste inférieure à  $200 \text{ km}^2$ . Ces taux faibles s'expliquent par la présence de roches dures des séries intrusives qui forment les sommets de la cordillère orientale. Les taux les plus élevés ( $T_s > 10000$ ) s'observent dans les zones arides (Rio La Paz et Rio Caine), mais aussi sur des petits bassins hyper-humides du Chaparé. Des vallées adjacentes peuvent souvent présenter des taux de transport en suspension qui diffèrent d'un facteur 10.

De nombreux auteurs ont essayé à déterminer l'influence des différents paramètres géomorphologiques et bioclimatiques sur la production de sédiments (Anderson, 1954; Schumm, 1954, 1963, 1977; Langbein & Schumm, 1958; Fournier, 1960; Corbel, 1964; Ahnert, 1970; Jansen & Painter, 1974; McPherson, 1975; Lal & al., 1977; Wilson, 1977; Dunne, 1979; Pinet & Souriau, 1988; Probst, 1990).

Pour cela, les paramètres caractérisant la topographie, la géologie et la végétation des bassins andins (Tableau XXXI) ont été déterminés à partir des cartes topographique, hydrographique, géologique et de couverture végétale de la Bolivie au  $1/1,000,000^{\text{ème}}$  (IGM, 1980, 1985; YPFB/GEOBOL, 1978; GEOBOL, 1978). Les cartes topographiques au  $1/250,000^{\text{ème}}$  de l'IGM ont également été utilisées quand elles existaient. L'indice de compacité ( $K_c$ ) est un indice de forme du bassin versant, qui est égal à :  $K_c = P/(2(\pi S)^{0.5})$ , où P et S sont respectivement le périmètre et la superficie du bassin. Cet indice permet le calcul des dimensions (largeur et longueur : LRe) d'un rectangle équivalent. La pente moyenne du bassin ( $P_m$ ) est calculée comme étant le rapport entre la

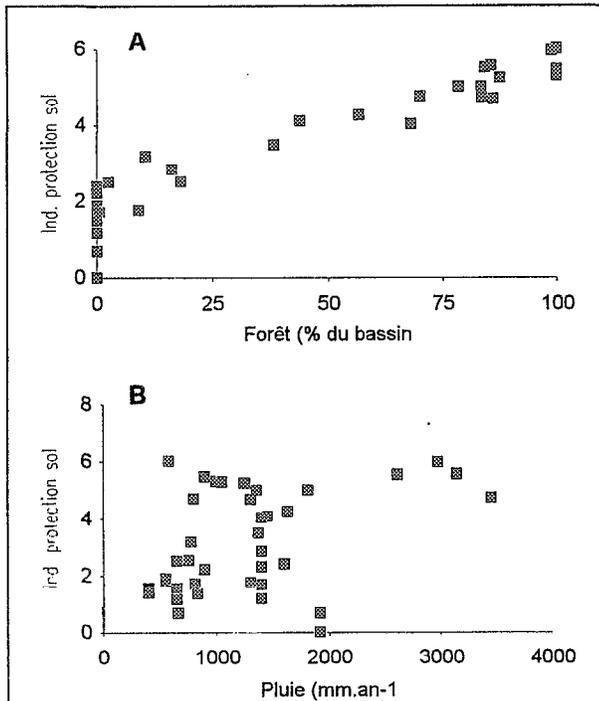


Figure 127 : Indice de protection du sol vs. extension de la forêt (A), vs. pluviométrie annuelle (B). *Índice de protección del suelo vs. extensión de la selva (A), vs. pluviometría (B). Protection soil index vs. forest extension (A), vs. annual rainfall (B).*

dénivelée totale et la longueur du rectangle équivalent (Roche, 1963). Cette pente est équivalente au "Relief ratio" proposé par Schumm (1954, 1963). Le ruissellement (ou écoulement, drainage, "runoff") est en fait équivalent au débit spécifique, ramené en mm.an<sup>-1</sup>. La pente moyenne du bassin (Pm) ainsi calculée est bien corrélée à la pente du cours d'eau principal. La pente augmente avec l'altitude moyenne du bassin versant et diminue avec la superficie (Figure 126).

Pour chacun des bassins andins, le pourcentage d'affleurement des différentes séries répertoriées sur la carte géologique de Bolivie (YPFB/GEOBOL, 1978) a été mesuré. Un indice lithologique de sensibilité à l'érosion (IL) est déterminé pour chaque bassin en utilisant les coefficients proposés par Chorley & al. (in Probst, 1990) pour chaque type de roches. De la même manière, les différents types de végétation et d'occupation des sols, qui ont en Bolivie un impact important sur l'érosion (LeBaron & al., 1979), ont été planimétrés pour tous les bassins à partir de la carte de couverture végétale de Bolivie (GEOBOL, 1978). Ces résultats ont permis le calcul d'un indice de protection du sol par la végétation (IPS) en utilisant pour chaque type de couverture végétale les coefficients proposés par Probst (1990). Cet indice de protection des sols est très lié au pourcentage de couverture forestière du bassin. La relation entre cet indice et la pluviométrie présente un décrochement très marqué vers 1500 mm.an<sup>-1</sup>

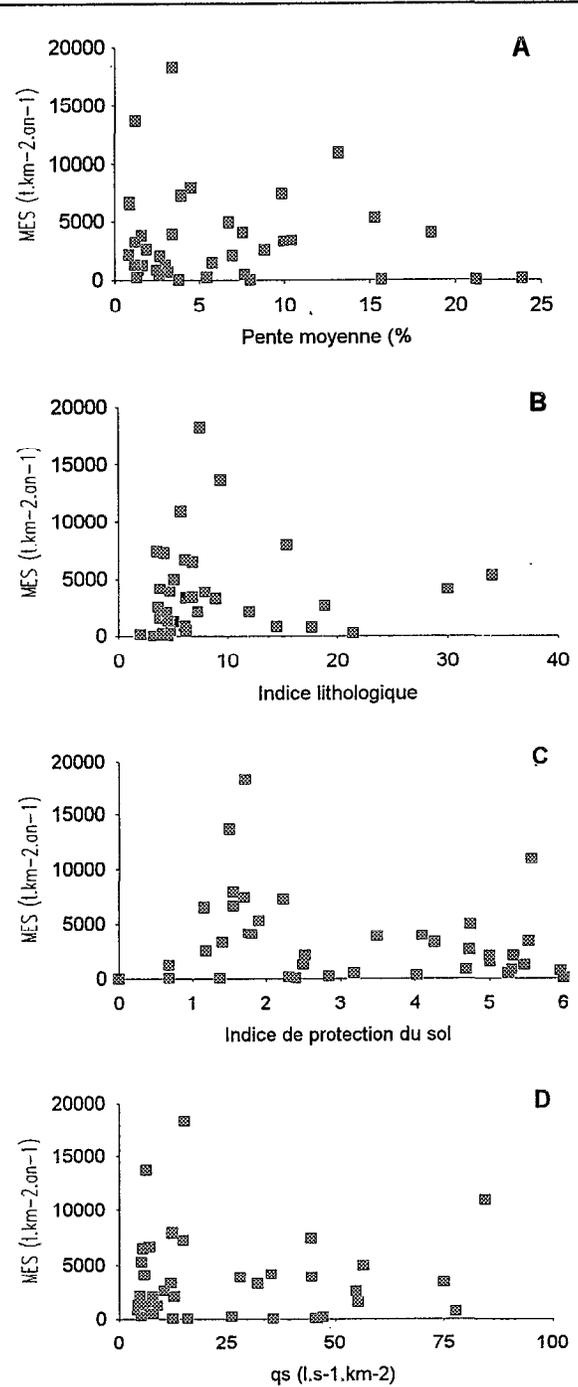


Figure 128 : Taux de transport en suspension vs. pente moyenne (A), vs. indice lithologique de sensibilité à l'érosion (B), vs. indice de protection du sol (C), vs. débit spécifique (D). *Transporte en suspensión vs. pendiente medio (A), vs. índice litológico (B), vs. índice de protección del suelo (C), vs. caudal específico (D). Suspended sediment transport vs. mean slope (A), vs. lithologic index (B), vs. soil index (C), vs. specific discharge (D).*

de précipitation (Figure 127). Ce phénomène qui est fréquemment observé est attribué au passage d'une formation végétale à une autre (Langbein & Schumm, 1958, Probst, 1990). Dans les Andes boliviennes, ce phénomène est accentué par les petits bassins en haute montagne où la couverture végétale peut être nulle, avec des précipitations abondantes, du fait des basses températures.

La relation liant le taux de transport en suspension moyen annuel ( $T_s$ ) et les différentes caractéristiques biogéographiques n'est jamais simple (Figure 128) du fait de l'inter-relation et de la compétition de ces paramètres. La pluie, nécessaire à l'érosion entraîne une augmentation de la couverture végétale, qui va limiter l'action érosive. De même, la pente qui est le véritable moteur de l'érosion mécanique, est plus forte quand les roches sont dures, donc moins sensibles à l'érosion.

En distinguant 3 classes de valeurs de l'indice lithologique de sensibilité à l'érosion, la relation liant le taux de transport en suspension aux autres paramètres présente quelques particularités (Figure 129). Pour des valeurs de  $IL > 5$ , l'érosion mécanique est bien une fonction de l'altitude moyenne du bassin versant, alors qu'il n'existe aucune relation entre ces deux paramètres pour une valeur de  $IL < 5$ . De la même façon, la lithologie influence la relation liant le taux de transport en suspension et le ruissellement. Les bassins où  $IL > 10$  déterminent une relation nettement différente, avec une pente beaucoup plus forte, que ceux où  $IL < 5$ . Une relation analogue a été observée au Maroc en zone semi-aride (Probst & Amiotte-Suchet, 1992).

En conséquence, la distinction de bassins en fonction de l'indice lithologique de sensibilité à l'érosion permet de distinguer deux domaines andins : un domaine à roches résistantes ( $IL < 5$ ), et un domaine où l'érosion est plus active du fait d'une érodabilité plus grande des affleurements rocheux ( $IL > 5$ ). Cette distinction est particulièrement sensible sur la relation liant le flux de matières particulaires au flux liquide dans les bassins andins de Bolivie (Figure 130).

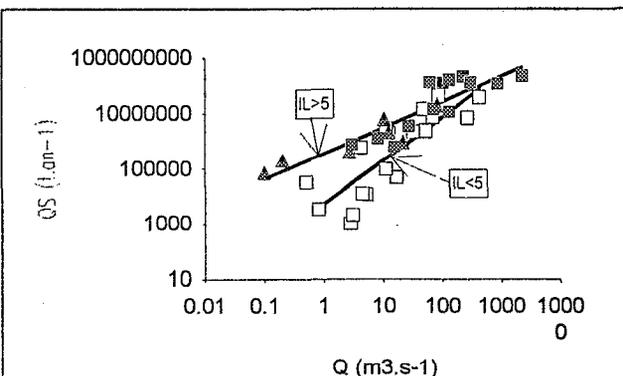


Figure 130 : Flux de matières en suspension vs. débit, bassins andins de Bolivie, pour différentes valeurs de l'indice lithologique de sensibilité à l'érosion. *Flujo de MES vs. caudal, para diferentes valores del índice litológico. TSS yield vs. discharge, for different lithologic index values.*

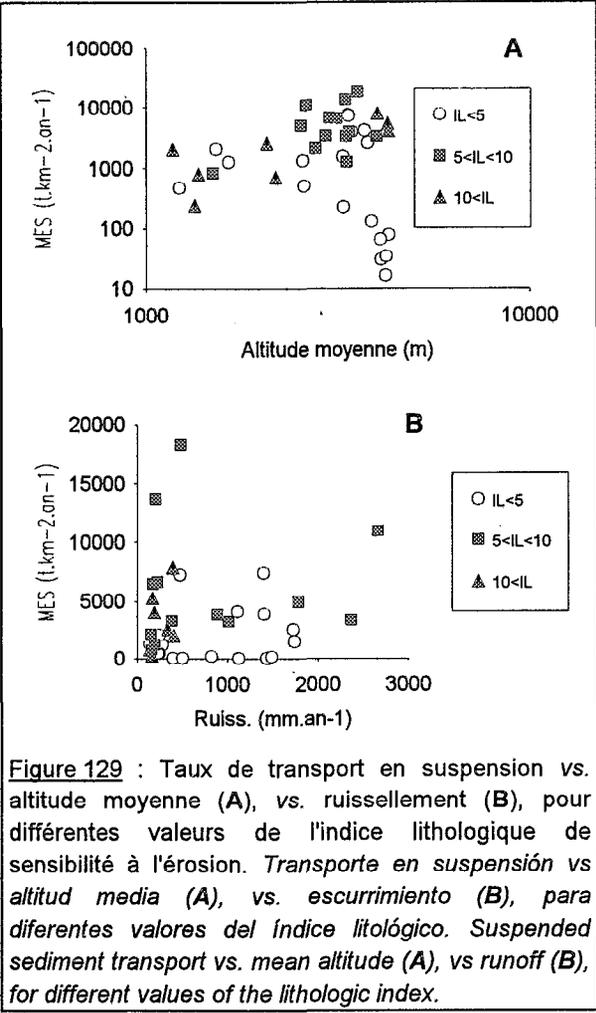


Figure 129 : Taux de transport en suspension vs. altitude moyenne (A), vs. ruissellement (B), pour différentes valeurs de l'indice lithologique de sensibilité à l'érosion. *Transporte en suspensión vs altitud media (A), vs. escurrimiento (B), para diferentes valores del índice litológico. Suspended sediment transport vs. mean altitude (A), vs runoff (B), for different values of the lithologic index.*

L'ensemble des résultats portant sur la quarantaine de bassins andins du versant amazonien montre la complexité des processus de l'érosion mécanique dans cette région montagneuse. Il n'existe aucun paramètre qui puisse expliquer seul, de façon satisfaisante, les résultats obtenus. Aussi, il n'est pas étonnant de constater de réelles différences entre les valeurs de la carte de susceptibilité à l'érosion hydrique de Freeman (in Brockmann, 1986) réalisée sur des bases morpho-climatiques, et les résultats obtenus sur bassins versants. La recherche d'une relation multivariable liant les taux d'érosion aux différents paramètres

géographiques évoqués sera entreprise ultérieurement sur l'ensemble des Andes de Bolivie, incluant les résultats obtenus sur les bassins de l'Altiplano et du Rio Paraguay (Guyot & al., 1990).

Les taux de transport en suspension moyen annuel ne sont en fait que des ordres de grandeur. D'ailleurs, à l'intérieur même des Andes, la comparaison des flux de matières en suspension transportées de l'amont vers l'aval indique qu'une partie non négligeable du matériel particulaire se dépose (Figure 131).

Dans le bassin du Rio Piray, en ne considérant que la période 1977-1981 pour laquelle il existe des données sur toutes les stations, l'évolution de l'amont vers l'aval du débit solide montre une augmentation progressive dans les Andes, pour diminuer ensuite après La Belgica. La perte de près de 60% du flux de matières particulaires entre La Belgica (LBE) et Puente Eisenhower (PEI), s'effectue en réalité en plaine et non dans les Andes, le piedmont se situe vers Taruma (TAR). Le maximum de débit solide est enregistré à La Belgica et non à Taruma, du fait des apports latéraux d'autres tributaires andins comme les rios Elvira et Espejos.

Dans le bassin du Rio Grande, le même phénomène de sédimentation d'une partie des matières en suspension est observé. La perte de 40% de matériel sédimentaire entre Puesto Nava (PNA) et Abapo (AP) s'effectue dans les Andes. De même, dans le bassin de l'Alto-Béni, la station de Angosto Inicua (AIN) présente un flux de MES déficitaire d'environ 30% par rapport à la somme des flux observés à Cajetillas (CAJ) et Cotacajes (COT), malgré de nombreux apports latéraux.

En extrapolant aux bassins andins voisins n'ayant pas fait l'objet d'un échantillonnage, les valeurs moyennes régionales les plus plausibles, un premier bilan de l'exportation de matières en suspension a pu être réalisé (Tableau XXXII). Ce bilan ne prend en compte que les bassins boliviens du versant amazonien, et ne concerne donc pas les tributaires andins du Rio Madre de Dios, situés au Pérou. La superficie totale de cette région est de 173200 km<sup>2</sup>, dont 86% ont effectivement fait l'objet de mesures de transport solide (Tableau XXVIII). Les stations de Angosto del Bala et de Abapo, sur les rios Béni et Grande, contrôlent respectivement 39% et 35% de la totalité de ce bassin versant. La partie andine du bassin versant amazonien de Bolivie exporte un flux moyen de matières en suspension estimé à 500 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>. Avec le transport de fond (10%), le flux de matières particulaires sortant des Andes doit être de l'ordre de 550 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>, ce qui équivaut à un taux de transport en suspension moyen de 3200 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>. En utilisant une porosité moyenne de 5% (Castany, 1982) et une densité moyenne de 2.6 (Bariand & al., 1977), ce taux d'érosion mécanique correspond à une ablation moyenne de 1.3 mm.an<sup>-1</sup>, comparable à celle mesurée sur l'Himalaya (Goswami, 1985). Bien qu'il soit délicat de comparer une telle valeur d'érosion actuelle, avec des données géologiques intégrant plusieurs millions d'années, il est intéressant de remarquer que le taux

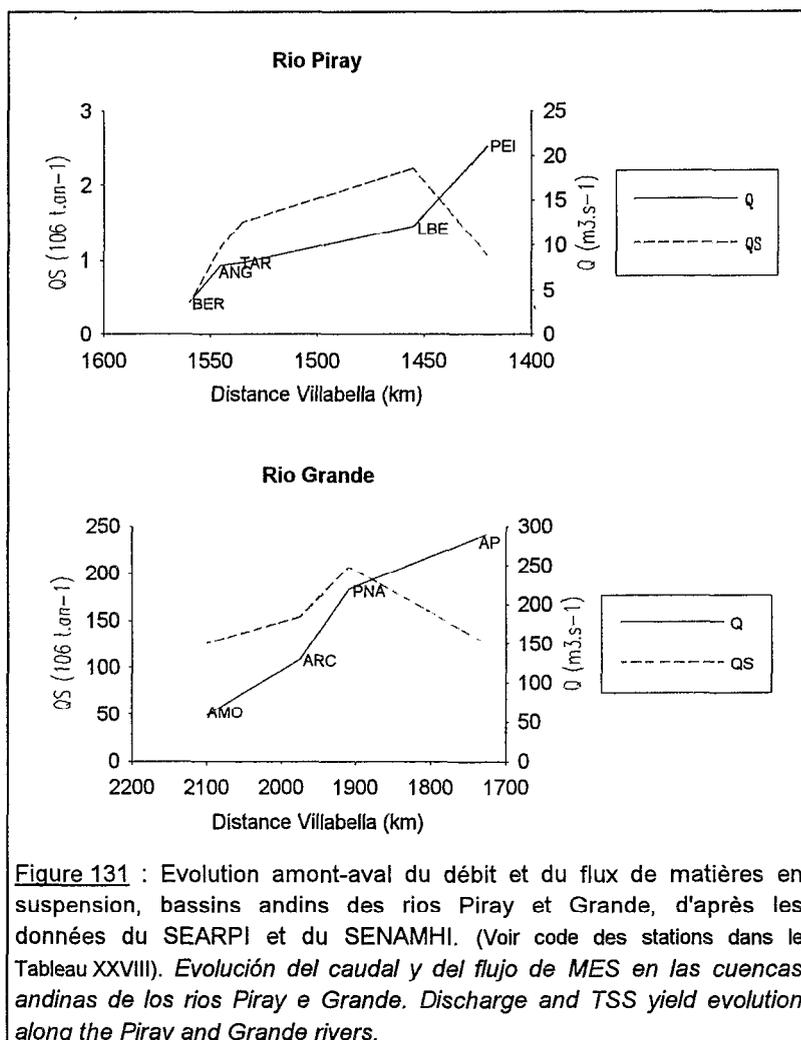


Figure 131 : Evolution amont-aval du débit et du flux de matières en suspension, bassins andins des rios Piray et Grande, d'après les données du SEARPI et du SENAMHI. (Voir code des stations dans le Tableau XXVIII). *Evolución del caudal y del flujo de MES en las cuencas andinas de los rios Piray e Grande. Discharge and TSS yield evolution along the Piray and Grande rivers.*

## 5. Les matières particulaires.

d'érosion mécanique moyen des Andes du bassin amazonien de Bolivie correspond au double de la valeur estimée de l'érection de la chaîne andine, mesurée à partir des traces de fission dans la cordillère orientale de Bolivie (Benjamin & al., 1987).

**Tableau XXXII :** Bilan de l'exportation de matières en suspension des bassins andins du versant amazonien de Bolivie. *Balance del transporte de materias en suspensión de las cuencas andinas, Amazonia boliviana. Suspended sediment yield budget of the andean basins, bolivian Amazon drainage basin.*

Rio	Superficie		Flux de MES	
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	(%)
Madidi	2600	2	8	2
Béni	68600	40	220	44
Yacuma	2700	2	11	2
Aperé	900	1	4	1
Sécuré	5200	3	21	4
Chaparé	5500	3	28	6
Ichilo	7600	4	30	6
Yapacani	7000	4	20	4
Piray	2800	2	6	1
Grande	61200	35	130	26
Parapeti	9100	5	22	4
Total	173200	100	500	100

### V.G.2.b. Dans le bouclier brésilien.

Etablir un bilan du flux de matières particulaires issues du bouclier brésilien est quelque peu délicat du fait de l'absence de stations de mesure sur de tels cours d'eau en Bolivie. Par contre, les données obtenues à la station du DNAEE de Pontes e Lacerda sur le Rio Guaporé, située au Brésil, permettent d'obtenir une première approximation (Tableau XXXIII).

**Tableau XXXIII :** Les matières en suspension dans un bassin du bouclier brésilien [Alt.= altitude de la station, Sup.= superficie du bassin versant, Pér.= période d'observation, Org.= organisme gestionnaire, Nb.éch.= nombre d'échantillons, MES= teneur moyenne en matières en suspension, QS= flux moyen annuel de matières en suspension, Ts= taux de transport en suspension moyen annuel]. *Las materias en suspensión de una cuenca del escudo brasileiro. Suspended sediment for one brazilian shield drainage basin.*

Rio	Alt. (m)	Sup. (km <sup>2</sup> )	Pér.	Org.	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Nb. éch.	MES (mg.l <sup>-1</sup> )	QS (10 <sup>3</sup> t.an <sup>-1</sup> )	Ts (t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )
Guaporé à Pontes e Lacerda	300	2500	79-84	DNAEE	50	17	25	40	16

Malgré un échantillonnage très réduit, ce résultat est concordant avec ceux obtenus au Brésil sur d'autres bassins de ce type (Bordas & al., 1988, 1991). Le taux de transport en suspension moyen du bouclier brésilien doit être de l'ordre de 15 à 20 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> (Guyot & al., 1989).

En extrapolant cette valeur à l'ensemble des cours d'eau du bassin amazonien de Bolivie drainant ces formations précambriennes (Tableau XXXIV), le flux global de matières particulaires issus du bouclier brésilien est estimé à environ 4.5 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>, en tenant compte d'une valeur de transport de fond de 1.5%. Cette valeur est 100 fois plus faible que celle de l'exportation de matériel sédimentaire en provenance des bassins andins dont la superficie totale ne représente que 70% de la superficie des bassins drainant le socle.

**Tableau XXXIV** : Bilan de l'exportation de matières en suspension des bassins du bouclier brésilien en Amazonie bolivienne. *Balance del transporte de materias en suspensión del escudo brasileiro en la Amazonía boliviana. Suspended sediment yield budget of the brazilian shield, bolivian Amazon drainage basin.*

Río	Superficie		Flux de MES	
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	(%)
Béni	900	0.4	0.02	0.4
Mamoré*	12100	5	0.2	5
Itenez*	6900	3	0.1	3
Machupo-San Julian	15200	6	0.3	6
Blanco-Baures	61200	25	1.1	25
Guaporé-Paragua	151900	61	2.7	61
Total	248200	100	4.3	100

[\* : les superficies mentionnées pour le Río Mamoré et le Río Itenez correspondent aux apports supplémentaires des tributaires situés à l'aval de Principe da Beira].

### V.G.2.c. Dans les Llanos.

L'établissement du bilan de matières particulaires dans les Llanos de Bolivie, pour la période d'observation 1983-1989 (Figure 132 & Tableau XXXV), met en évidence d'importants phénomènes de sédimentation d'amont en aval le long des rios Béni et Mamoré (Guyot & al., 1988, 1989). Ce phénomène, déjà observé dans les basses vallées andines, s'accroît nettement en plaine, et les taux de transport en suspension moyen du bassin n'ont plus de signification réelle. La limitation de la validité des taux d'érosion par l'apparition de dépôts sédimentaires dans le bassin, à une échelle de temps saisonnière ou interannuelle, a été largement discutée par plusieurs auteurs (Schumm, 1977; Meade, 1982, 1988; Walling, 1983; Meade & al., 1983, 1985, 1990).

**Tableau XXXV** : Bilan du transport de matières en suspension dans les Llanos de Bolivie, stations du réseau PHICAB, pour la période 1983-1989 [Sup.= superficie, Z.inon.= zones inondables d'après la carte de végétation de Bolivie (GEOBOL, 1978), QS= débit solide,  $\delta$ QS= variation amont-aval du débit solide, Ts= taux de transport en suspension moyen annuel, TSed= taux de sédimentation dans les zones inondables]. *Balance del transporte de materias en suspensión en los Llanos de Bolivia. Suspended sediment yield budget of the bolivian Llanos.*

Code Station	Sup. bassin (km <sup>2</sup> )	Sup. Z.inon. (km <sup>2</sup> )	Apports			QS			Ts (t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	TSed (t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	TSed (cm.an <sup>-1</sup> )
			Andes (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	Bouclier (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	Total (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	observé (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	$\delta$ QS (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	$\delta$ QS (%)			
AB	67500	0	165	0	165	165	0	0	2400	0	0
PC	119000	13900	174	0	174	100	-74	-43	(840)	5300	0.27
MF	124200	---	---	0	---	51	---	---	(410)	---	---
CA	32300	0	0	0	0	2	---	---	(46)	---	---
CE	282500	---	---	0	---	161	---	---	(570)	---	---
AP	59800	0	100	0	100	100	0	0	1700	0	0
PV	7600	1000*	22	0	22	6	-16	-72	(800)	15500	0.79
PG	159100	11000	210	0	210	57	-153	-73	(360)	13900	0.71
PS	216200	53200	225	0	225	42	-183	-81	(190)	3400	0.18
VG	354300	69800	22	4	26	2	-24	-94	(5)	350	0.02
GM	599400	130000	247	4	251	62	-189	-75	(100)	1500	0.07

[Voir code des stations dans le Tableau XXIX, les valeurs de Ts entre parenthèses ne sont pas significatives du fait de l'importance des phénomènes de sédimentation observés, --- correspond aux apports non définis en raison de l'extension d'une partie du bassin versant au Pérou, \* correspond à une estimation car la carte de végétation n'indique pas de zones inondables dans le bassin du Río Ichilo à Puerto Villarroel].

Les flux de matières en suspension exportées des Andes aux stations de Angosto del Bala et Abapo sont différents de ceux du tableau XXVIII en raison de périodes d'observation différentes et présentant de nombreuses lacunes. Les apports andins ont été déterminés à partir des mesures effectuées à ces deux stations de 1983 à 1989, complétées par les résultats du tableau XXXII, alors

que les apports du bouclier brésilien proviennent du Tableau XXXIV. Le taux de sédimentation est calculé en divisant la variation amont-aval du débit solide par la superficie des zones d'inondation, en utilisant une densité de 2.65 et une porosité de 35% (Mertes, 1985). Le flux de matières en suspension observé sur le Rio Orthon provient de l'érosion des reliefs des séries tertiaires de l'Acre fortement disséquées (Montes de Oca, 1982), pour lesquelles Bordas (1988, 1991) propose un taux moyen de transport en suspension de 250 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>.

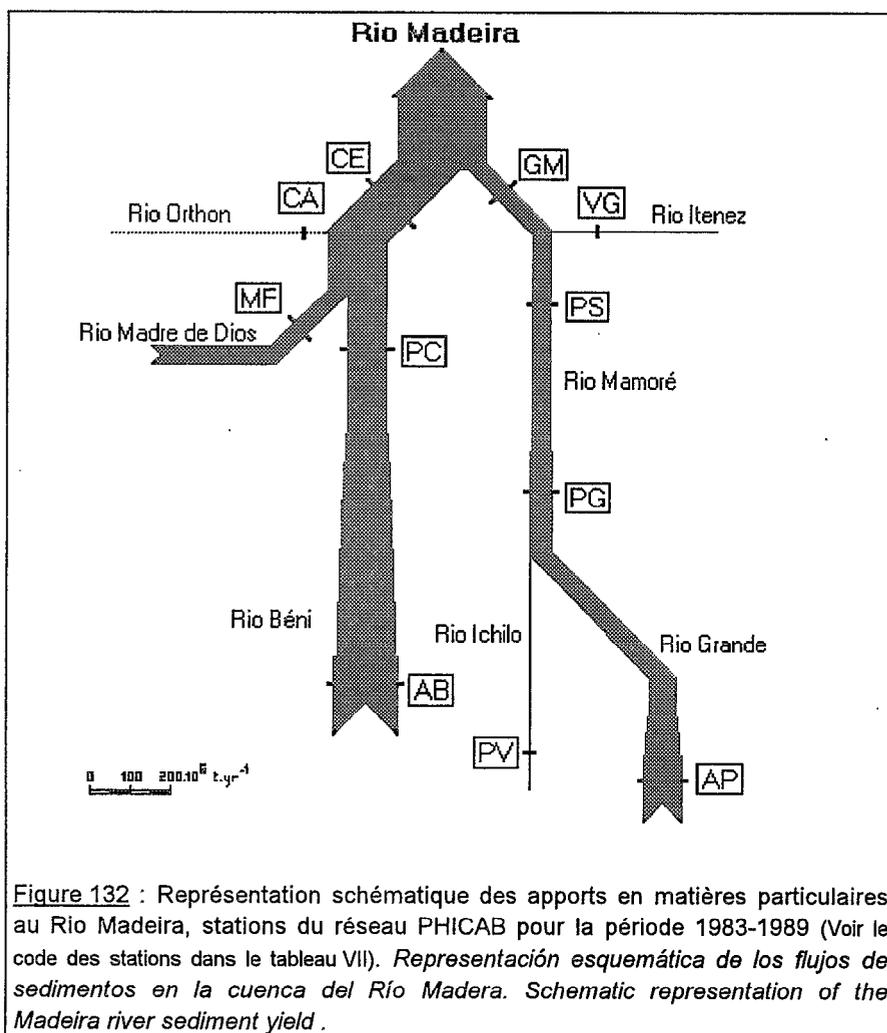


Figure 132 : Représentation schématique des apports en matières particulaires au Rio Madeira, stations du réseau PHICAB pour la période 1983-1989 (Voir le code des stations dans le tableau VII). *Representación esquemática de los flujos de sedimentos en la cuenca del Río Madera. Schematic representation of the Madeira river sediment yield.*

La traversée des 610 km de Llanos par le Rio Béni de Angosto del Baía à Portachuelo entraîne une perte de 43% du volume des matières en suspension. De même, du piedmont andin jusqu'à Puerto Ganadero (805 km pour le Rio Grande, et 570 km pour le Rio Ichilo), le flux de matières en suspension du Rio Mamoré diminue de 73%. A Puerto Siles situé à 480 km à l'aval de Puerto Ganadero, ce déficit atteint 81%. Le même phénomène est observé sur le Rio Guaporé-Itenez, et à Guayaramerin, le déficit global du bassin est de 75%, ce qui représente un volume sédimenté moyen annuel de près de 200 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>. Un résultat comparable a été obtenu sur le bassin du Brahmapoutre aux dimensions voisines (580000 km<sup>2</sup>) drainant la chaîne himalayenne, où

un bilan sédimentaire a montré que 70% des matières particulaires se déposent lors de la traversée (600 km) de la plaine de l'Assam (Goswami, 1985).

Le déficit en matières en suspension est nettement plus faible sur le Rio Béni que sur le Rio Mamoré, probablement du fait d'une extension plus réduite des zones d'inondations, et d'une pente plus forte du cours d'eau. Le calcul d'un taux de sédimentation est difficile compte tenu du manque de connaissance des surfaces impliquées. En utilisant la superficie totale des zones inondables (Tableau XXXV), les taux de sédimentation calculés (TSed) sont comparables à ceux obtenus en Amazonie centrale du Brésil (de 0.11 à 0.41 cm.an<sup>-1</sup>), par datation au <sup>14</sup>C et <sup>210</sup>Pb de sédiments carottés (Mousinho de Meis, 1971; Devol & al., 1984; Irion, 1984).

Les observations réalisées sur le terrain dans les Llanos de Bolivie indiquent par contre que la plus grande partie des zones inondées correspondent en fait à des eaux claires dues aux précipitations locales (Roche & al., 1986; Corbin & al., 1988; Guyot & al., 1991). La sédimentation du matériel particulaire andin doit donc s'effectuer sur des superficies plus réduites, à proximité du fleuve d'origine andine et les taux de sédimentation réels doivent être nettement supérieurs à ceux du tableau XXXV. L'utilisation d'imagerie satellitaire permettrait de déterminer les surfaces impliquées, et une évaluation plus réaliste des taux de sédimentation dans les Llanos de Bolivie serait possible.

A Villabella, le Rio Madeira reçoit un flux de matières particulaires de l'ordre de  $230 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ , en tenant compte du transport de fond (1.5%), dont 72% proviennent du Rio Béni et 28% du Rio Mamoré, alors que leurs participations respectives au débit liquide sont de 52% et 48% (Figure 133). En comparant ces valeurs à celles des grands fleuves mondiaux (Tableau V), le Rio Madeira à Villabella serait en 7<sup>ème</sup> ou 8<sup>ème</sup> position s'il débouchait à l'océan.

### V.G.3. Bilan élémentaire.

A partir du bilan global établi à chacune des stations du réseau PHICAB (Tableau XXXV), et de la composition géochimique moyenne des matières particulaires à ces mêmes stations (Tableaux XXI à XXV), le bilan de chaque élément analysé est possible à déterminer.

Ainsi, les flux élémentaires du Rio Madeira à Villabella ont été calculés (Tableau XXXVI). Le Rio Béni et le Rio Mamoré présentant des cortèges géochimiques très voisins, les différences observées dans le tableau XXXV correspondent à la différence de volume des apports globaux respectifs de ces deux fleuves.

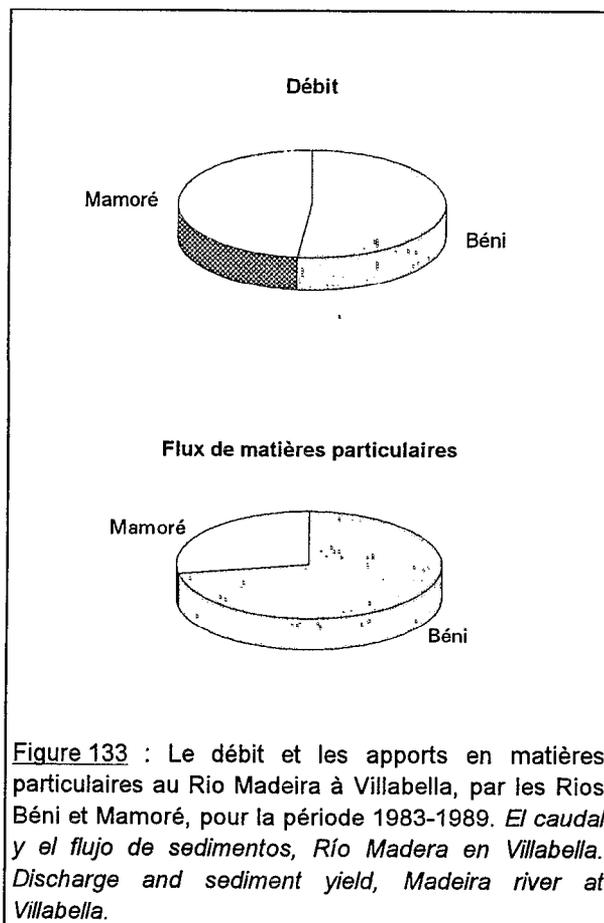
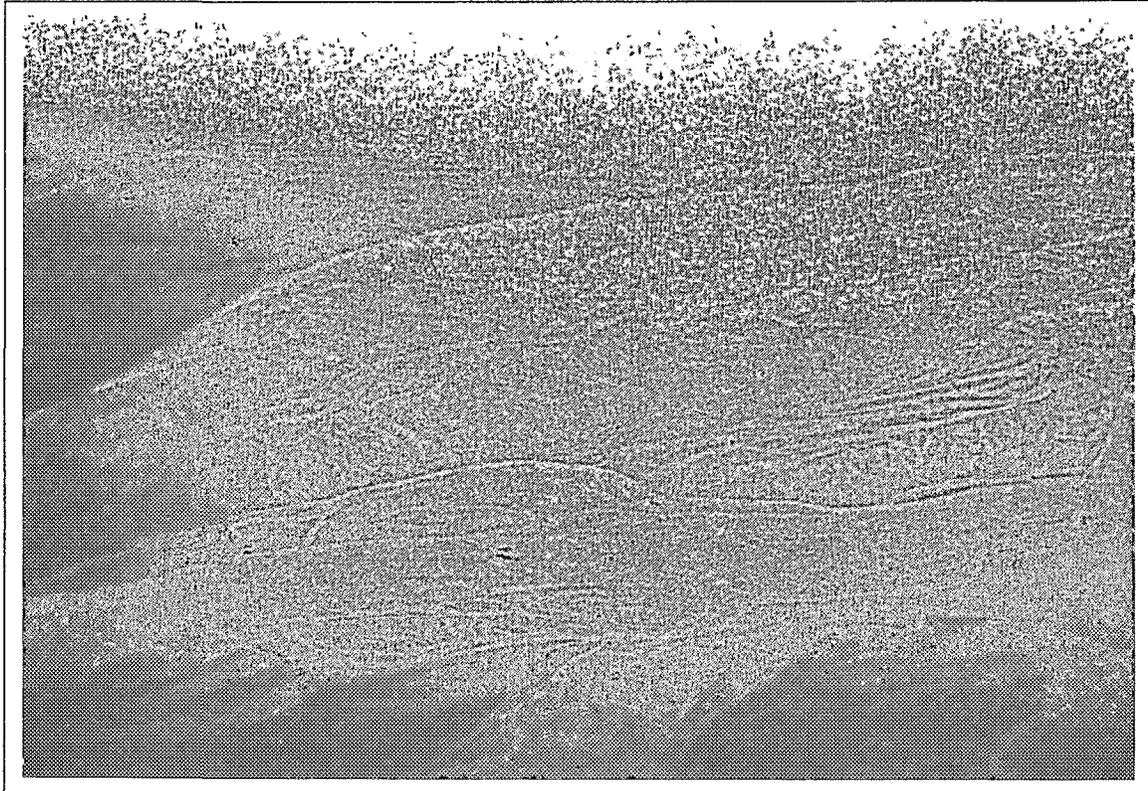


Figure 133 : Le débit et les apports en matières particulaires au Rio Madeira à Villabella, par les Rios Béni et Mamoré, pour la période 1983-1989. *El caudal y el flujo de sedimentos, Río Madera en Villabella. Discharge and sediment yield, Madeira river at Villabella.*

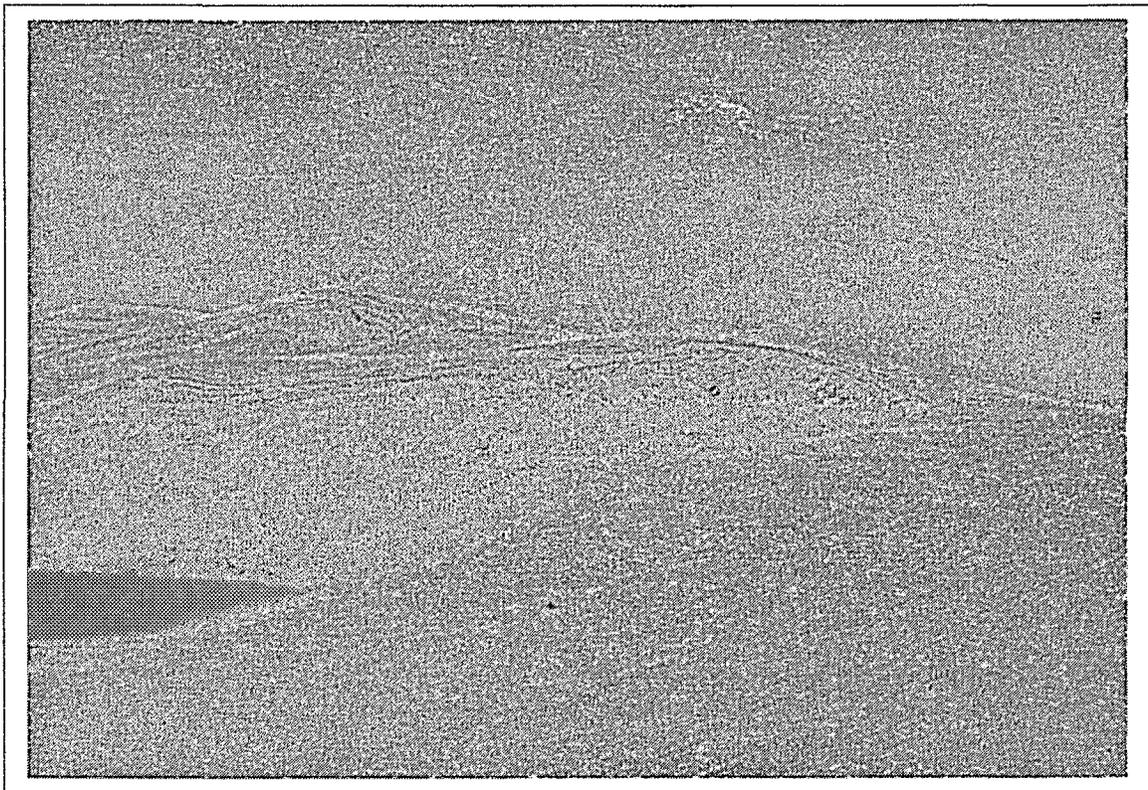
Tableau XXXVI : Bilan élémentaire des matières particulaires du Rio Madeira à Villabella. *Balance por elementos de los sedimentos, Río Madera en Villabella. Sediment elements budget, Madeira river at Villabella.*

Elément	Béni ( $10^3 \text{ t.an}^{-1}$ )	Mamoré ( $10^3 \text{ t.an}^{-1}$ )	Madeira ( $10^3 \text{ t.an}^{-1}$ )
Si	47300	18000	65300
Al	14600	5700	20300
Fe	8200	2900	11100
K	3700	1600	5300
Mg	1050	420	1470
Ti	990	370	1360
Na	990	350	1340
Ca	520	140	660
P	150	50	200
Mn	110	30	140
Ba	90	30	120
Sr	35	12	48
Zr	29	11	41
Rb	28	10	38
Zn	17	7	24
Cr	11	4	15
Ni	7	2	9
Cu	5	2	7
Pb	4	1	5
Ga	4	1	5
Co	2	1	3



↑ Photo 37 : Les dépôts sédimentaires du Río Grande, dans la zone de piedmont (300 m).  
*Los depósitos sedimentarios del Río Grande en la zona de piemonte.*  
*Sedimentary deposits of the Grande river in the piedmont area.*

↓ Photo 38 · Reprise éolienne des dépôts sédimentaires des rios Grande et Piray, dans la région de Santa Cruz de la Sierra (400 m). *Recuperación eólica de los sedimentos de los rios Grande y Piray en la región de Santa Cruz de la Sierra. Eolian recapture of Grande and Piray rivers sediments in the Santa Cruz area.*



# Les matières dissoutes.

### RÉSUMÉ :

Le sixième chapitre traite des matières dissoutes (éléments majeurs et carbone organique) et de leur distribution régionale et temporelle. L'importance relative des flux transportés dans les différentes régions est abordée.

Dans les Andes, les eaux sont généralement bicarbonatées calciques avec une minéralisation inférieure à  $100 \text{ mg.l}^{-1}$ , où la silice dissoute peut représenter jusqu'à 50% de la charge en solution. Dans certaines régions arides de montagne, l'altération des schistes du Paléozoïque entraîne une augmentation de la salinité, et des teneurs de  $1000 \text{ mg.l}^{-1}$  sont fréquemment observées. Dans le subandin, les cours d'eau issus des formations sédimentaires tertiaires présentent des concentrations de  $100$  à  $200 \text{ mg.l}^{-1}$ . Dans les Llanos, les fleuves d'origine andine voient leur concentrations en matières dissoutes diminuer sous l'effet de la dilution par les apports peu minéralisés des fleuves de plaine (de  $15$  à  $50 \text{ mg.l}^{-1}$ ). Le carbone organique dissous présente des valeurs de  $1.2$  à  $3.5 \text{ mg.l}^{-1}$  dans les Andes, et de  $4.2$  à  $7.4 \text{ mg.l}^{-1}$  dans les Llanos.

Du fait d'une faible variabilité des concentrations en matières dissoutes au cours du cycle hydrologique, le régime des flux de matières en solution exportés par les fleuves est quasiment identique au régime hydrologique.

### SOMMAIRE :

VI.A. L'hydrochimie .....	p. 166
VI.A.1. Les apports atmosphériques .....	p. 166
VI.A.2. Les éléments majeurs en solution .....	p.167
VI.A.3. Les éléments traces en solution .....	p. 189
VI.B.. Le carbone organique dissous .....	p. 190
VI.C. Le régime .....	p. 194
VI.C.1. Le régime global des matières dissoutes .....	p. 194
VI.C.2. Le régime des éléments majeurs .....	p. 206
VI.D. Le bilan .....	p. 210
VI.D.1. Le bilan global .....	p. 210
VI.D.2. Le bilan élémentaire .....	p. 213

### VI.A. L'HYDROCHIMIE.

En Bolivie, les études sur la chimie des eaux se sont principalement focalisées sur le bassin endoréique de l'Altiplano. Une partie de celles-ci concernent la contamination des lacs et cours d'eau par l'activité minière (Arze & Salm, 1979; Beveridge, 1983; BMSA, 1988; Apaza, 1989), et la qualité de l'eau distribuée par les réseaux municipaux (Rivera & Paz, 1989). D'autres travaux portant sur l'hydrobiologie de ces milieux en ont décrit la qualité physico-chimique (Gilson, 1964; Richerson & al., 1975, 1986; Servant-Vildary, 1978, 1984; Collot, 1980; Carney, 1984; Ittis & al., 1984; Ittis, 1987, 1988; Quintanilla, 1988; Wasson & Marin, 1988). Des études se sont également portées sur la géochimie des bassins à évaporites du Sud de l'Altiplano (Risacher, 1978, 1984, 1989; Risacher & Eugster, 1979; Rettig & al., 1980; Ballivian & Risacher, 1981; Badaut & Risacher, 1983; Risacher & al., 1984; Hurlbert & Chang, 1988). Enfin, des travaux spécifiques ont été réalisés sur la qualité des eaux de surface (Carmouze & al., 1978, 1981; Fontes & al., 1979; Wasson & al., 1991) et des eaux souterraines du Nord de l'Altiplano (Lizarazu & al., 1987; Gumiel, 1988; Aranyossy, 1989; Guyot & Gumiel, 1990; Quintanilla & al., 1990).

Dans le bassin amazonien, des observations sur la chimie des eaux, parfois anciennes (Crespo, 1901), ont été menées à bien dans le cadre d'études plus générales liées aux peuplements biologiques (Pillari & Gehr, 1977; Corbin & al., 1988), à des problèmes d'irrigation de vallées andines (Magat, 1981), ou à l'étude locale de phénomènes hydrogéologiques (Quintanilla & al., 1989). Certains fleuves de l'Amazonie bolivienne ont fait l'objet d'un échantillonnage lors de l'étude hydrochimique globale du bassin amazonien (Stallard & Edmond, 1983).

Mais l'étude globale et approfondie de l'hydrochimie de l'ensemble des cours d'eau du bassin amazonien de Bolivie a réellement débuté avec les travaux du PHICAB (Roche & al., 1986, 1991; Roche et Fernandez, 1988; Guyot, 1986; Guyot & al., 1987, 1988, 1989, 1991; Coudrain-Ribstein & al., 1992).

#### VI.A.1. Les apports atmosphériques.

L'atmosphère est une source majeure de matières en solution pour les eaux de surface (Gibbs, 1970). L'estimation des apports terrestres de matières dissoutes aux cours d'eau passe par une correction de cette influence atmosphérique, basée sur les teneurs en chlorures de la pluie et des cours d'eau, qui sont généralement inversement proportionnelles à l'éloignement des côtes (Meybeck, 1983, 1984).

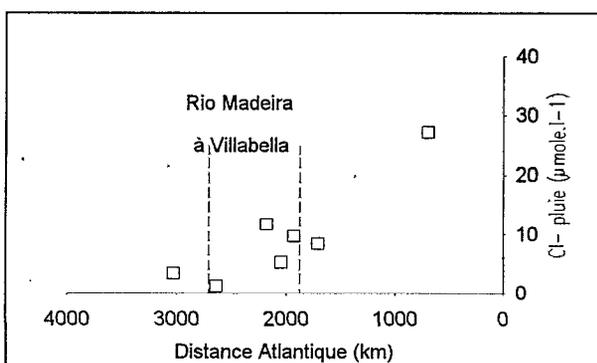


Figure 134 : Teneurs en  $\text{Cl}^-$  des eaux de pluie vs. distance à l'Océan Atlantique, dans le bassin amazonien (d'après Stallard & Edmond, 1981). *Concentraciones en  $\text{Cl}^-$  de las lluvias vs. distancia al Océano Atlántico. Rainfall  $\text{Cl}^-$  contents vs. Atlantic Ocean distance.*

Dans le bassin amazonien, la décroissance des teneurs en  $\text{Cl}^-$  des eaux de pluie en fonction de la distance à l'Océan Atlantique (Figure 134) est nette, mais progressive sur une distance de 3000 km, ce qui prouve bien l'origine océanique de cet élément (Stallard & Edmond, 1981). Les résultats obtenus ont montré que dans l'ensemble, les apports atmosphériques ne sont pas dominants, sauf sur quelques cours d'eau de la zone côtière. Le Rio Negro qui draine des séries géologiques très altérées présente des teneurs en  $\text{Na}^+$  qui proviennent pour 50% de l'atmosphère. Pour tous les autres cours d'eau, ce pourcentage est inférieur, et dans les Andes la part océanique du  $\text{Ca}^{++}$  et du  $\text{K}^+$  ne dépasse pas 3% (Stallard & Edmond, 1981). C'est l'altération des roches silicatées qui contrôlent l'hydrochimie des cours d'eau du bassin amazonien (Stallard & Edmond, 1983).

En utilisant les données de Stallard (1981) ainsi que sa méthode de calcul, les concentrations en  $\text{Cl}^-$  d'origine océanique dans les cours d'eau du bassin du Rio Madeira à Villabella devraient être comprises entre 4 et 6  $\mu\text{mole.l}^{-1}$  (de 0.14 à 0.21  $\text{mg.l}^{-1}$ ), d'Ouest en Est du bassin. Ces concentrations

étant équivalentes à la précision des analyses en chlorures effectuées à La Paz, la correction des apports atmosphériques ne sera donc pas effectuée dans cette étude.

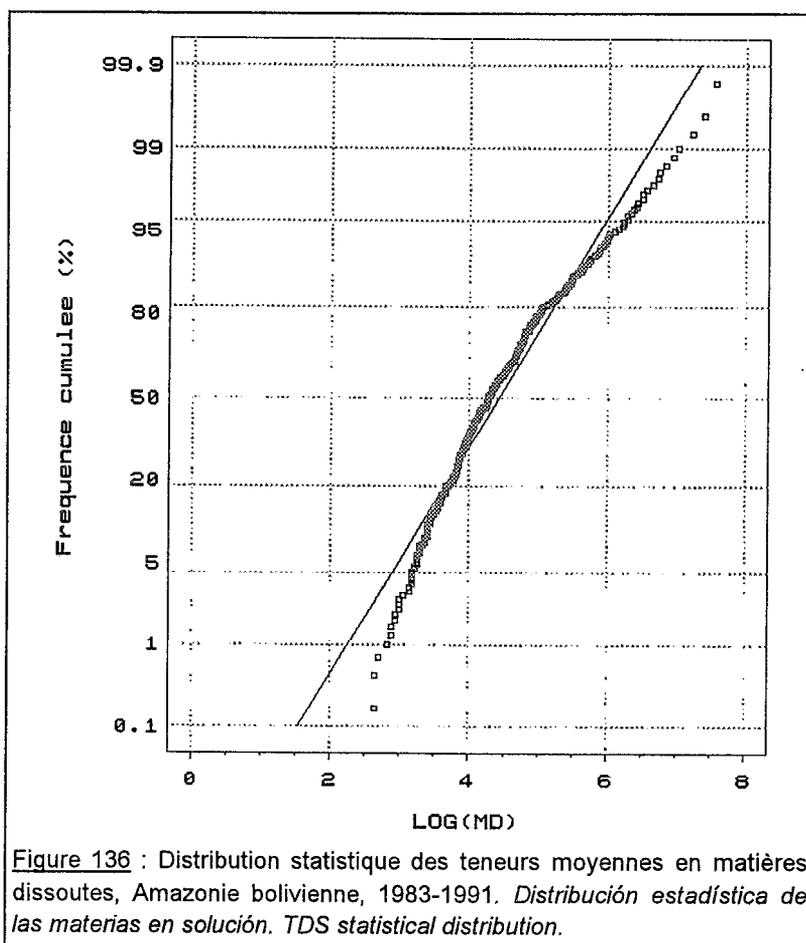
De plus, la présence de séries évaporitiques dans de nombreuses vallées andines (Ahlfeld & Branisa, 1960), et de dépôts salins dans les alluvions des cours d'eau de zones arides (Roche & al., 1986), rend délicat le calcul des apports atmosphériques.

## VI.A.2. Les éléments majeurs en solution.

### VI.A.2.a. Dans l'ensemble du bassin.

L'étude de l'hydrochimie du bassin amazonien de Bolivie porte sur 395 cours d'eau d'importance variée, depuis les glaciers de la cordillère des Andes, aux rivières de la plaine amazonienne, en passant par les cours d'eau de montagne semi-aride. Ces points d'eau ont fait l'objet de prélèvements réguliers à différentes époques hydrologiques, pour les stations les plus accessibles, et de prélèvements occasionnels pour ceux dont l'accès est difficile. Le nombre d'échantillons prélevés par station de 1983 à 1991 varie de 1 à 105, avec une valeur médiane de 2, et des quartiles inférieur et supérieur (25 et 75%) de 1 et 5. Pour les stations du réseau PHICAB où un échantillonnage décadaire a été mis en place en 1986, le nombre de prélèvements a varié de 35 à 105 suivant le sérieux des observateurs. La grande dispersion régionale des teneurs moyennes en matières dissoutes (Figure 135) montre que la variabilité spatiale des concentrations est plus grande dans les Andes qu'en plaine amazonienne. La teneur globale en matières dissoutes (ou minéralisation) présente pour l'ensemble du bassin une distribution Log-Normale (Figure 136).

Pour simplifier l'interprétation de ces données hydrochimiques, 6 sous-bassins ont été définis (Tableau XXXVII), dont 3 sous-bassins andins, suivant la dénomination proposée par Roche (1986). Le bassin andin du Rio Béni (Alto-Béni), comprend les rivières drainées par les rios Kaka et Alto-Béni, ainsi que celles issues des Andes et qui rejoignent le Rio Béni dans les Llanos (Rios Madidi, Tequeje,...). Le bassin andin du Rio Grande comprend les rivières drainées par le Rio Grande, mais aussi par le Rio Parapeti au Sud, et les rios Piray et Yapacani au Nord. Enfin les bassins andins orientaux sont les tributaires andins du Rio Mamoré situés à l'Ouest du Rio Yapacani (rios Ichilo, Ichoa, Sajta, Chimoré, Chaparé, Sécuré, Isiboro, Apéré, Yacuma,...). Les Llanos sont classiquement subdivisé en deux sous-bassins, celui du Rio Béni et celui du Rio Mamoré. Le bouclier (ou Escudo) n'a été que peu échantillonné, pour des raisons de difficulté d'accès et d'éloignement de La Paz. La dizaine de cours d'eau échantillonnés dans le bouclier appartient au bassin du Rio Mamoré, drainé par les formateurs du Rio Itenez (rios Guaporé, Blanco-Baures, Itonamas, San Julian,...).



6. Les matières dissoutes.

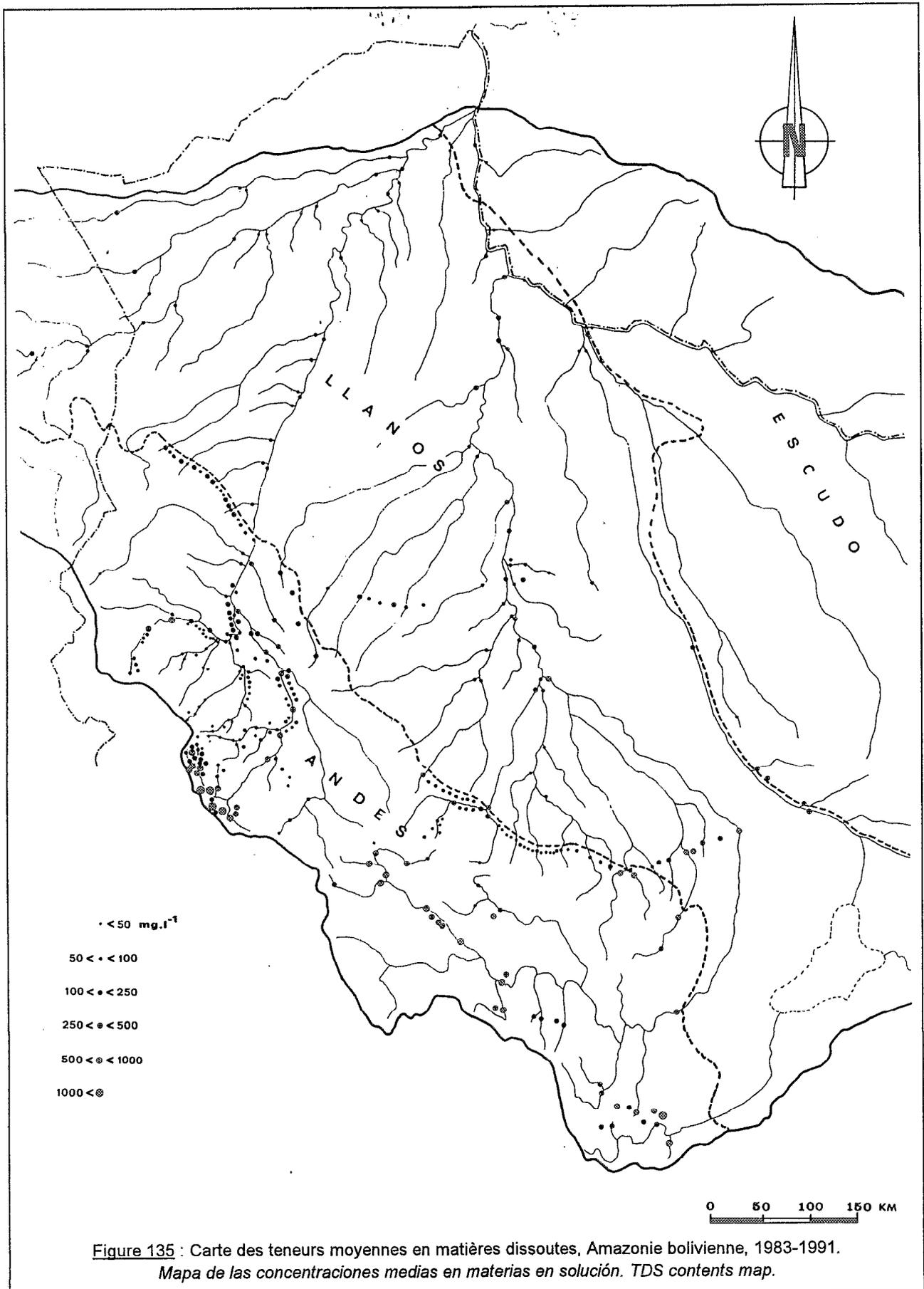
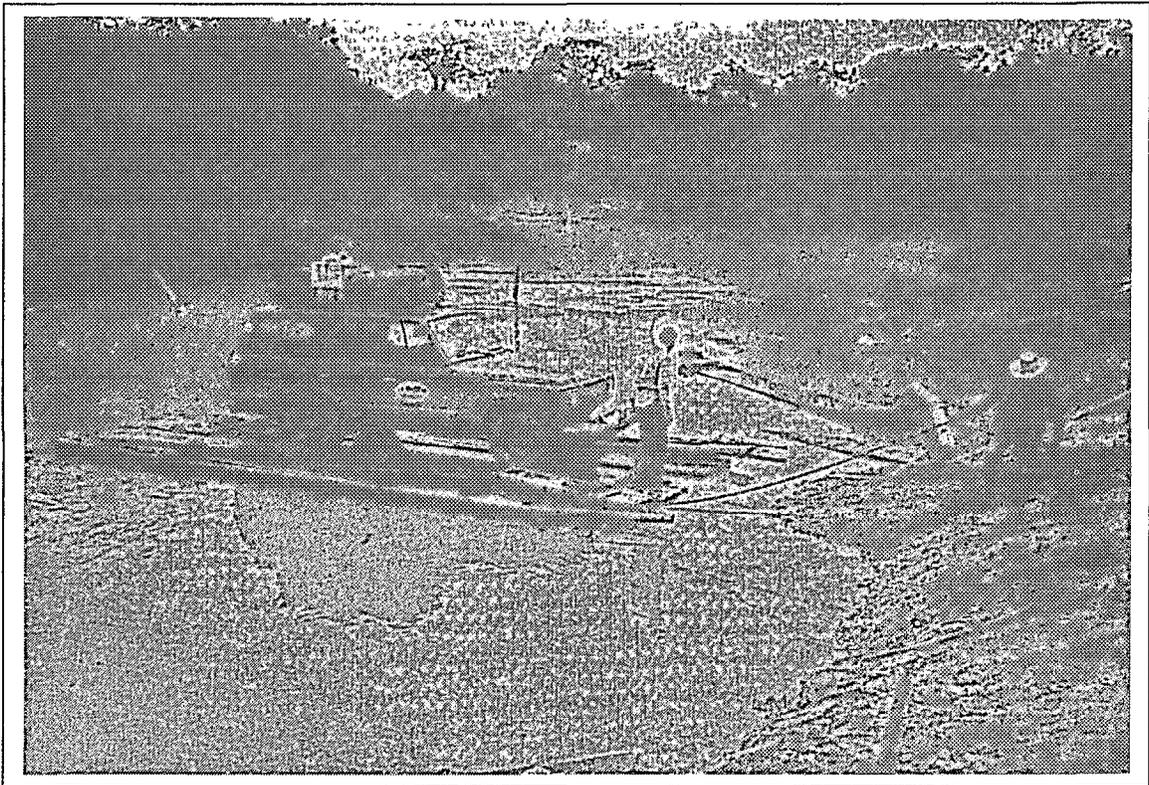
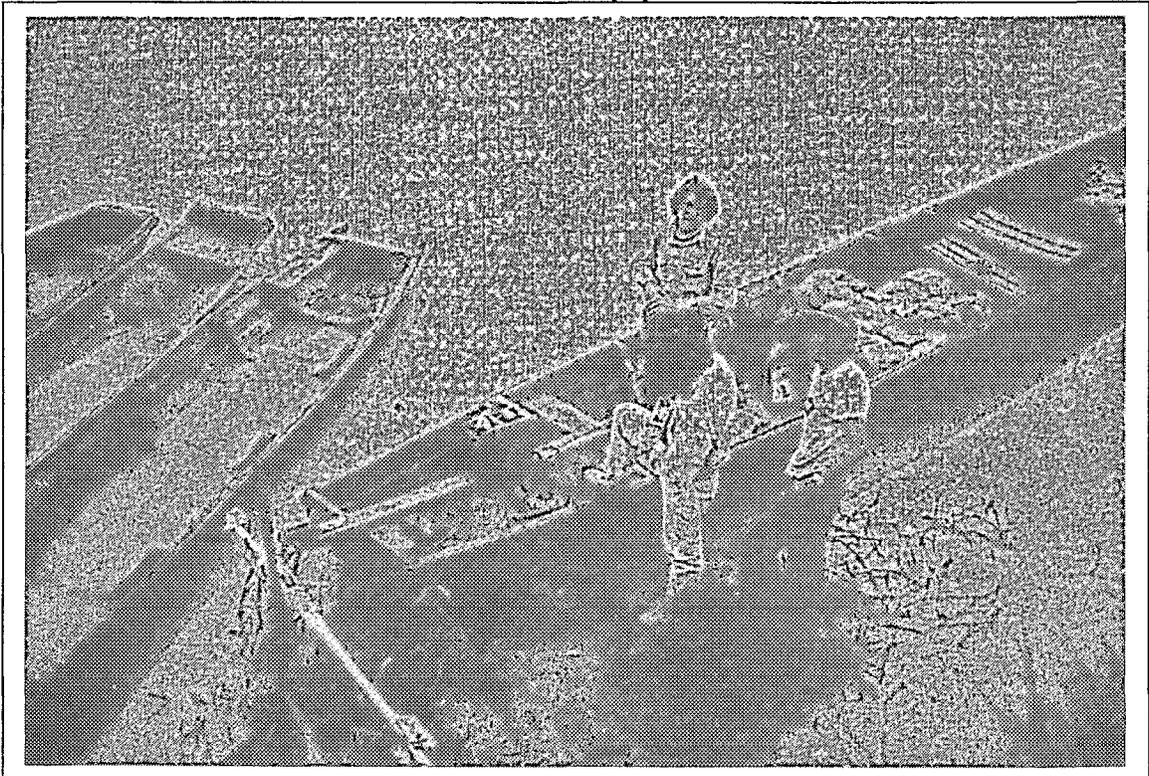


Figure 135 : Carte des teneurs moyennes en matières dissoutes, Amazonie bolivienne, 1983-1991.  
Mapa de las concentraciones medias en materias en solución. TDS contents map.



↑ Photo 39 : Tournée hydrologique dans le Béni (250 m).  
*Comisión hidrológica en el Beni. Hydrological field trip in the Beni area.*

↓ Photo 40 : Jaugeage à partir d'une pirogue, Río Mamoré à Puerto Varador (140 m).  
*Aforro con canoa, Río Mamoré en Puerto Varador. Gauging with canoe, Mamore river at Puerto Varador.*



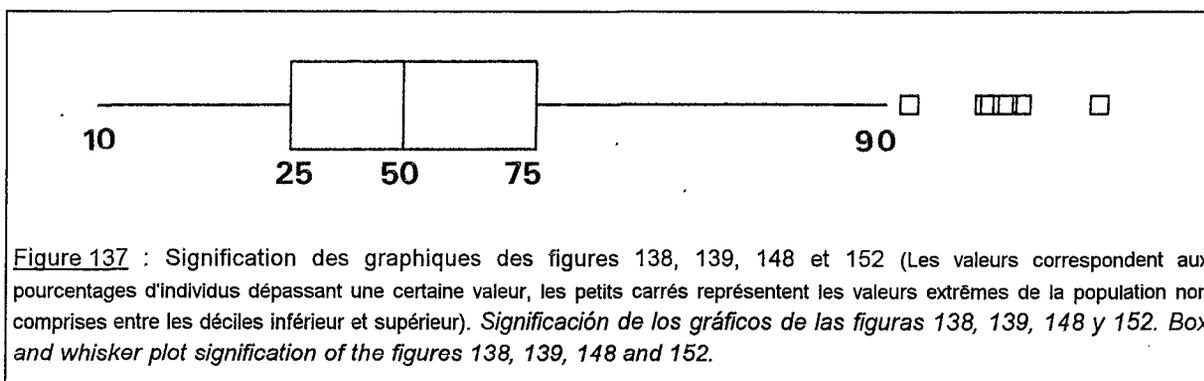
6. Les matières dissoutes.

L'interprétation de l'ensemble de l'information hydrochimique acquise par le programme PHICAB, fait l'objet de deux thèses actuellement en cours à l'IIQ de l'Université de La Paz. Aussi, la caractérisation régionale de la physico-chimie des eaux, tant dans les Andes que dans les Llanos, ne sera pas étudiée en détail dans ce travail.

Tableau XXXVII : Répartition des cours d'eau échantillonnés en Amazonie bolivienne, 1983-1991.  
*Los rios muestreados en la cuenca amazónica de Bolivia. The sampled rivers in the bolivian Amazon.*

Région	sous-bassin	Béni	Mamoré	Total
Andes	Alto-Béni	194		296
	Grande		45	
	BV Orientaux		57	
Llanos	Béni	34		87
	Mamoré		53	
Escudo			12	12
Total		228	167	395

L'utilisation de "boîtes à moustaches" (Figure 137) permet d'explorer la banque de données hydrochimiques, et de visualiser certaines tendances régionales. La distribution de l'altitude et de la température de l'eau des points échantillonnés permet de distinguer le domaine andin du reste du bassin (Figure 138). Dans le bassin de l'Alto-Béni, la gamme altitudinale est la plus étendue, mais la médiane est inférieure à 1000 mètres, alors que dans le bassin du Rio Grande, la médiane est proche de 2000 mètres. Dans les bassins andins orientaux, les altitudes sont nettement plus basses malgré quelques valeurs extrêmes, traduisant un échantillonnage essentiellement de piedmont. Les données du graphique concernant le bouclier sont à prendre avec précaution du fait d'un échantillonnage réduit (12 stations).

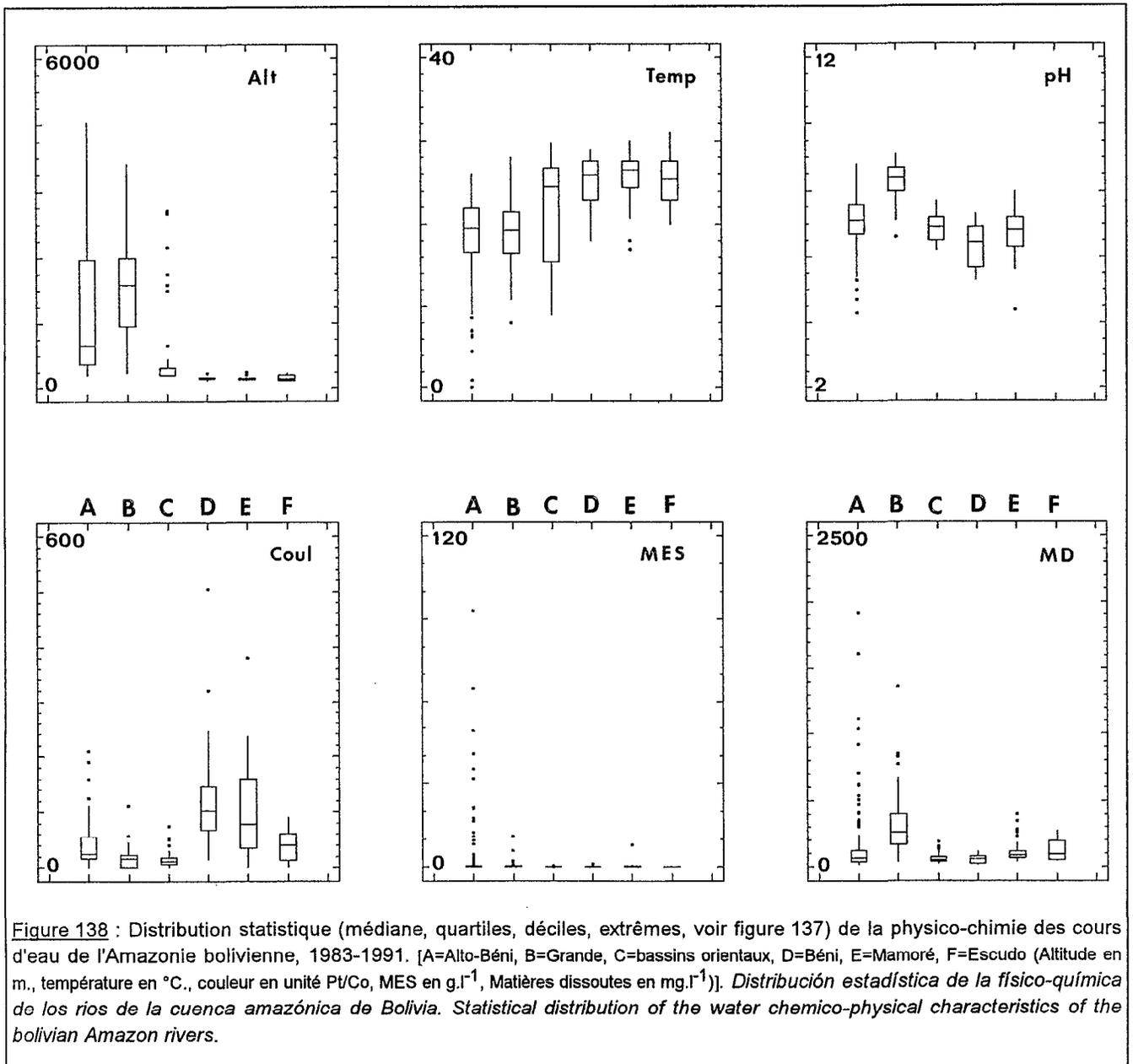


Les valeurs du pH mesuré sur le terrain montrent des valeurs nettement plus élevées dans le bassin du Rio Grande. Les médianes les plus faibles sont obtenues dans les Llanos, bien que les valeurs minima sont observées sur des cours d'eau andins à faible teneur en matières dissoutes, résultat de l'oxydation de la pyrite. La couleur, mesurée par absorption moléculaire, indique que c'est dans les Llanos que les eaux sont les plus colorées, du fait de la présence de matière organique. Les matières en suspension présentent des médianes et quartiles voisins, mais avec des extrêmes pouvant atteindre 100 g.l<sup>-1</sup> dans le bassin de l'Alto-Béni (région de La Paz). Les matières dissoutes indiquent des valeurs fortes dans le bassin du Rio Grande, et des valeurs faibles dans les Llanos et les bassins andins orientaux. Les eaux drainant le bouclier brésilien ont une minéralisation intermédiaire, et l'Alto-Béni présente une valeur médiane faible malgré des valeurs extrêmes très élevées, traduisant un bassin hétérogène.

La somme des cations (TZ<sup>+</sup>) présente en toute logique une distribution comparable à celle des matières dissoutes (Figure 139). A quelques variantes près, cette distribution se retrouve sur les graphiques des éléments majeurs dominants (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>). Par contre, le potassium présente des teneurs relativement plus élevées dans les Llanos et le bouclier, bien que de fortes teneurs s'observent encore dans les bassins andins, associées au drainage de séries

évaporitiques. Les concentrations en fer sont nettement plus fortes dans les Llanos que dans les Andes, malgré des teneurs localement élevées dans certaines vallées andines. La distribution de la silice dissoute indique que les eaux issues du bouclier présentent les plus fortes teneurs, alors qu'il n'existe pas de différence significative dans les autres bassins.

Globalement, les eaux de la plaine amazonienne se distinguent de celles des tributaires andins par une couleur plus élevée, un pH plus bas, des teneurs en matières dissoutes faibles, et une abondance relative en potassium, fer et quelquefois en silice dissoute. Ces tendances, décelées sur le bassin de l'Amazone (Stallard et Edmond, 1983), ont été étudiées en détail en Amazonie bolivienne à l'aide de l'analyse factorielle en composantes principales (Guyot & al., 1988).



Dans le bassin amazonien de Bolivie, les teneurs en matières dissoutes semblent être liées positivement aux teneurs en matières particulaires (Figure 140). Les cours d'eau à forte teneur en MES sont également ceux où les fortes concentrations en sels sont observées (Figures 75 & 135).

6. Les matières dissoutes.

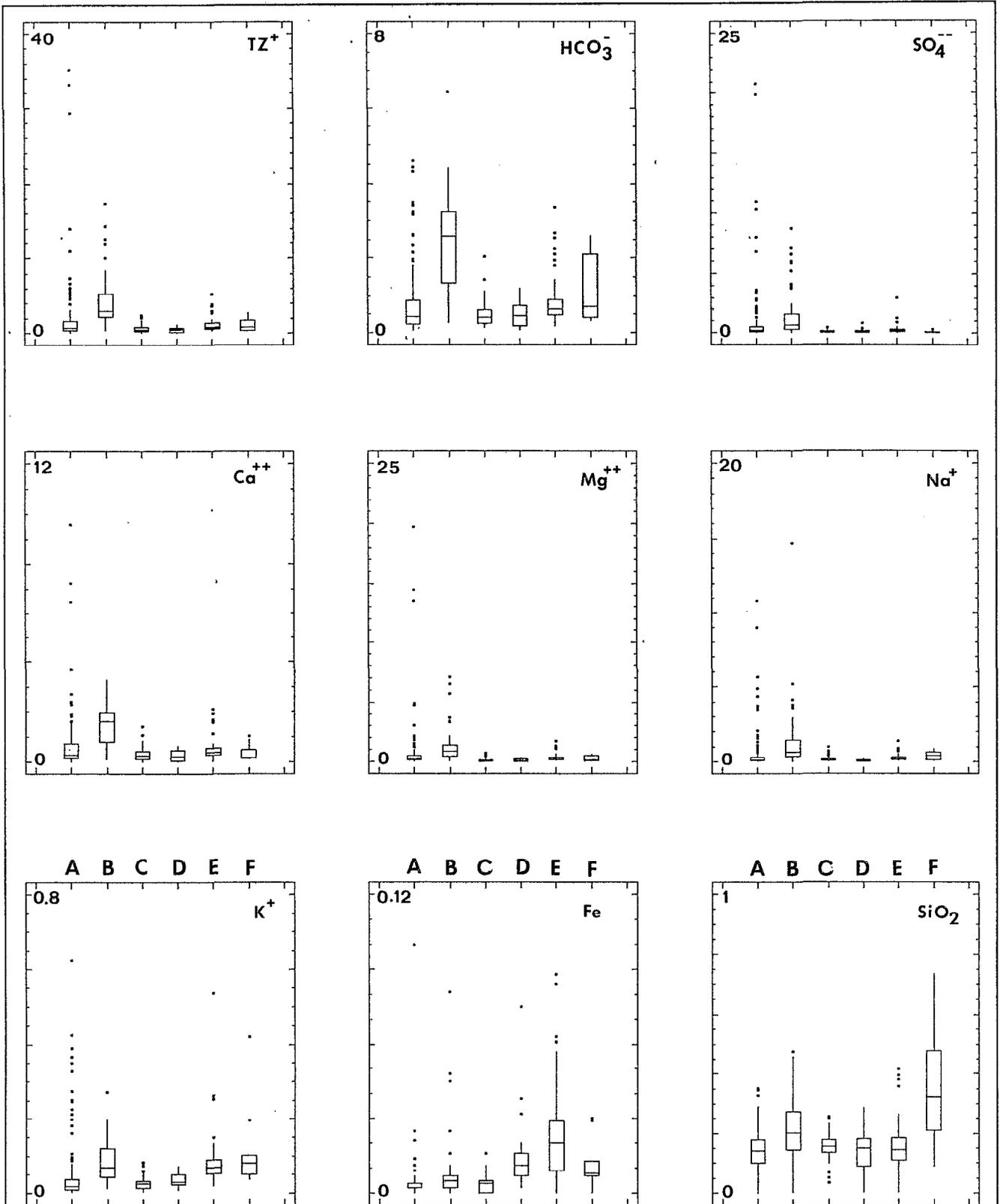


Figure 139 : Distribution statistique (médiane, quartiles, déciles, extrêmes, voir figure 137) des éléments majeurs en solution des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991. [A=Alto-Béni, B=Grande, C=bassins orientaux, D=Béni, E=Mamoré, F=Escudo (TZ<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe<sup>++</sup> en méq.l<sup>-1</sup>, SiO<sub>2</sub> en mmole.l<sup>-1</sup>)]. *Distribución estadística de los elementos mayores en solución de los ríos de la cuenca amazónica de Bolivia. Statistical distribution of the dissolved major elements of the bolivian Amazon rivers.*

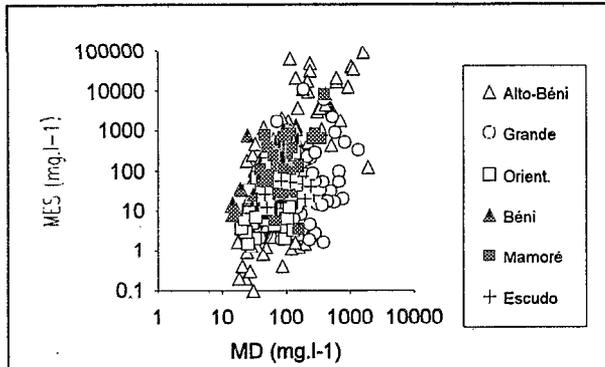


Figure 140 : Matières en suspension vs. matières dissoutes, cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991. *Materias en suspensión vs. materias en solución. TSS vs. TDS.*

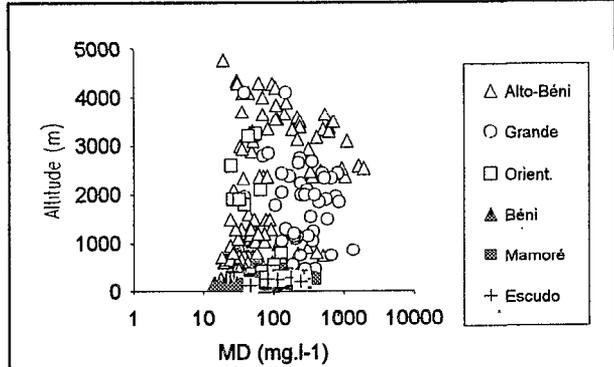


Figure 141 : Matières dissoutes et altitude, cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991. *Materias disueltas vs. altitud. TDS vs. altitude.*

La distribution des teneurs en matières dissoutes en fonction de l'altitude (Figure 141) montre que si les plus fortes concentrations sont observées dans les bassins des rios Alto-Béni et Grande, les teneurs faibles s'observent par contre dans tous les domaines étudiés.

La relation liant les matières dissoutes au débit spécifique moyen du bassin, établi en utilisant les valeurs de la carte des débits spécifiques de Bolivie (Roche et al., 1990), montre une tendance régionale à la baisse des teneurs en solution quand le ruissellement augmente (Figure 142).

La silice dissoute, dont les teneurs paraissent globalement stables, présente des variations qui ne sont pas liées à la salinité de l'eau (Figure 143).

Le pourcentage de silice dissoute sera donc inversement proportionnel à la teneur globale en matières dissoutes (Figure 144). Dans les eaux faiblement minéralisées, la silice peut représenter plus de 60% des matières en solution.

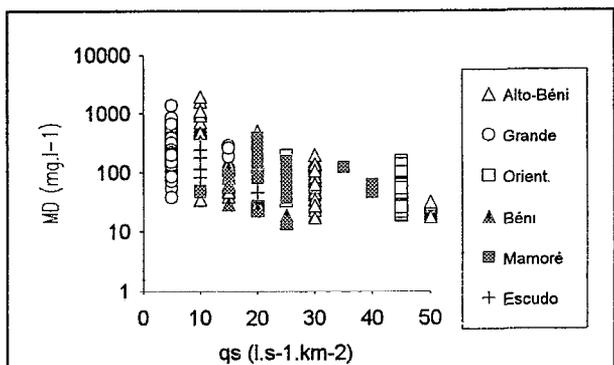


Figure 142 : Matières dissoutes vs. débit spécifique, cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991. *MD vs caudal específico. TDS vs. specific discharge.*

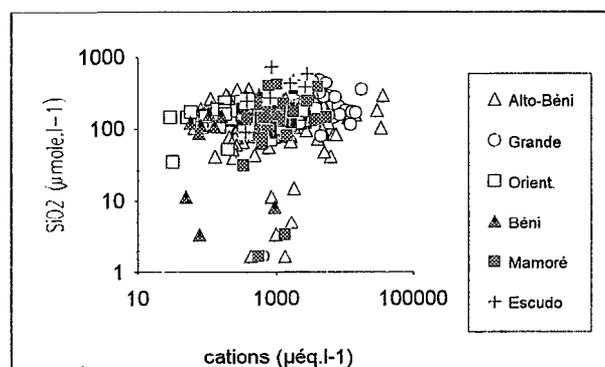


Figure 143 : Silice dissoute vs. somme des cations, cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991. *Silica disuelta vs. Σcations. Dissolved silica vs. Σcations.*

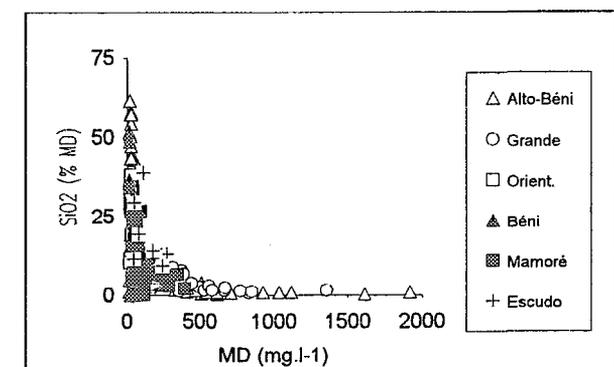


Figure 144 :  $SiO_2/MD$  vs. MD, cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991.  *$SiO_2/MD$  vs. MD.  $SiO_2/TDS$  vs. TDS.*

6. Les matières dissoutes.

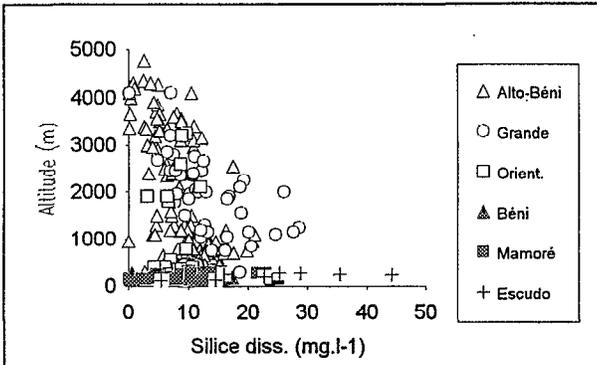


Figure 145 : Silice dissoute et altitude, cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991. *Silica disuelta vs. altitud. Dissolved silica vs. altitude.*

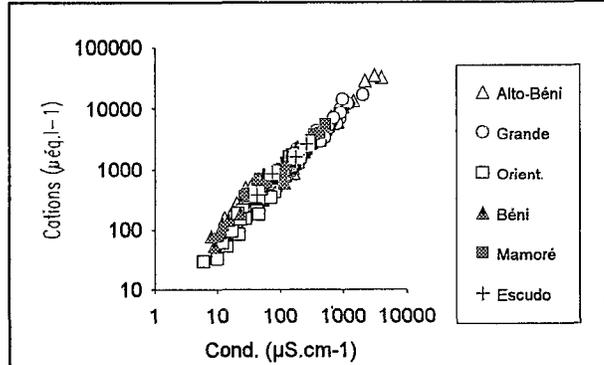


Figure 146 : Somme des cations vs. conductivité à 25°C., cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, valeurs moyennes pour la période 1983-1991. *Σcations vs. conductividad. Σcations vs. conductivity.*

En fait, la silice dissoute, liée à l'intensité de l'altération, dépend du climat et les teneurs diminuent généralement avec l'altitude (Meybeck, 1981, 1986). Sur l'ensemble des cours d'eau du bassin étudié, ce phénomène est observé bien que des teneurs faibles en silice dissoute soient notées dans des cours d'eau des Llanos (Figure 145).

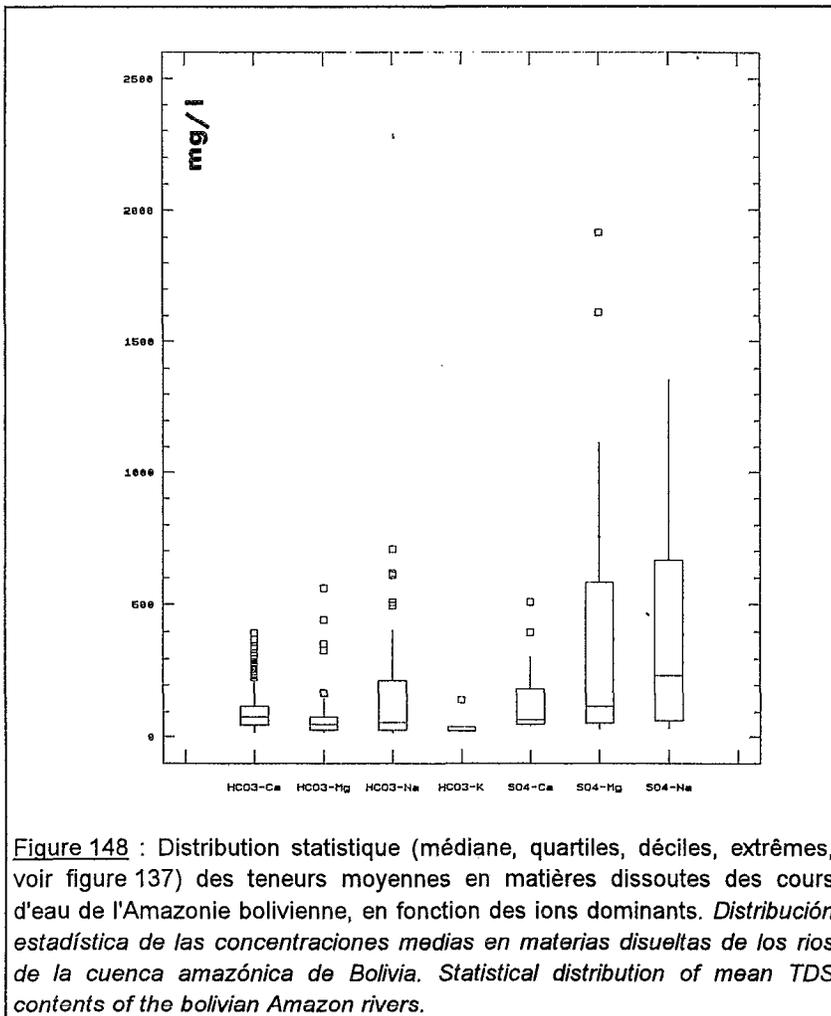
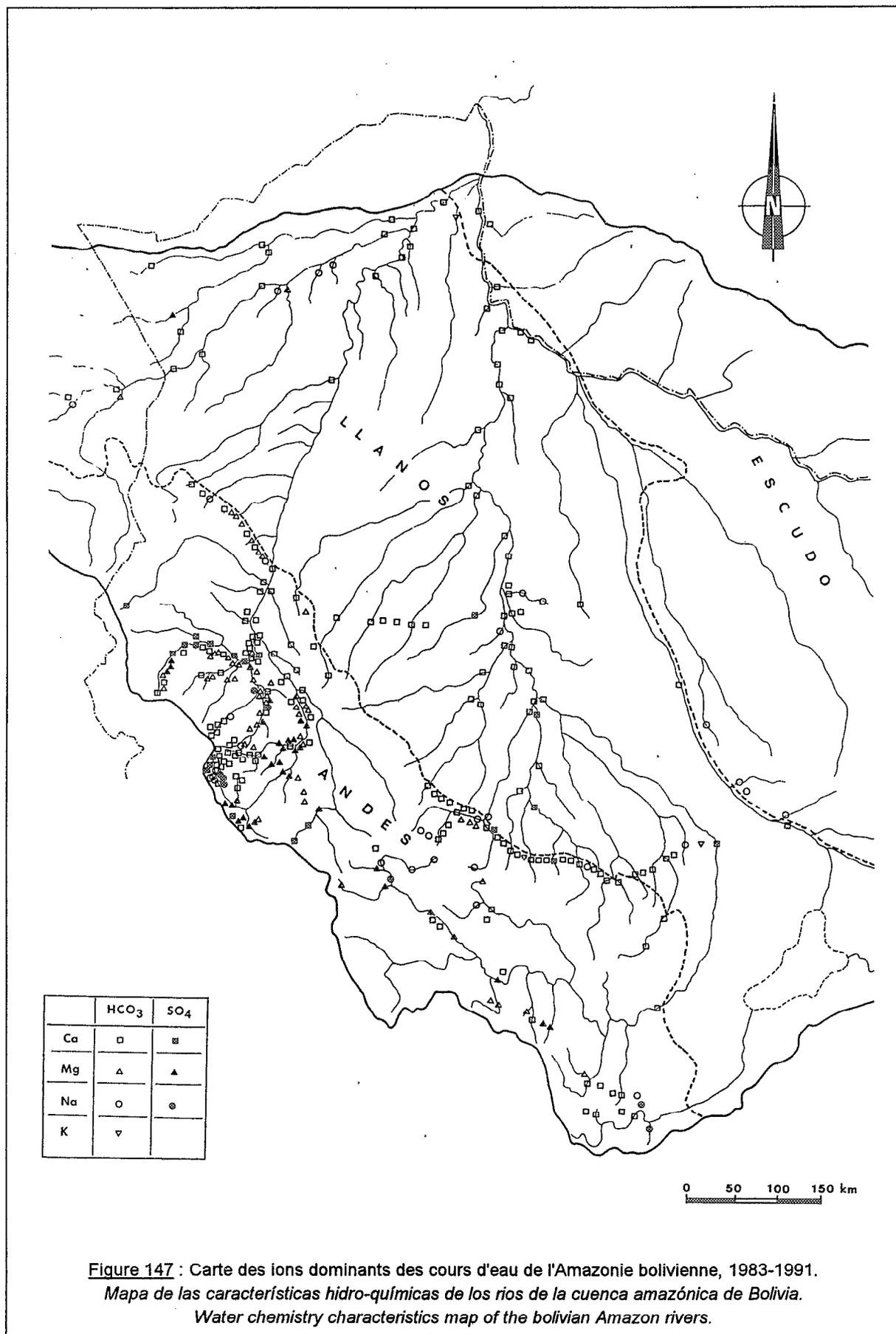


Figure 148 : Distribution statistique (médiane, quartiles, déciles, extrêmes, voir figure 137) des teneurs moyennes en matières dissoutes des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, en fonction des ions dominants. *Distribución estadística de las concentraciones medias en materias disueltas de los rios de la cuenca amazónica de Bolivia. Statistical distribution of mean TDS contents of the bolivian Amazon rivers.*

La conductivité électrique d'une eau est une fonction linéaire des ions en solution, dont la pente dépend du type d'ions dominants (Bakalowicz, 1974, 1979; Rodier, 1975; Meybeck, 1984, 1986). La relation obtenue en Amazonie bolivienne à partir des valeurs moyennes de la conductivité et de la somme des cations ( $TZ^+$ ) montre une très bonne corrélation (Figure 146).

En fonction des ions dominants, différents faciès hydrochimiques peuvent être définis (Figure 147). La plupart des cours d'eau rencontrés sont de type bicarbonaté, le plus souvent calcique ou magnésien, quelquefois sodique, et rarement potassique. Dans les Andes et sur quelques cours d'eau des Llanos, les eaux rencontrées sont sulfatées, et correspondent en général à des salinités plus fortes (Figure 148).



**Figure 147 :** Carte des ions dominants des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.  
 Mapa de las características hidro-químicas de los rios de la cuenca amazónica de Bolivia.  
 Water chemistry characteristics map of the bolivian Amazon rivers.

**VI.A.2.b. Dans les Andes.**

Dans les bassins andins, près de 300 cours d'eau ont fait l'objet d'analyses hydrochimiques (Tableau XXXVIII), dont 66% dans le bassin de l'Alto-Béni, plus proche de La Paz et pour lequel existent de nombreuses voies de communication. Les plus fortes concentrations ( $>1000 \text{ mg.l}^{-1}$ ) sont enregistrées dans les zones semi-arides de la région de La Paz-Luribay, ainsi que dans les bassins des rios Grande et Parapeti, et sont associées à des faciès sulfaté-magnésiens, voire sulfaté-sodiques. Les teneurs les plus faibles ( $<50 \text{ mg.l}^{-1}$ ) se rencontrent à l'amont des systèmes hydrologiques dans la Cordillère Royale (Cordillera Real), ou encore dans les zones de piedmont du Chaparé, et sont essentiellement associées à des faciès bicarbonaté-calciques ou magnésiens.

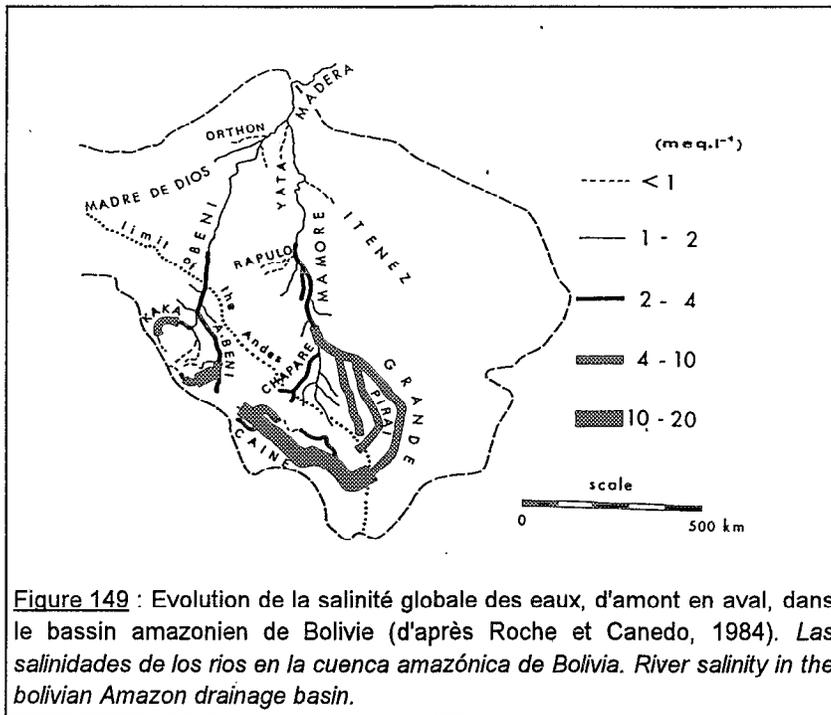


Figure 149 : Evolution de la salinité globale des eaux, d'amont en aval, dans le bassin amazonien de Bolivie (d'après Roche et Canedo, 1984). *Las salinidades de los rios en la cuenca amazónica de Bolivia. River salinity in the bolivian Amazon drainage basin.*

Dans le bassin de l'Alto-Béni, les tributaires des rios Tipuani, Challana, Zongo, Coroico, Unduavi, Taquesi, Tamampaya et Miguillas, qui drainent les sommets intrusifs des cordillères Royale et de Quimsa Cruz (Tres Cruces), ainsi que l'épaisse série sédimentaire détritique de l'Ordovicien présentent tous des teneurs en matières dissoutes inférieures à  $100 \text{ mg.l}^{-1}$ . Les teneurs en silice dépassent fréquemment 50% de la minéralisation totale. Les eaux sont presque exclusivement bicarbonatées, avec quelques cours d'eau à sulfates dominants du fait de la présence abondante de pyrite dans les affleurements. Dans la vallée de Sorata-Consata-Mapiri, les cours d'eau de l'amont présentent des teneurs ( $<100 \text{ mg.l}^{-1}$ ) semblables à celles des rios Tipuani et Challana voisins. Vers l'aval, l'augmentation brutale de la salinité, mais aussi des matières en suspension observée, sur le Rio Consata (de  $300$  à  $500 \text{ mg.l}^{-1}$ ) provient de l'érosion des séries détritiques du Silurien-Dévonien. Les eaux de ce cours d'eau sont alors de type sulfaté-calcique, du fait de l'existence de séries gypsifères localement karstifiées. Ensuite, les teneurs en matières dissoutes ne cessent de diminuer d'amont en aval sous l'effet de dilution par des apports moins minéralisés (Figure 149).

Dans le bassin des rios La Paz, Sapahaqui et Luribay, le même phénomène est observé, avec des eaux bicarbonatées à faible teneur en matières en solution dans le haut bassin du Rio Palca, qui draine les formations intrusives de l'Illimani. A La Paz, les rivières issues des séries sédimentaires plio-quadernaires (rios Huayllani, Quellumani, Achumani) présentant de fortes charges en MES, ont des teneurs en matières dissoutes comprises entre  $100$  et  $300 \text{ mg.l}^{-1}$ . Vers l'aval, la salinité augmente fortement lors de la traversée des séries détritiques du Silurien-Dévonien, et des teneurs de  $500$  à  $2000 \text{ mg.l}^{-1}$  sont fréquemment observées dans des eaux qui sont alors sulfatées.

L'augmentation de la salinité dans les bassins des rios Consata-Mapiri, La Paz, Sapahaqui et Luribay lors de la traversée des séries du Silurien-Dévonien est probablement liée à la présence de niveaux gypsifères, mais aussi à l'altération de schistes noirs. Cette altération produit des efflorescences blanches qui sont mises en solution lors des épisodes pluvieux. En étiage, des dépôts salins de même nature apparaissent dans le lit asséché de ces cours d'eau (Roche & al., 1986). L'analyse géochimique de ces dépôts a montré qu'ils sont essentiellement constitués de sulfates et de magnésium (Tableau XXXIX).

Tableau XXXIX : Géochimie des dépôts salins du bassin du Rio La Paz (d'après Roche & al., 1986).  
*Analisis de los depositos salinos en la cuenca del Río La Paz.*  
*Salt deposits analysis of the La Paz river drainage basin.*

Elément ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )	S	Mg	Fe	Ca	Mn	Pb	Zn	Sn
	80000	38000	25000	2300	300	60	40	20

Les deux éléments majeurs de ces dépôts (S et Mg) sont fortement solubles, et le lessivage de ces terrains par les eaux de pluie va entraîner une augmentation de salinité vers le pôle sulfate-magnésien, caractéristique des eaux à forte minéralisation de cette région.

Plus à l'aval, les rios Kaka, Boopi et Alto-Béni reçoivent lors de la traversée du subandin, les apports d'affluents modestes dont les teneurs sont généralement comprises entre 100 et 200  $\text{mg.l}^{-1}$ , et presque toujours de type bicarbonaté calcique ou magnésien. Cette augmentation de la salinité dans le subandin est très probablement liée aux dépôts sédimentaires tertiaires qui sont largement représentés dans cette région. Les tributaires andins du Rio Béni, qui drainent la bordure septentrionale des Andes (de Rurrenabaqué à Ixiamas), présentent les mêmes caractéristiques.

Dans le bassin du Rio Grande soumis à un climat plus aride, les concentrations observées varient de 40 à 1000  $\text{mg.l}^{-1}$ , et atteignent des valeurs de 1400  $\text{mg.l}^{-1}$  dans le bassin du Rio Parapeti situé plus au Sud. Les concentrations les plus faibles sont observées en amont, sur les contreforts de la Cordillère de Tunari, près de Cochabamba, où les eaux sont alors de type bicarbonaté-calcique. Les eaux les plus chargées en sels dissous, sont également celles qui transportent le plus de matières en suspension, et proviennent des séries du Silurien-Dévonien, drainées par les formateurs occidentaux du Rio Caine (rios Tapacari, Arque). Le faciès de ces eaux est généralement de type sulfate magnésien.

Lors de la traversée de la vallée de Cochabamba, la salinité augmente également en raison de l'affleurement de séries salifères et gypsifères du Mésozoïque (Magat, 1981). Plus à l'aval, dans la région de Torotoro, les affluents de rive droite issus des formations carbonatées du Crétacé apportent des eaux bicarbonatées calciques, dont les teneurs sont comprises entre 200 et 400  $\text{mg.l}^{-1}$ . Les tributaires andins du Rio Grande dans les Llanos (rios Yapacani et Piray) ont également des concentrations comprises entre 200 et 400  $\text{mg.l}^{-1}$ , et un faciès bicarbonaté calcique. La silice dissoute représente rarement plus de 10% de la minéralisation dans ces bassins andins.

Dans les bassins andins orientaux, les teneurs rencontrées sont nettement plus faibles et ne dépassent jamais 150  $\text{mg.l}^{-1}$ . Dans le Chaparé, les concentrations mesurées sont souvent inférieures à 50  $\text{mg.l}^{-1}$ . Les eaux sont généralement de type bicarbonaté calcique, quelquefois magnésienne. Des teneurs plus importantes sont observées dans le subandin, dans la région de Villa Tunari où les formateurs du Rio Chaparé présentent des teneurs légèrement supérieures à 100  $\text{mg.l}^{-1}$ . Il en est de même pour les tributaires andins du Rio Yacuma, et comme pour les tributaires du Rio Béni, cette salinité légèrement plus élevée semble provenir des séries sédimentaires tertiaires du subandin.

Les coefficients de variation obtenus ( $\text{CV} = \text{écart type/moyenne}$ ) sur l'ensemble des paramètres étudiés, montre que la plus grande variabilité régionale concerne les matières en suspension, et la turbidité. Dans les matières dissoutes, c'est la silice qui apparaît être l'élément le plus stable.

## 6. Les matières dissoutes.

Tableau XXXVIII : Physico-chimie des cours d'eau andins de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.

A : bassins des rios Mapiri, Challana, Tipuani et Coroico.

[Alt. = altitude de la station (m), Nb. = nombre d'échantillons prélevés à la station, Temp. = température (°C), Cond. = conductivité électrique à 25°C ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Coul. = couleur (unité Pt/Co), Turb. = turbidité (F.T.U.), MES = matières en suspension ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), MD = matières dissoutes ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), %SiO<sub>2</sub> = poids de la silice dans les matières dissoutes (%), teneurs élémentaires en  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ].

Físico-química de los rios andinos. Water physico-chemistry of andean rivers.

Rio	Alt.	Nb.	Temp.	pH	Cond.	Coul.	Turb.	MES	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO <sub>2</sub>	MD	%SiO <sub>2</sub>
San Cristobal à Sorata	2400	6	12.0	7.6	83	62	121	150	35.6	2.4	9.7	6.4	3.8	4.6	1.4	0.3	7.2	71	10
Gunduraya (Vado)	1100	3	17.9	4.7	66	15	3	1	7.5	0.6	20.1	1.8	2.1	2.3	0.5	0.4	12.9	48	27
Consata à Consata	900	4	19.5	7.6	508	17	1833	2904	74.0	18.4	108.8	54.9	15.1	17.4	3.4	1.4	13.4	307	4
Consata (Cfl. Camata)	750	1	23.0	7.4	523	20	225	439	54.9	20.3	326.1	48.3	17.0	19.6	1.7	0.3	19.8	508	4
Camata (Cfl. Consata)	750	1	23.7	6.4	87	0	23	10	6.8	2.1	17.9	5.3	2.7	2.1	0.5	0.1	12.9	50	26
Tarapo (Cfl. Consata)	750	2	20.0	6.1	48	20	22	16	20.8	2.1	1.3	5.0	1.7	0.2	0.2	0.2	11.9	43	27
Mapiri à Mapiri	700	2	22.5	7.8	235	10	74	82	22.5	7.7	45.7	20.3	9.1	8.2	1.1	0.1	13.2	128	10
Korjahuirra (Vado)	750	3	19.3	5.6	43	32	18	8	13.1	4.7	1.2	2.9	1.0	0.5	0.3	0.2	13.8	38	37
Merkhe (Vado)	750	4	20.1	5.3	39	24	14	10	8.0	1.4	1.2	1.2	1.1	2.1	0.6	0.1	12.1	28	44
Chimate à Chimate	750	3	19.3	5.4	22	30	12	3	13.4	2.5	2.1	0.8	0.7	0.4	0.1	0.1	11.9	32	37
Dinamarca (Vado)	650	2	19.9	5.6	28	18	8	1	6.7	1.6	0.7	1.0	1.4	0.1	0.2	0.2	12.1	24	50
Mariapo (Vado)	650	3	20.5	6.4	26	25	11	1	15.2	2.0	0.0	3.8	0.9	0.2	0.2	0.1	12.6	35	36
Charoplaya (Vado)	600	1	22.3	7.3	35	0	1	0	14.6	1.8	0.0	0.9	2.3	0.2	0.5	0.2	10.2	31	33
Mapiri à Guanay	500	11	22.1	7.2	128	72	291	547	21.0	4.3	19.1	10.0	4.2	2.8	1.1	0.3	8.9	72	12
Mapiri (Cfl. Coroico)	480	7	22.8	7.4	87	96	280	623	18.1	3.6	16.6	7.0	2.8	2.6	0.9	0.2	10.1	62	16
Challapampa (Vado)	1500	1	13.0	8.0	123	70	170	665	43.9	4.8	13.4	8.1	6.2	3.9	1.2	0.1	7.2	89	8
Soque (Vado)	1300	1	11.7	7.7	56	40	13	39	19.5	4.2	7.8	4.2	2.5	2.7	0.4	0.1	10.1	52	20
Marmuntani (Vado)	1100	1	17.9	5.0	89	25	500	1021	7.3	4.2	18.7	4.4	3.4	3.0	0.7	0.1	4.4	46	10
Vinocaya (Vado)	1100	1	17.8	4.3	50	25	5	2	11.0	3.6	11.1	2.0	2.1	2.7	0.4	0.1	21.1	54	39
Ayuma (Vado)	2400	2	12.5	7.4	83	78	101	189	33.0	3.3	9.4	4.2	4.7	3.9	0.8	0.4	3.3	63	5
Consata (Cfl. Vagante)	800	2	18.5	7.3	419	55	525	509	56.4	12.5	86.4	32.2	11.0	12.9	1.4	0.0	8.2	221	4
Vagante (Cfl. Consata)	800	2	17.5	7.0	23	43	15	3	11.2	2.8	0.0	2.6	0.5	0.5	0.2	0.1	8.2	26	31
Challana (Cfl. Sapukani)	650	1	21.0	6.2	28	0	4	0	4.9	1.5	0.0	1.1	0.8	1.0	0.3	0.2	13.1	23	57
Sapukani (Cfl. Challana)	650	1	22.7	6.7	15	0	5	0	6.8	1.5	0.0	0.7	0.6	0.2	0.1	0.2	10.6	21	51
Challana à Guanay	500	11	20.8	6.9	23	23	14	20	7.2	1.5	2.9	0.9	0.7	1.0	0.3	0.1	11.2	26	43
Tipuani (Cfl. Tora)	800	1	18.4	6.0	33	0	7	6	8.5	1.1	0.0	1.6	0.7	1.1	0.6	0.2	16.5	30	54
Tora (Cfl. Tipuani)	800	1	19.4	6.6	18	0	5	0	7.3	1.8	0.0	0.6	0.6	0.6	0.3	0.2	15.6	27	58
Bartolo (Cfl. Tipuani)	700	1	18.7	5.4	12	0	2	0	4.9	0.8	0.0	0.4	0.6	0.2	0.1	0.1	11.3	18	61
Tipuani à Tipuani	600	2	18.7	6.1	26	158	185	252	8.3	2.6	0.1	1.7	0.7	1.2	0.5	0.5	13.9	30	47
Tipuani à Guanay	500	11	20.0	7.0	30	78	349	481	11.5	1.7	4.8	1.4	0.9	1.1	0.6	0.4	10.1	33	31
San Juan à Yolosa	1200	33	17.6	6.9	31	46	52	77	19.2	1.8	7.0	2.3	1.6	1.2	0.4	0.1	8.6	42	20
Coroico (Cfl. S. Barbara)	950	29	18.8	6.8	35	36	120	173	14.0	1.2	6.0	1.6	1.6	1.7	0.4	0.4	9.5	36	26
Santa Barbara (Cfl. Cor)	950	29	19.6	7.0	56	31	108	194	14.1	2.0	11.1	1.7	2.5	2.6	0.3	0.2	14.6	49	30
Chirqueno à Challa	950	23	18.8	6.9	45	10	5	3	8.6	2.1	11.6	1.3	1.1	2.5	0.3	0.1	20.8	48	43
Choro à Choro	900	32	19.0	6.8	21	15	6	100	9.1	2.7	6.9	0.8	0.9	1.6	0.2	0.1	11.4	34	34
San Pedro à San Pedro	900	32	19.5	6.6	19	17	6	6	9.3	1.3	5.5	0.8	0.7	0.8	0.2	0.1	11.3	30	38
Quita Calzon à Pto Leon	800	31	19.5	6.1	23	18	6	5	11.2	1.9	2.5	2.0	0.7	0.8	1.3	0.1	9.6	30	32
Chojna (Puente)	700	23	21.6	6.6	60	12	7	3	9.4	1.6	19.5	3.8	5.5	2.2	1.0	0.1	13.5	57	24
Yara à Caranavi	650	29	22.6	7.1	68	34	61	56	23.8	2.4	8.1	5.2	2.7	2.2	0.6	0.2	10.7	56	19
Carrasco à Carrasco	1500	7	21.9	7.4	95	44	43	59	36.5	6.0	10.9	4.0	4.5	4.7	0.9	0.1	10.5	78	13
Coroico à Alcoche	600	15	23.4	7.3	44	33	64	55	20.3	0.6	8.6	3.5	3.2	2.7	0.6	0.2	11.8	52	23
Coroico à Teoponte	480	9	22.0	7.0	40	64	275	177	12.5	2.5	6.4	1.8	1.6	1.6	0.6	0.3	9.3	37	25
Tajihui (Puente)	600	2	22.7	7.2	148	125	173	181	37.2	2.1	18.7	7.7	6.6	6.8	1.9	0.6	14.9	97	15
Bronciano (Cfl. Coroico)	600	1			45	10	5	7	7.3	0.1	2.0	1.5	1.8	0.6	0.4	0.1	5.9	20	30
Challhuani à Villa Flor	650	1			82	0	2	5	28.1	0.8	0.0	4.8	3.2	2.8	1.5	0.0	5.8	47	12
San Silverio (Cfl. Coroico)	700	22	21.9	7.2	161			7	31.7	0.7	0.0	3.1	3.3	2.5	0.9	0.1	15.9	58	27
Yarisa (Cfl. Coroico)	950	1	17.7		30	20	8	8	15.1	0.9	3.3	1.8	1.5	1.4	0.3	0.1	0.0	24	0
Elena (Vado)	1100	1	17.9		27	30	12	71	15.9	1.3	2.1	1.7	1.0	2.1	2.7	0.2	4.0	31	13
Chairo (Cfl. Huarinilla)	1300	1	17.5		29	0	0	14	14.6	1.7	4.1	2.5	1.0	2.8	0.4	0.1	7.6	35	22
Huarinilla (Cfl. Chairo)	1300	1	16.6		20	10		54	14.6	1.3	2.4	2.5	0.6	1.8	0.7	0.1	4.6	29	16



Photo 41 : Cours d'eau typique (eaux noires) des Llanos (150 m). *Río típico de los Llanos (aguas negras). Typical river of the Llanos (black waters).*

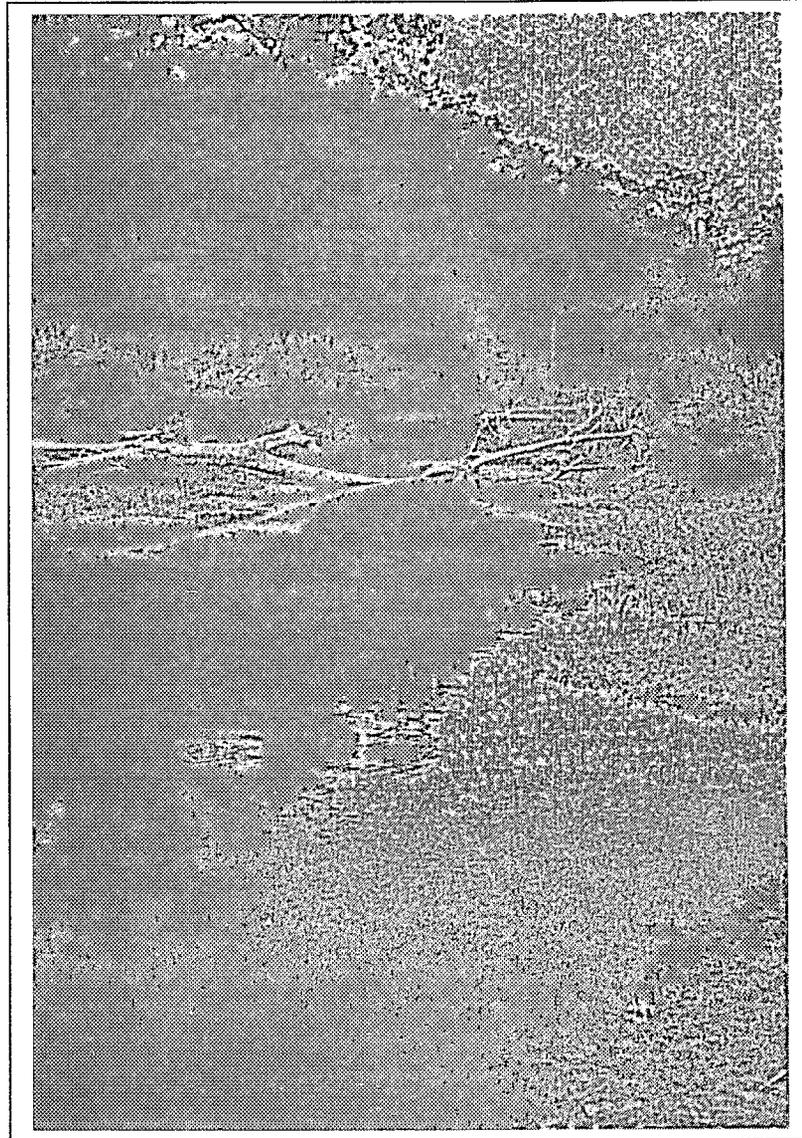
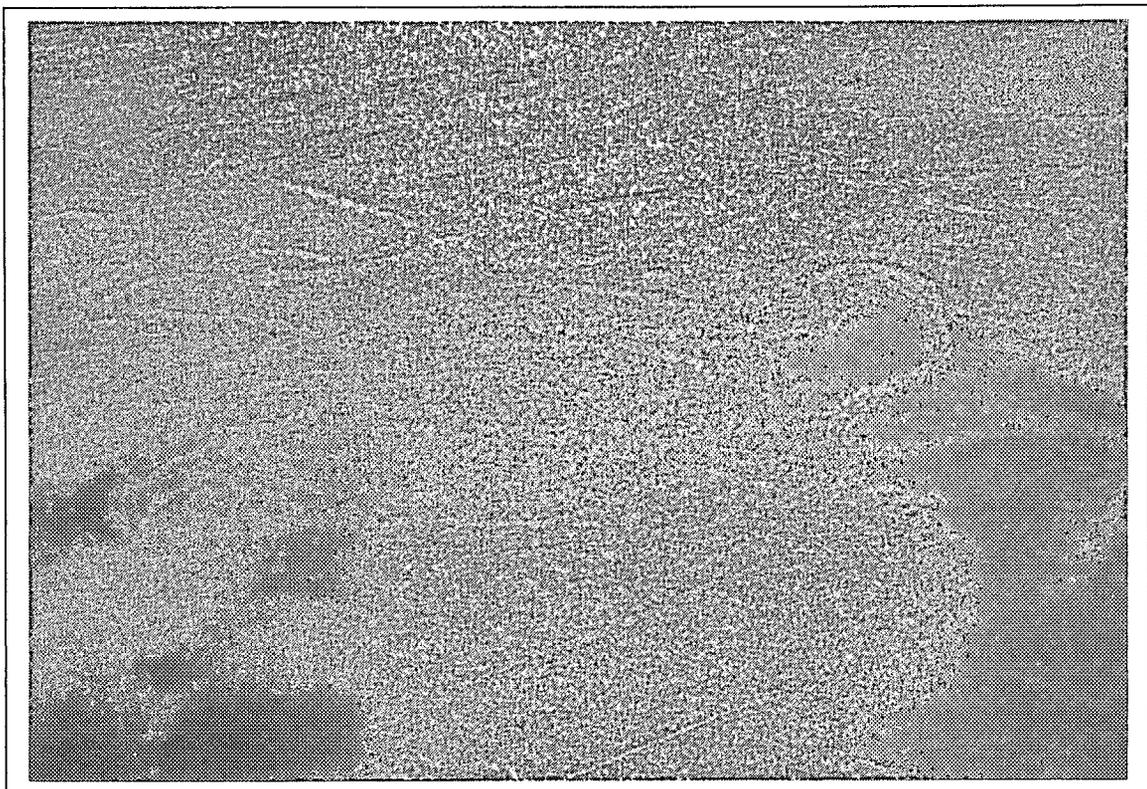


Photo 42 : Un fleuve des Llanos méandre dans la savane inondable du Béni (150 m), entouré de forêt galerie (noter au fond les lacs de forme rectangulaire). *Meandros, lagunas, selva y sabana en los Llanos del Beni. River meanders, lakes, forest and savannah in the Beni floodplain.*



## 6. Les matières dissoutes.

Tableau XXXVIII : Physico-chimie des cours d'eau andins de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.

B : bassins des rios Zongo, Kaka, La Paz, Luribay.

[Alt.= altitude de la station (m), Nb.= nombre d'échantillons prélevés à la station, Temp.= température (°C), Cond.= conductivité électrique à 25°C ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Coul.= couleur (unité Pt/Co), Turb.= turbidité (F.T.U.), MES= matières en suspension ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), MD= matières dissoutes ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), %SiO<sub>2</sub>= poids de la silice dans les matières dissoutes (%), teneurs élémentaires en  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ].

Físico-química de los rios andinos. Water physico-chemistry of andean rivers.

Rio	Alt	Nb.	Temp	pH	Cond	Coul	Turb	MES	HCO3	Cl	SO4	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO2	MD	%SiO2
Zongo (Cumbre)	4770	3	4.5		16	10	10	4	10.5	1.8	1.7	1.5	0.2	0.8	0.2	0.2	2.5	19	13
Zongo (aval du barrage)	4350	3	4.5	7.3	24	11	12	25	14.8	5.8	1.7	3.2	0.4	0.9	0.3	0.3	2.4	30	8
Zongo à Cuticuchi	2900	3	9.8	7.1	28	22	7	4	29.9	1.6	2.2	7.0	0.5	1.7	0.5	0.2	4.8	48	10
Zongo à Chururaqui	2100	2	13.7	7.1	16	15	7	17	13.2	3.5	3.6	1.6	0.2	1.3	0.4	0.3	8.4	27	31
Zongo à Islani	1500	5	14.6	7.0	23	38	62	184	9.1	3.1	2.1	1.3	0.3	1.9	1.4	0.4	4.7	24	19
Zongo à Alcoche	600	2	22.8	6.9	30	3	4	3	4.9	2.7	10.6	1.5	1.0	2.0	0.2	0.1	12.5	36	35
Livinoza à Botillaca	3700	1	0.8	7.0	23	22	10	26	14.6	3.1	7.8	2.8	0.3	1.8	0.4	0.1	4.6	36	13
Kaka à Teoponte	480	5	21.7	7.3	103	81	350	490	18.4	1.7	9.1	6.4	3.3	2.3	0.6	0.3	10.0	52	19
Ketama (Cfl. Kaka)	450	1	22.8		235	10	5	6	80.0	0.0	2.0	30.3	4.4	2.0	1.0	0.0	10.5	130	8
Tomachi (Cfl. Kaka)	450	2	25.2		175	43	15	2	80.6	1.2	3.4	16.5	4.7	3.2	1.2	0.2	7.6	119	6
Kaka à Nube	420	2	20.2		93	10	80	219	11.6	0.1	8.4	5.5	3.1	2.6	0.6	0.8	7.6	40	19
Catea (Cfl. Kaka)	400	3	23.4		149	53	30	30	73.1	3.5	12.3	18.9	2.7	1.0	0.7	0.1	8.9	121	7
Quencala (Cfl. Kaka)	400	1	21.4		202	40	6	1	117.1	0.0	0.0	22.4	7.7	0.5	1.9	0.2	9.1	159	6
Kaka (Cfl. Alto-Béni)	380	3	22.1		73	58	63	52	20.3	3.2	5.6	4.8	2.3	1.7	0.4	0.2	9.7	48	20
Uyapi (Cfl. Kaka)	450	2	21.3		82	108	101	154	30.0	4.0	8.6	2.6	3.0	4.1	0.9	0.1	9.9	63	16
Saniji (Cfl. Kaka)	400	2	20.8		135	75	65	68	61.5	5.7	15.8	15.2	1.9	0.7	0.6	0.1	10.3	112	9
Chiniri (Cfl. Kaka)	450	1	23.5		121	60	20	71	61.5	9.2	30.6	11.5	2.1	0.6	0.6	0.0	7.0	123	6
Kaluyo à Achachicala	4275	5	9.9	7.5	131	61	145	195	30.3	16.4	24.3	12.7	3.8	2.5	0.5	0.2	4.9	96	5
Achachicala à La Paz	3850	2	6.9	8.4	200	17	74	112	36.5	1.0	35.7	17.6	5.7	5.1	1.5	0.3	4.8	108	4
La Paz à Puente Lipari	2950	4	19.1	8.0	496	63	3233	3605	142.0	24.0	40.5	37.1	16.7	35.4	8.3	0.3	10.8	315	3
La Paz (Cfl. Palca)	2400	4	17.3	8.3	1439	23	21385	40897	207.1	30.6	527.5	74.4	60.0	113.2	13.7	0.2	9.4	1036	1
Palca (Cfl. La Paz)	2400	4	15.9	8.4	567	5	1020	1079	158.9	3.4	92.6	26.5	26.8	37.4	3.5	0.2	7.9	357	2
Kossini à Huaricana	2800	2	20.6	6.8	4017	47	46600	92584	92.1	18.7	955.3	144.9	239.8	130.3	24.4	0.3	6.3	1612	0
Maticuni à Pacuani	4000	1	12.6	7.3	180	35	10	22	29.3	2.5	8.9	16.0	8.1	3.9	0.9	0.2	0.3	70	0
Choquekkota à Ventilla	3650	1	15.0	6.9	139	40	13	34	31.7	2.5	18.1	10.2	4.0	2.9	0.6	0.0	0.2	70	0
Palca à Palca	3350	1	16.1	7.2	155	40	15	34	43.9	2.4	12.6	13.1	6.1	3.5	0.7	0.2	0.1	83	0
Mikhaya à Hampaturi	4300	1	11.3	6.6	94	70	75	187	36.6	3.0	5.0	7.2	2.7	5.7	0.7	0.2	0.7	62	1
Huayllani à Achumani	3660	21	14.2		164	104	12685	21415	55.3	18.8	26.8	13.5	4.9	12.8	1.8	0.2	8.0	142	6
Achumani à Achumani	3550	5	11.8		189	78	39770	64584	54.3	2.9	16.9	14.4	3.8	11.1	1.6	0.2	8.8	114	8
Quellumani à Achumani	3600	11	16.8		246	68	7585	9804	70.9	56.0	34.7	24.4	8.1	15.4	1.6	0.0	7.5	219	3
Anta à Hampaturi	4100	1	14.4	6.8	51	30	8	9	19.5	2.6	5.7	4.9	1.3	1.3	0.6	0.0	0.1	36	0
Antakahua (Puente)	3500	5	14.3		365	102	35688	49256	77.5	3.2	81.6	16.0	6.2	39.9	2.7	0.2	8.8	236	4
Achumani al colegio FB	3400	7	15.8		312	66	14211	31707	104.5	24.2	38.1	21.7	6.6	25.4	3.8	0.0	10.9	235	5
Kantutani à Entre Rio	3380	4	13.6		810	69	8025	16601	270.3	81.1	130.8	28.4	9.9	81.1	14.3	0.0	2.5	618	0
Choqueyapu à Obrajes	3340	5	12.3		497	95	1735	3591	212.7	43.9	140.4	37.8	7.9	47.8	12.8	0.0	2.9	506	1
La Paz à Aranjuez	3180	5	13.9		364	50	4805	8274	160.1	51.2	105.6	27.4	7.3	41.4	8.8	0.1	4.4	406	1
Anahuta à La Florida	3300	5	19.5		674	84	11270	21061	262.6	77.6	134.6	19.4	15.2	79.5	15.2	0.0	5.9	610	1
Ovejuyo à Ovejuyo	3650	4	16.2		715	56	1529	2740	120.4	97.5	174.6	27.6	17.1	86.7	7.8	0.0	5.1	537	1
Orkojahuira à Pte Olguin	3500	4	17.3		643	83	1313	1813	280.6	91.8	165.6	37.6	8.6	101.1	16.6	0.1	5.1	707	1
Chicani à Chicani	3550	5	14.8		114	109	638	1745	46.1	16.8	21.0	9.2	3.3	4.8	0.6	0.1	4.7	107	4
Orkojahuira à Chuquiagu.	3900	4	14.7		159	209	2563	3730	47.4	23.2	48.8	12.9	6.6	9.3	0.9	0.1	4.1	153	3
Irpavi à Puente Calacoto	3340	5	14.2		188	100	7070	11146	65.4	20.8	53.6	12.0	3.8	19.3	2.4	0.1	6.4	184	3
Luribay à Luribay	2550	40	20.7	8.2	970	17	4723	12434	208.4	15.6	495.4	46.2	58.2	83.0	9.8	0.1	8.7	925	1
Sapahaqui à Sapahaqui	3100	5	22.4	7.5	2179	24	16480	35173	197.2	11.2	384.3	129.9	164.6	207.0	10.7	0.3	10.8	1116	1
Porvenir à Asanbo	2500	37	22.5	7.4	610	24	1542	3615	193.4	7.0	162.7	22.1	37.0	30.2	8.3	0.1	7.4	468	2
Chincha (Cfl. Porvenir)	2500	3	20.5	7.2	451	25	1436	3684	130.5	18.0	93.9	31.0	25.4	21.9	3.7	0.2	6.0	331	2
Caracato à Caracato	2550	1	18.9	7.3	3119	23	70	126	263.5	9.7	999.9	192.0	176.0	248.5	9.6	0.5	17.4	1917	1
Lacalaca à Sapahaqui	3150	1	14.0	7.0	502	25	10000	17547	47.6	3.5	62.1	38.3	22.0	22.8	7.1	0.2	12.2	216	6
Kulsilluni à Chilcoma	4200	1	12.4	8.1	205	50	25	25	53.7	6.1	12.8	13.8	7.6	9.3	3.1	0.2	0.9	108	1

Tableau XXXVIII : Physico-chimie des cours d'eau andins de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.

C : bassins des rios Tamampaya, Boopi, Cotacajes et Alto-Béni.

[Alt.= altitude de la station (m), Nb.= nombre d'échantillons prélevés à la station, Temp.= température (°C), Cond.= conductivité électrique à 25°C ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Coul.= couleur (unité Pt/Co), Turb.= turbidité (F.T.U.), MES= matières en suspension ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), MD= matières dissoutes ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), %SiO<sub>2</sub>= poids de la silice dans les matières dissoutes (%), teneurs élémentaires en  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ].

Físico-química de los rios andinos. Water physico-chemistry of andean rivers.

Río	Alt.	Nb.	Temp.	pH	Cond	Coul.	Turb	MES	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO <sub>2</sub>	MD	%SiO <sub>2</sub>
Unduavi (Cumbre)	4300	1	6.2	7.2	29	5	3	35	17.1	0.1	4.2	4.5	0.2	0.5	0.1	0.5	3.6	31	12
Unduavi à Unduavi	3000	43	10.9	6.8	37	12	9	18	18.6	3.8	2.9	2.8	0.4	1.2	0.3	0.0	3.1	33	9
Unduavi à Sirupaya	1600	11		7.3	38	24	338	1179	16.2	3.7	8.2	3.2	1.1	3.6	0.6	0.4	7.0	44	16
Unduavi à Puente Villa	1200	15	18.0	7.3	43	33	112	241	19.3	4.0	6.7	2.8	1.5	2.0	0.4	0.1	8.9	46	19
Taquesi à Puente Villa	1200	15	16.8	7.1	58	63	106	209	20.5	2.4	7.1	4.4	1.6	1.9	0.6	0.3	6.9	46	15
Tamampaya à Pte Villa	1180	8	16.2	7.7	63	26	30	139	21.7	1.4	4.5	5.5	2.0	2.4	0.5	0.1	8.8	47	19
Peri à Arapata	1500	5	17.9	7.1	38	48	65	117	22.0	1.6	9.0	1.4	2.5	1.1	4.2	0.2	10.5	53	20
Solacama (Puente)	1300	6	17.0	7.5	77	26	102	314	13.5	1.5	13.9	3.0	4.5	1.6	0.4	0.2	9.3	48	19
Puri (Puente)	1300	4	17.2	8.1	158	65	126	1036	13.2	1.6	48.7	5.6	8.3	1.7	0.9	0.4	10.4	91	11
Tamampaya à VBarrientos	1050	4	19.3	8.2	83	20	14	30	13.8	1.5	18.9	3.2	4.2	2.3	0.4	0.1	11.0	55	20
Aceramarca à Unduavi	2950	36	10.0	6.6	35	9	6	14	21.1	3.2	2.3	3.1	0.4	0.8	0.2	0.1	3.9	35	11
Solacama à V Barrientos	1050	2	18.2	8.1	125	20	12	11	17.1	2.0	29.7	3.9	7.0	2.3	0.3	0.1	11.4	74	15
Totora (Cfl. Tamampaya)	600	2	17.7		64	15	10	6	9.8	1.8	12.7	1.9	2.6	2.0	0.2	0.0	11.8	43	28
Tamampaya (Cfl. La Paz)	500	2	18.5		133	18	18	29	33.0	1.9	16.6	12.1	6.0	2.4	0.3	0.0	11.2	84	13
Chajno (Cfl. Tamampaya)	1200	1	18.1	7.6	89	10		6	17.1	2.1	25.2	3.9	6.4	2.2	0.2	0.0	16.3	73	22
Unduavi à Chuspipata	2350	8	13.6	7.5	33	14	45	84	18.3	3.9	2.9	2.5	0.9	1.7	0.3	0.0	6.4	37	17
La Paz à La Plazuela	800	7	21.2	8.8	668	35	2817	4484	118.1	10.9	165.3	32.8	22.9	39.9	6.3	5.6	9.4	411	2
Miguillas à Miguillas	800	7	18.0	7.9	94	17	48	104	12.7	1.9	21.0	3.8	4.9	2.3	0.5	0.3	10.7	58	18
Canamina (Vado)	1200	4	18.0	8.0	100	20	101	298	23.4	2.9	12.5	3.7	5.6	1.8	0.5	0.2	9.8	60	16
Chekha à Suri		3	15.6	7.7	51	8	9	17	16.6	0.3	4.5	2.5	2.0	2.5	0.3	0.2	8.0	37	22
Khara à Licoma		4	15.0	7.6	49	18	35	79	21.8	2.8	4.9	3.0	2.1	2.3	0.5	0.2	7.6	45	17
Boopi à Sn Miguel Huachi	400	3	21.1	8.1	174	55	405	1038	43.9	4.7	31.5	9.9	6.3	6.4	0.7	0.1	10.2	114	9
Yanamayo (Cfl. Boopi)	450	2	17.4	8.2	84	14	8	28	15.9	1.9	15.9	4.2	2.9	2.0	0.2	0.0	12.7	56	23
Boopi à La Asunta	450	2	16.4	8.6	168	20	60	178	24.4	2.8	49.0	7.3	8.1	7.1	1.3	5.6	15.2	121	13
La Paz (Cfl. Tamampaya)	500	2	18.6	6.2	288	18	130	259	51.9	4.0	79.0	13.2	18.9	13.0	1.3	0.0	11.9	193	6
San Pedro (Cfl. Boopi)	450	1	17.8		75	20	12	9	14.6	2.0	15.3	3.1	3.0	2.5	0.2	0.1	8.1	49	17
Affluent RD (Cfl. Boopi)	450	1	19.9		52	15	20	73	13.4	1.9	9.3	2.2	1.6	1.6	0.2	0.0	8.3	39	22
Affluent RD (Cfl. Boopi)	450	1	19.9		135	40	32	49	41.5	1.9	8.3	12.4	4.0	3.3	0.9	0.0	8.2	81	10
Chamaca (Cfl. Boopi)	450	1	19.9		64	15	20	39	8.5	1.9	6.4	2.1	2.5	2.0	0.2	0.1	5.7	29	19
Cajones (Cfl. Boopi)	450	1	19.4		54	70	55	108	9.8	2.2	7.9	2.3	2.0	1.2	0.3	0.1	5.8	32	18
Affluent RG (Cfl. Boopi)	450	1	19.3		46	20	18	25	24.4	1.7	1.6	2.2	1.4	1.8	0.3	0.1	6.4	40	16
San Jose (Cfl. Boopi)	450	1	19.3		77	50	55	15	31.7	1.9	3.5	10.2	2.3	1.6	0.2	0.1	6.3	58	11
Affluent RD (Cfl. Boopi)	450	1	20.8		82	50	32	31	26.8	2.4	7.1	4.2	3.0	2.9	0.8	0.4	6.6	54	12
Affluent RD (Cfl. Boopi)	450	1	21.6		109	80	53	43	24.4	2.3	11.5	4.4	4.0	3.8	1.0	0.5	5.9	58	10
Affluent RD (Cfl. Boopi)	450	1	20.4		131	30	18	12	63.4	1.7	3.9	11.8	3.5	3.9	0.9	0.1	5.8	95	6
San Fernando (Cfl. Boopi)	450	1	20.3		66	190	180	409	28.6	2.7	10.2	3.3	2.6	2.0	0.7	1.2	5.9	57	10
Affluent RD (Cfl. Boopi)	450	1	20.3		172	50	55	78	117.1	1.9	13.5	18.7	4.4	3.1	0.9	0.1	5.9	166	4
Chispani (Cfl. Boopi)	450	1	21.5		290	25	12	7	36.6	3.2	22.6	37.4	6.2	6.9	0.8	0.0	5.7	119	5
Colorado (Cfl. Boopi)	450	1	19.3		78	20	15	4	39.0	1.9	4.2	7.1	1.4	2.2	0.8	0.1	5.8	63	9
Khatu à Inquisivi	2400	5	15.2	8.0	107	16	28	74	28.1	11.2	16.7	6.5	6.2	3.2	0.7	0.2	7.3	80	9
Khatu à Quime	3100	2	10.1	7.3	68	9	24	92	6.1	1.5	27.4	4.0	1.7	1.1	0.5	0.3	8.7	51	17
Khatu à Huaynacota	4100	2	8.6	7.1	53	5	4	1	5.6	2.3	16.3	3.6	1.5	2.7	0.8	0.0	10.5	43	24
Cotacajes à Sn Miguel H	400	2	21.6		197	23	22	18	67.1	2.8	33.9	16.3	6.9	6.1	0.7	0.1	9.3	143	6
Alto-Béni à Pte Sapecho	400	30	23.4	7.5	192	60	687	1268	57.6	3.6	35.7	16.3	9.2	6.8	1.5	0.2	9.6	141	7
Piquendo à V Camacho	450	13	21.8	7.7	89	23	14	11	49.4	2.6	7.1	9.4	1.9	1.4	0.9	0.3	9.3	82	11
Inicua à Puente Inicua	1000	3	21.6		130	97	54	32	67.5	4.4	12.4	14.1	2.3	3.2	2.2	0.3	10.0	116	9
Inicua à Angosto Inicua	390	2	22.4	7.8	186	38	33	12	66.9	0.0	5.6	22.7	3.5	3.7	2.0	0.3	12.3	117	11
Alto-Béni à Angosto Inicua	390	2	19.7		254	75	950	1068	48.8	4.1	41.4	17.5	12.2	7.9	1.3	1.2	7.4	142	5
Alto-Béni (Cfl. Kaka)	380	2	22.2		189	83	93	150	53.7	5.8	29.3	11.6	6.2	6.0	0.9	0.1	6.0	120	5

6. Les matières dissoutes.

Tableau XXXVIII : Physico-chimie des cours d'eau andins de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.

D : bassins des rios Béni, Yacuma et Securé.

[Alt.= altitude de la station (m), Nb.= nombre d'échantillons prélevés à la station, Temp.= température (°C), Cond.= conductivité électrique à 25°C ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Coul.= couleur (unité Pt/Co), Turb.= turbidité (F.T.U.), MES= matières en suspension ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), MD= matières dissoutes ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), %SiO<sub>2</sub>= poids de la silice dans les matières dissoutes (%), teneurs élémentaires en  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ].

*Físico-química de los rios andinos. Water physico-chemistry of andean rivers.*

Rio	Alt.	Nb.	Temp.	pH	Cond.	Coul.	Turb.	MES	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO <sub>2</sub>	MD	%SiO <sub>2</sub>
Quendeque (Cfl. Béni)	300	5	23.4	8.2	146	48	19	13	57.5	2.4	13.5	17.1	2.5	2.0	1.0	0.2	13.1	109	12
Chepite (Cfl. Béni)	300	3	21.4		112	75	105	144	53.1	2.4	6.3	9.1	2.7	4.0	1.3	0.2	6.0	85	7
Suapi (Cfl. Béni)	300	5	25.0	8.2	87	51	20	4	42.5	1.6	4.2	9.2	1.8	1.2	1.1	0.3	10.3	72	14
Quiquibey (Cfl. Béni)	300	5	24.1		189	109	532	612	88.3	2.6	7.9	23.5	3.4	3.0	1.8	0.5	8.7	140	6
Quiquibey (Puente)	1200	4	21.7		202	31	15	11	89.3	3.7	18.9	27.1	2.9	2.0	1.2	0.0	8.8	154	6
Tuichi (Cfl. Béni)	300	6	22.9	7.3	117	78	138	266	33.6	1.9	10.3	8.0	3.1	2.2	1.0	0.5	9.2	70	13
Pelechuco à Pelechuco	3300	1			70	0	0	11	16.7	0.4	17.9	6.0	1.5	2.2	0.3	0.0	5.1	50	10
Béni à Angosto del Bala	280	79	23.5	6.2	144	57	1025	2037	40.2	2.4	12.3	12.4	5.2	4.2	1.4	0.3	7.3	86	9
Hondo (Cfl. Béni)	300	1	25.2		79	160	175	200	48.7	7.2	10.6	4.9	1.8	1.3	1.4	0.4	2.6	79	3
Maije (Vado)	250	1	26.0		118	15	8	61	34.2	3.3	12.9	5.8	3.5	6.9	2.0	0.1	4.8	74	7
Jiruma (Vado)	250	1	23.0		112	10	5	63	26.8	2.2	20.7	4.9	3.5	4.3	2.2	0.0	10.4	75	14
Moa (Vado)	250	1	23.0		68	10	10	78	22.0	1.9	8.6	2.9	2.2	2.2	1.6	0.1	5.3	47	11
Capahuaca (Vado)	250	1	24.5		198	10	10	67	51.2	4.0	34.1	14.5	5.7	9.8	2.4	0.1	7.9	130	6
Nama (Vado)	250	1	24.0		160	25	2	1	67.1	2.4	15.9	15.6	4.0	7.2	1.2	0.0	7.2	121	6
Yube (Vado)	250	1	24.0		137	25	0	2	51.2	2.0	15.3	13.0	3.4	4.1	0.8	0.1	6.1	96	6
Satariapo (Vado)	250	1	23.0		83	30	4	2	29.3	1.9	10.5	5.1	2.4	2.3	0.5	0.1	6.0	58	10
Tequeje (Vado)	250	1	23.0		174	25	6	5	92.7	1.9	1.1	23.3	3.5	3.8	1.1	0.0	7.3	135	5
Cunaca (Vado)	250	1	21.0		13	30	6	3	11.0	1.8	0.0	0.8	0.5	1.5	0.2	0.2	7.8	24	33
Terene (Vado)	250	1	21.0		223	25	0	3	67.1	3.0	42.3	17.4	7.5	9.6	2.2	0.0	7.4	157	5
Enadere (Vado)	250	1	23.0		149	20	7	0	36.6	2.1	19.7	10.8	4.0	5.8	1.4	0.0	6.6	87	8
Juyare (Vado)	250	1	24.0		253	20	8	2	109.8	3.8	24.2	25.2	5.7	16.7	1.9	0.0	7.9	195	4
Sabaya (Vado)	250	1	23.0		168	20	0	3	46.4	2.2	35.4	11.3	6.2	6.7	1.6	0.1	8.7	119	7
Seco (Vado)	250	1	25.0		34	15	8	4	12.2	1.7	0.0	1.4	1.4	7.6	0.5	0.1	11.2	36	31
Turnupasa (Vado)	250	1	23.0		21	10	7	1	14.6	1.6	0.0	0.9	0.9	1.7	0.6	0.0	8.4	29	29
Ibotudo (Vado)	250	1	23.0		12	10	7	2	8.5	1.6	0.0	0.4	0.4	0.1	0.3	0.0	6.3	18	36
Mamuque (Vado)	250	1	25.0		193	15	8	2	63.4	3.1	34.3	12.8	7.5	7.5	2.2	0.0	7.7	139	6
Sayuba (Vado)	250	1	23.0		158	15	10	4	46.4	3.2	28.3	9.7	4.4	7.8	1.9	0.1	8.4	110	8
Tibuapu (Vado)	250	1	24.0		120	15	0	2	22.0	2.1	15.8	5.6	3.5	4.4	2.3	0.0	8.4	64	13
Colorado (Vado)	250	2	22.0		252	50	34	29	124.5	4.5	3.6	28.4	5.7	9.6	3.3	0.1	10.7	190	6
Yacumo (Vado)	300	1	24.0		164	30	20	15	68.3	2.5	11.7	16.9	3.5	5.1	2.4	0.0	10.0	120	8
Hondo (Vado)	250	1	20.9		159	75	25	12	58.6	2.9	12.9	9.3	5.7	6.5	2.9	0.4	12.8	112	11
Maniqui	800	1			166	5	5	3	87.1	0.0	4.7	21.6	2.8	2.4	1.2	0.0	9.6	129	7
Chipiri (Puente)	250	3	26.8	7.1	62	5	4	12	38.5	1.3	1.4	6.8	2.0	1.2	1.2	0.1	13.0	66	20
Ichenota (Puente)	250	2	26.6	7.1	21	15	9	7	17.7	1.2	1.2	2.0	0.5	0.4	1.0	0.0	9.6	34	29
Matamojo (Puente)	250	3	29.7	6.9	63	5	9	16	29.7	0.7	6.1	7.4	1.1	1.4	1.4	0.3	6.8	55	12
Bomborosama (Puente)	250	3	29.3	7.0	51	7	9	17	29.9	0.8	2.8	6.7	0.7	1.1	1.0	0.2	7.2	50	14
Zterasama (Puente)	250	3	29.5	6.4	67	7	7	12	28.5	1.1	9.1	7.7	1.4	1.8	1.0	0.2	8.3	59	14
Samusabete (Puente)	250	3	25.6	7.4	90	7	5	8	33.9	1.3	11.1	8.6	2.3	3.7	0.9	0.2	9.8	72	14
Panroelo (Puente)	250	3	27.1	7.0	49	8	14	42	31.5	1.1	1.9	5.0	0.9	2.2	1.2	0.3	9.0	53	17
Isinuta (Vado)	250	3	27.9	7.2	93	3	5	7	38.5	1.2	8.9	8.9	2.4	3.9	1.0	0.2	9.9	75	13
Isiboro (Vado)	250	2	27.2	7.2	148	0	4	6	48.9	12.0	5.8	11.2	3.1	12.3	1.3	0.3	10.3	105	10

Tableau XXXVIII : Physico-chimie des cours d'eau andins de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.

E : bassins des rios Chaparé, Ichilo et Grande.

[Alt.= altitude de la station (m), Nb.= nombre d'échantillons prélevés à la station, Temp.= température (°C), Cond.= conductivité électrique à 25°C ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Coul.= couleur (unité Pt/Co), Turb.= turbidité (F.T.U.), MES= matières en suspension ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), MD= matières dissoutes ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), %SiO<sub>2</sub>= poids de la silice dans les matières dissoutes (%), teneurs élémentaires en  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ].

Físico-química de los rios andinos. Water physico-chemistry of andean rivers.

Rio	Alt.	Nb.	Temp.	pH	Cond	Coul	Turb	MES	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO <sub>2</sub>	MD	%SiO <sub>2</sub>
Colomi à Corani	3250	3	10.5		52	23	28	45	24.0	3.8	4.7	3.1	1.3	5.6	2.4	0.3	9.6	55	18
Paricti (Puente)	1800	3	14.1	7.7	41	2	3	16	20.1	0.9	3.0	4.6	0.9	1.7	0.3	0.2	6.6	38	17
San Jacinto (Puente)	1900	3	12.9	7.2	25	3	2	2	17.0	1.0	1.1	2.4	0.5	0.8	0.2	0.2	3.1	26	12
Esperitu Santos (Puente)	550	8	20.8	7.4	150	5	13	32	46.7	9.5	15.4	8.3	4.0	9.2	0.8	0.2	7.0	101	7
Esperitu Santos à V Tunari	350	16	22.9	7.7	224	23	52	136	55.2	27.1	18.2	13.9	4.5	22.4	1.3	0.6	9.4	153	6
Lopez Mendosa à Lopez	3200	2	16.7		45	3	7	16	21.9	0.8	3.5	2.4	0.9	3.7	1.1	0.3	8.9	44	20
San Mateo à Villa Tunari	350	9	23.1	7.5	201	11	11	20	57.8	9.9	13.5	13.7	5.3	9.9	0.8	0.2	6.7	118	6
Chapare à Villa Tunari	300	15	23.5	7.6	209	28	188	284	56.2	18.4	14.4	13.4	4.3	16.7	1.1	0.6	10.9	136	8
Vinchuta (Puente)	350	12	27.0	6.7	63	2	6	10	15.0	1.0	12.4	4.4	2.0	2.0	1.0	0.1	8.9	47	19
Coni (Puente)	350	11	27.4	7.3	46	5	9	14	32.1	1.0	1.3	5.2	0.8	2.0	0.9	0.2	6.3	50	13
Ene (Puente)	250	11	27.5	6.8	51	4	9	10	22.7	0.9	4.3	4.4	1.2	1.9	1.1	0.1	8.3	45	18
Ivuelo (Puente)	250	1	24.5	6.3	40	0	0	8	26.8	2.5	0.9	3.2	1.2	1.1	0.5	0.1	9.1	45	20
Putintiri (Puente)	400	1	23.2	7.3	147	10	2	2	58.6	4.7	6.8	9.2	6.0	4.2	0.4	0.0	6.1	96	6
Avispas (Puente)	400	1	21.3	7.2	104	5	4	5	41.5	2.0	7.0	7.0	5.0	1.6	0.3	0.1	4.2	69	6
Huaysusuni (Puente)	400	1	21.0	7.2	145	10	5	4	50.0	3.7	12.3	11.2	9.0	3.2	0.3	0.0	10.7	100	11
Roque Mayu (Puente)	1900	1	13.4	6.8	28	10	0	2	19.5	1.9	1.9	1.8	0.2	0.8	0.4	0.0	6.4	33	19
Santa Isabel à Locotai	2100	1	13.0		80	0	0	5	23.2	2.4	20.1	1.2	1.8	4.4	0.8	0.0	12.0	66	18
Vinto à Vinto	2600	1	9.5		14	2	4	2	11.0	2.4	1.8	0.2	0.1	0.6	0.3	0.0	8.6	25	34
Kinku Mayu		1	11.0		53	40	30	28	34.2	4.6	4.0	2.2	1.1	3.4	1.7	0.1	10.6	62	17
Chaco Punku		1	10.0		6	0	0	3	11.0	2.6	0.7	0.1	0.0	0.2	0.6	0.0	8.7	24	36
Salto		1	11.0		23	52	35	70	14.6	3.7	1.3	0.2	0.1	1.5	2.3	0.2	11.0	35	32
Jatun Phujru		1	11.0		10	0	5	4	13.4	2.3	1.3	0.1	0.0	0.2	0.7	0.0	2.1	20	10
Thola Mayu		1	10.5		12	0	0	9	9.8	2.6	2.7	0.1	0.1	0.8	0.4	0.0	10.2	27	38
Cayurani		1	9.0		22	15	15	6	9.8	2.8	1.4	0.3	0.1	0.8	1.0	0.0	6.3	23	28
Malagua		1	19.0		45	0	8	6	24.4	2.3	5.2	1.2	0.5	1.6	0.4	0.0	10.5	46	23
Candelaria		1	11.0		71	10	18	25	31.7	3.5	2.2	4.0	0.3	1.8	1.4	0.0	8.8	54	16
Keke Sama		1	10.0		17	10	18	33	12.2	2.2	1.1	0.3	0.1	1.1	0.9	0.0	8.8	27	33
Chimore (Puente)	250	14	24.6	6.8	59	9	12	29	15.2	0.8	11.5	4.8	1.8	2.3	0.6	0.3	8.1	45	18
Cesarsama (Puente)	250	12	27.3	6.9	67	16	19	36	25.3	1.1	5.1	6.6	1.4	2.4	1.3	0.2	9.6	53	18
Mariposas (Puente)	260	11	26.8	6.4	11	12	10	11	13.6	1.0	1.8	0.3	0.2	0.1	1.1	0.2	7.3	26	28
Ivirgarsama (Puente)	250	12	26.3	6.7	28	8	20	32	14.2	0.9	1.8	1.9	0.6	1.5	0.8	0.1	8.3	30	28
Cristal Mayu (Puente)	250	4	25.5	6.6	31	11	14	17	22.5	1.6	2.0	2.9	0.4	1.2	0.6	0.3	11.5	43	27
Sajta (Puente)	250	6	25.7	6.4	77	23	49	144	18.0	1.1	11.5	6.1	1.8	2.0	0.7	0.9	8.7	51	17
Sabala (Puente)	250	4	25.4	6.3	45	9	14	26	14.4	1.0	7.6	2.4	1.0	2.0	0.7	0.1	14.0	43	32
Ichoa (Puente)	250	6	25.1	6.4	81	9	13	18	9.1	1.1	18.0	4.8	2.2	2.4	0.8	0.1	12.0	51	24
Bianco (Puente)	250	3	25.9	6.5	24	30	19	29	17.0	1.1	2.6	1.0	0.5	1.0	1.7	0.3	13.7	39	35
Bulubulu (Puente)	240	4	25.7	7.0	83	18	10	11	46.1	1.0	4.5	8.5	1.0	4.0	1.6	0.3	15.0	82	18
Ichilo (Puente)	240	6	25.5	6.4	119	15	33	29	25.8	1.2	20.3	9.7	3.2	3.1	1.2	0.2	10.2	75	14
Vivora (Puente)	290	4	27.0	6.8	42	18	14	14	28.1	0.6	1.5	4.5	0.8	0.8	2.2	0.5	15.4	54	28
Chore (Puente)	290	4	25.6	7.4	103	17	19	35	69.4	0.8	1.7	14.8	1.8	0.8	2.2	0.3	13.0	105	12
Isosog (Puente)	250	2	29.1	6.2	69	23	18	7	27.0	1.3	7.7	4.8	1.3	1.9	1.2	0.2	11.6	57	20
Mamorecito (Puente)	250	3	25.4	6.8	13	25	8	10	14.6	1.2	0.4	0.5	0.1	0.4	0.4	0.1	8.0	26	31
Lagrimas (Puente)	250	1	24.2	6.2	20	25	7	5	15.9	2.0	0.4	0.6	0.1	0.9	0.3	0.1	9.2	30	31
Isarsama (Puente)	250	3	26.3	6.5	42	20	16	27	21.1	1.2	7.4	3.0	0.6	1.3	0.6	0.1	10.6	46	23
Piray à La Guardia	450	3	25.3	8.6	375	8	109	285	154.1	3.1	39.4	31.1	13.9	22.5	3.8	0.5	11.4	280	4
Yapacani à Yapacani	290	8	27.8	7.9	329	16	41	57	197.6	2.9	12.0	39.8	8.3	6.2	2.5	0.3	16.2	286	6
Piray à Taruma	550	1	22.2		217	110	4750	11006	126.9	2.8	8.9	28.4	5.7	4.9	3.7	0.2	7.2	189	4
Surutu à Yapacani	290	1	24.1	6.6	430	25	20	87	174.5	3.5	9.2	41.0	8.0	3.7	2.5	0.1	18.6	261	7

6. Les matières dissoutes.

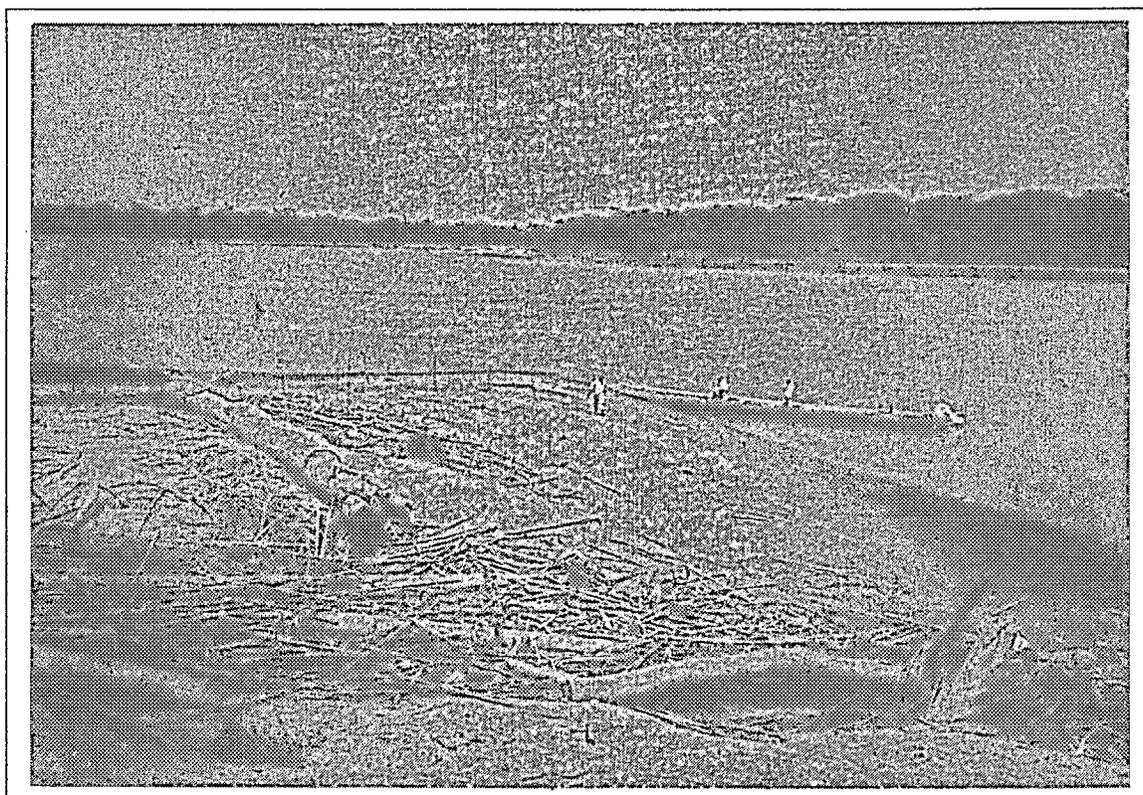
Tableau XXXVIII : Physico-chimie des cours d'eau andins de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.

F : bassins des rios Grande et Parapeti.

[Alt.= altitude de la station (m), Nb.= nombre d'échantillons prélevés à la station, Temp.= température (°C), Cond.= conductivité électrique à 25°C ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ), Coul.= couleur (unité Pt/Co), Turb.= turbidité (F.T.U.), MES= matières en suspension ( $\text{mg.l}^{-1}$ ); MD= matières dissoutes ( $\text{mg.l}^{-1}$ ), %SiO<sub>2</sub>= poids de la silice dans les matières dissoutes (%), teneurs élémentaires en  $\text{mg.l}^{-1}$ ].

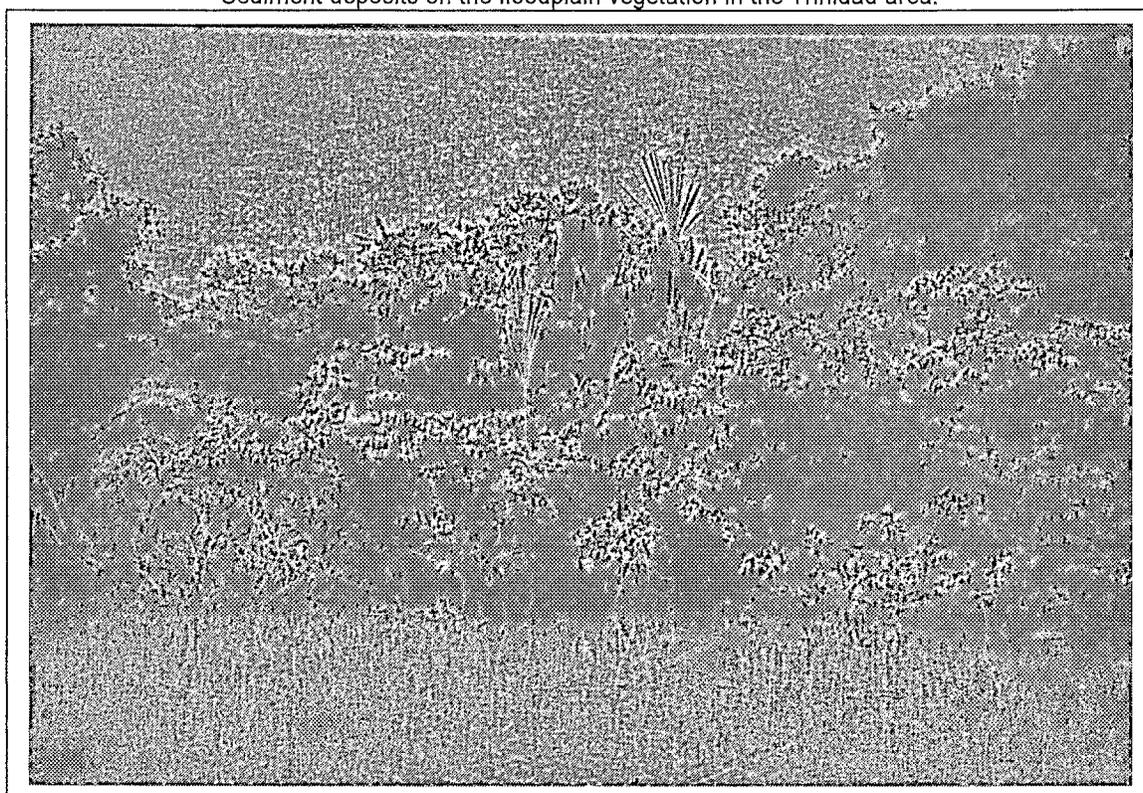
*Físico-química de los rios andinos. Water physico-chemistry of andean rivers.*

Río	Alt.	Nb.	Temp.	pH	Cond	Coul	Turb	MES	HCO3	Cl	SO4	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO2	MD	%SiO2
Jatun Mayu à Tiraque	3200	2	17.0		61	0	8	21	29.6	0.4	4.3	3.8	1.4	5.4	1.6	0.4	6.9	54	13
Pucara à Tolata	2680	2	16.0		475	18	80	54	157.3	71.2	28.0	17.3	7.0	67.2	3.0	0.4	4.8	356	1
Tacata à Jankho Khala	4100	1	8.0		70	0	0	2	20.5	0.0	5.8	7.1	2.0	2.4	0.8	0.0	0.1	39	0
Rocha à Suticollo	2450	7	21.0	7.6	646	23	22	31	206.2	49.4	68.2	38.2	26.1	88.1	5.2	0.6	12.2	494	2
Tapacari à Parotani	2450	9	22.9	8.1	1238	16	215	502	268.2	13.8	340.9	61.8	78.9	49.0	7.8	2.5	6.9	830	1
Rocha à Capinota	2350	3	21.8	8.6	911	3	47	98	180.4	33.1	250.9	41.2	44.4	96.1	6.5	2.7	10.7	666	2
Arque à Capinota	2350	3	20.7	8.2	879	6	993	2108	196.8	8.7	196.7	41.9	40.0	31.2	6.8	0.2	8.7	531	2
Caine à La Vina	1950	4	16.6		1174	23	13	20	252.7	21.8	281.1	60.3	85.8	53.7	7.0	0.0	10.3	773	1
Pajcha à Chaco	1900	2	19.8	8.3	789	0	0	16	244.5	7.1	190.5	39.3	25.9	34.7	3.7	0.0	16.8	563	3
Chico à Chaco	1850	2	16.5	8.7	590	0	3	17	213.6	6.4	118.6	33.9	23.8	24.7	4.0	0.4	16.5	442	4
Grande à Puente Arce	1500	5	18.9	8.9	907	13	413	890	208.7	26.9	179.9	45.0	41.3	60.1	7.5	4.5	9.4	583	2
Novillero à Mataral	1550	2	24.2	7.7	447	0	1	33	184.9	3.7	56.6	36.1	15.8	20.2	1.9	0.3	18.8	338	6
Jatun Mayu à Tunas M	2400	2	19.3	8.5	255	8	3	8	72.6	1.6	41.6	15.9	10.9	14.8	1.7	0.3	10.8	170	6
Zudanez à Zudanez	2450	2	15.4	8.4	163	0	2	7	78.3	1.6	15.2	13.0	7.4	7.6	1.5	0.3	7.8	133	6
Sauce Mayu à Otoronco	2250	2	17.1	8.3	366	0	3	21	82.1	0.9	77.5	25.0	16.4	19.9	1.6	0.2	19.3	243	8
Tomina à Villa Tomina	2050	2	16.8	7.4	236	28	79	74	37.7	0.9	43.6	13.9	11.0	11.7	1.8	0.4	11.2	132	8
Chimboata à Liacho Mayu	2800	2	15.3	7.1	59	58	1105	1682	29.0	3.2	17.1	4.6	2.9	4.1	2.5	0.9	7.5	72	10
Mayu Khari à Soto Mokho	2100	2	20.0	8.6	372	0	0	15	157.2	8.4	35.3	33.9	14.8	30.5	2.2	0.3	18.6	301	6
Mizque à Puente Chujillas	1780	3	20.7	8.4	136	1	1	11	50.6	0.7	21.4	9.9	5.4	8.2	1.4	0.1	7.7	105	7
Limon à Rancho Astillero	1300	1	15.5		239	0	0	12	74.3	1.4	23.0	11.2	10.7	14.0	2.4	0.0	12.7	150	8
Azero à Puente Azero	1050	2	21.0	8.2	165	43	215	401	62.9	2.0	25.9	12.0	6.3	8.0	2.2	0.6	12.1	132	9
Taperillas à Chuhuayaco	1100	2	18.7	8.7	244	5	28	189	118.2	0.7	16.7	31.1	4.1	11.1	3.7	0.3	24.6	211	12
Palmapampa à Palmap.	1250	2	19.3	8.7	442	13	8	53	192.0	2.4	67.2	41.4	11.0	23.1	6.9	0.3	28.6	373	8
Caraparicito à Carapar.	1050	1	13.0		502	0	0	14	244.7	5.7	33.1	18.4	12.0	30.0	4.5	0.0	16.5	365	5
Grande à Abapo	450	72	24.3		637	33	3480	6096	143.1	24.9	110.4	43.7	25.6	33.0	4.7	0.4	9.3	395	2
Sucusuma (Vado)	2000	2	15.7		323	18	6	2	168.4	3.2	14.8	34.5	9.9	6.0	1.3	0.1	11.6	250	5
Khaia Uta (Vado)	2000	2	17.2		357	15	8	3	125.7	3.4	72.6	36.1	8.9	20.0	1.2	0.0	12.9	281	5
Garrapata Mayu (Vado)	2000	2	18.1		586	15	7	2	220.8	5.6	32.3	34.0	19.9	45.0	1.7	0.1	26.0	385	7
Caine à Ang. Molineros	1850	1	17.0		984				240.0	23.4	316.0	65.9	68.9	119.0	6.7	1.4	10.0	851	1
Timboy P. à Chuhuayaco	1150	1	28.0	8.4	374	20	106	630	168.4	1.5	45.5	43.8	5.1	14.9	6.1	0.5	27.6	313	9
Challa à Changolla	4100	1	13.6		182				84.8	0.7	16.3	13.6	10.9	12.3	2.7	0.2	7.0	149	5
Mizque à Mizque	1950	1	19.0		34				17.1	0.7	4.8	2.0	1.1	4.1	1.0	0.1	8.0	39	21
Umajalanta à Torotoro	2850	3	11.6	7.1	96	20	7	2	58.8	1.7	0.8	11.1	4.5	0.4	0.5	0.0	6.4	84	8
Rodeo à Torotoro	2750	3	10.8		304	22	8	5	159.4	3.0	10.2	36.7	9.2	5.6	1.4	0.0	11.0	237	5
Chifonkhakha à Torotoro	2660	2	16.5	8.0	273	30	8	2	166.0	3.0	2.6	33.4	8.4	2.4	0.8	0.0	12.5	229	5
Urundaiti (Vado)	850	2	20.5	8.9	2057	43	129	327	393.1	138.4	420.4	22.6	14.7	338.0	10.6	0.3	20.6	1359	2
Parapeti à Camiri	750	3	21.3	8.3	314	22	63	215	125.4	16.1	27.0	27.0	5.4	23.2	2.9	0.2	13.9	241	6
Muyupampa à Muyup.	1150	2	20.3	8.7	262	15	72	222	134.0	3.2	16.2	29.0	6.3	12.5	2.8	0.0	13.2	217	6
Sauces à Monteagudo	1150	2	25.0	9.1	213	8	8	83	124.7	0.9	8.8	29.3	5.4	8.5	3.1	0.3	20.1	201	10
El Banado à Heredia	1200	2	21.4	9.1	270	3	3	18	107.1	5.7	19.7	32.9	5.7	11.1	2.7	0.5	12.1	198	6
Tacuaraí à Yuti	750	1	26.8		697	45	38	54	202.4	14.3	289.2	45.8	13.2	82.4	5.6	0.0	16.2	689	2
CV			0.3	0.1	1.8	1.1	4.6	4.6	1.1	2.2	2.7	1.4	2.7	2.5	1.5	2.3	0.5	1.5	0.8



↑ Photo 43 : Dépôts de bois (Madeira) sur les rives du Rio Béni (140 m).  
*Depósitos de madera sobre las orillas del Río Beni. Wood deposits on the Beni river bank.*

↓ Photo 44 : Piégeage de sédiments par la végétation dans la plaine d'inondation, région de Trinidad (140 m).  
*Depósitos de sedimentos sobre la vegetación de la llanura de inundación en la región de Trinidad.*  
*Sediment deposits on the floodplain vegetation in the Trinidad area.*



6. Les matières dissoutes.

**VI.A.2.c. Dans les Llanos.**

Dans les Llanos du bassin du Rio Madeira à Villabella, 88 cours d'eau ont été échantillonnés, sans considérer ceux issus du bouclier brésilien, dont 35 pour le bassin du Rio Béni et 53 pour le bassin du Rio Mamoré (Tableau XXXX). Les concentrations rencontrées sont généralement plus faibles que dans les Andes du fait de phénomène de dilution par les apports latéraux des fleuves de plaine (Roche & al., 1986). Les fortes teneurs du Rio Grande se font sentir assez loin vers l'aval (Figure 149).

**Tableau XXXX** : Physico-chimie des cours d'eau des Llanos de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.

**A** : bassins des rios Béni, Madre de Dios et Orthon.

[Alt.= altitude de la station (m), Nb.= nombre d'échantillons prélevés à la station, Temp.= température (°C), Cond.= conductivité électrique à 25°C ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ), Coul.= couleur (unité Pt/Co), Turb.= turbidité (F.T.U.), MES= matières en suspension ( $\text{mg.l}^{-1}$ ), MD= matières dissoutes ( $\text{mg.l}^{-1}$ ), %SiO<sub>2</sub>= poids de la silice dans les matières dissoutes (%), teneurs élémentaires en  $\text{mg.l}^{-1}$ ].  
*Físico-química de los rios de los Llanos. Water physico-chemistry of amazonian floodplain rivers.*

Rio	Alt.	Nb.	Temp.	pH	Cond.	Coul.	Turb.	MES	HCO3	Cl	SO4	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO2	MD	%SiO2
Madidi (Cfl. Béni)	180	2	28.5	6.5	115	90	73	118	32.9	1.0	0.0	7.1	1.6	1.4	0.9	0.4	17.3	63	28
Biata (Cfl. Béni)	150	2	28.2	5.4	39	103	35	28	19.5	0.4	0.0	3.2	1.4	0.9	0.8	0.4	12.1	39	31
Béni à Portachuelo	130	66	27.6	7.1	124	127	744	932	44.7	2.3	12.7	10.7	4.3	3.4	1.7	1.1	9.4	90	10
Ivon (Cfl. Béni)	130	4	26.2		11	68	519	771	11.8	0.8	3.1	0.5	0.3	0.2	0.9	0.5	6.8	25	27
Béni à Riberalta	120	18	27.4	7.3	124	74	241	286	48.3	3.6	17.2	12.4	4.4	3.4	1.4	0.5	9.4	101	9
Béni à Cachuela Esperanza	115	92	25.9	6.8	95	131	483	649	38.9	2.6	7.6	7.8	2.5	2.7	1.6	0.7	10.1	75	14
Maije (Cfl. Béni)	200	1	28.6	6.7	143	75	55	144	82.0										
Béni (Cfl. Tarene)	200	1	25.8	6.4	153	125	110	166	69.2										
Tarene (Cfl. Béni)	200	1	25.3		130	165	85	71	82.0										
Enapurera (Cfl. Béni)	200	1	26.5		172	75	40	49	125.5										
Tequeje (Cfl. Béni)	190	1	28.9	5.6	69	170	80	38	53.8										
Undumo (Cfl. Béni)	190	1	27.0	5.7	35	220	90	33	30.7										
Béni (Cfl. Emero)	190	1	21.3	7.3	138	125	100	117	64.0										
Emero (Cfl. Béni)	190	1	25.6	5.6	106	245	145	33	69.2										
Negro (Cfl. Béni)	180	1	28.0	5.7	121	320	110	16	64.0										
Béni (Cfl. Madidi)	180	1	27.7	6.7	151	150	110	267	64.0										
Geneshuaya (Cfl. Béni)	140	1	28.1	5.3	30	125	65	80	25.6										
Madre de Dios à Pto Chive	180	1			92	95	98	197	43.9	0.4	0.0	8.9	2.0	2.0	1.6	0.5	11.0	70	16
Toromona (Cfl. M Dios)	180	2	24.0		41	100	48	82	29.8	1.1	1.0	3.1	0.9	2.3	1.2	0.6	17.0	57	30
Madre de Dios à San Jose	170	1	23.0		48	55	115	99	28.1	0.7	2.3	6.0	1.2	1.9	0.9	0.5	5.4	47	11
Cairo (Cfl. M Dios)	160	1	22.0		11	14	12	15	7.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.7	0.4	0.4	5.3	15	37
Manupari (Cfl. M Dios)	160	2	22.0		12	48	28	33	6.2	1.1	0.0	0.6	0.4	0.5	0.9	0.4	9.6	20	49
Canada (Cfl. M Dios)	150	1	25.0		15	15	33	37	9.2	0.0	0.0	0.6	0.3	1.4	0.5	0.5	6.6	19	35
Genechiquia (Cfl. M Dios)	140	1	22.0		8	17	15	8	4.6	0.4	0.0	0.0	0.2	0.7	0.4	0.6	7.4	14	52
Madre de Dios à Miraflores	130	91	26.7	6.4	88	82	266	317	42.2	3.0	5.8	8.0	1.9	2.9	1.6	0.8	10.8	77	14
Madre de Dios à Pto Maid.	200	1	26.0		99	40	45	56	53.7	2.5	6.1	3.5	1.8	3.2	1.0	0.0	12.2	84	15
Tambopata (Cfl. M Dios)	200	1	26.0		62	55	75	65	30.5	2.3	5.4	1.5	1.3	2.0	0.6	0.1	11.2	55	20
Inambari (Cfl. M Dios)	250	1	24.0		45	50	80	106	24.4	2.8	4.1	1.2	0.8	2.2	1.0	0.0	11.9	48	25
Madre de Dios (Cfl. Inamb.)	250	1	23.0		142	25	55	70	68.3	2.5	9.4	7.1	2.5	3.4	1.7	0.0	16.8	112	15
Tahuamanu à Porvenir	200	3	24.0		124	142	84	122	73.5	2.5	3.1	11.1	2.5	5.0	2.8	1.0	11.6	113	10
Tahuamanu à Puerto Rico	170	2	22.0		104	505	271	283	59.2	1.5	6.0	9.1	2.6	3.3	2.6	1.8	8.3	94	9
Manuripi à Puerto Rico	170	2	22.0		23	73	35	26	15.6	1.3	0.1	1.2	0.5	0.8	1.0	0.7	9.0	30	30
Orthon à Caracoles	120	46	27.5	7.0	54	204	134	132	29.0	2.0	4.8	4.3	1.6	2.5	2.3	2.1	15.7	64	24
Manuripi à San Silvestre	180	1			33	145	50	36	21.8	2.0	18.4	1.9	1.8	1.6	2.0	0.9	7.8	58	13
Buyuyo (Vado)	180	1			76	145	55	75	51.2	2.8	38.8	5.3	1.1	4.1	2.8	4.2	3.9	114	3

Tableau XXXX : Physico-chimie des cours d'eau des Llanos de l'Amazonie bolivienne, 1983-1991.  
B : bassins des rios Grande, Ichilo, Chapare, Secure, Tijamuchi, Apere, Yacuma, Mamoré et Itenez.

Rio	Alt.	Nb.	Temp.	pH	Cond.	Coul.	Turb.	MES	HCO3	Cl	SO4	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO2	MD	%SiO2
Grande à Puente Banegas	250	5	24.5	7.4	515	39	2752	8148	128.7	12.2	141.3	42.4	20.8	32.5	4.6	4.9	8.6	396	2
Paillon à Okinawa	250	1	18.0		150		75	30	64.0	6.7	17.0	9.3	2.7	11.9	21.0	2.0	10.3	145	7
Chane à California	270	1	17.0		170		44	4	87.1	2.8	12.4	11.1	3.0	16.6	9.9	0.5	10.4	154	7
Hondo à Montero	280	3	23.2	8.0	422	35	368	644	203.6	3.4	40.8	32.1	16.1	17.6	10.3	0.2	22.9	347	7
Piray à Puente Eisenhower	280	9	27.1	7.9	312	62	112	649	163.9	2.8	16.1	33.9	7.1	12.7	5.9	1.3	15.9	260	6
Palometillas à Portachuelo	280	3	24.4	7.2	252	63	40	45	155.5	2.3	1.9	38.7	5.5	6.7	3.3	0.4	14.3	229	6
Quimori à Santa Rosa	280	3	21.8	7.5	179	23	51	54	117.9	2.2	1.0	22.9	3.5	7.8	3.0	0.5	21.5	180	12
Palacios à San Juan	290	2	20.6	7.1	54	32	45	32	36.1	1.7	2.2	5.9	1.0	1.5	2.6	1.0	12.9	65	20
Grande (Cfl. Ichilo)	160	5	26.8		341	154	689	828	135.9	9.5	58.5	31.9	13.2	20.6	5.2	1.8	8.1	285	3
Chimore (Cfl. Ichilo)	250	4	24.0		74	35	485	758	16.2	0.1	9.9	6.0	2.3	2.7	0.8	3.5	4.6	46	10
Chore (Cfl. Ichilo)	160	2	24.6		60	0	0	17	24.7	0.2	9.1	4.4	2.0	3.1	1.4	1.5	0.1	47	0
Ichilo à Puerto Villarroel	170	102	25.0	5.8	84	36	148	249	16.4	6.2	15.6	5.7	2.2	4.6	1.6	0.2	10.1	63	16
Ichilo (Cfl. Chapare)	165	2	25.1		76	0	54	80	11.3	3.6	16.6	5.5	2.4	3.1	1.7	1.1	8.6	54	16
Chapare (Cfl. Ichilo)	165	5	25.1		149	58	201	382	60.6	6.0	17.9	13.2	4.3	7.4	3.5	4.7	4.9	123	4
Isiboro (Cfl. Secure)	180	1	27.1		59	16	140	391	25.6	1.4	5.6	5.5	2.0	2.9	0.9	0.5	6.8	51	13
Chimimita (Cfl. Isiboro)	180	1	29.0		62	180	116	37	34.2	0.7	9.9	6.1	2.0	1.8	3.3	0.7	4.2	63	7
Secure (Cfl. Isiboro)	180	2	28.7		105	4	33	56	54.9	9.6	8.7	9.6	2.3	3.2	1.8	0.3	6.4	97	7
Secure (Cfl. Mamoré)	150	8	27.4		82	66	126	216	38.2	8.6	10.9	7.6	2.3	3.3	1.4	0.7	5.8	79	7
Tijamuchi (Puente)	150	2	25.9		30	40	193	16	11.0	1.0	16.2	1.8	1.1	1.9	2.4	1.7	11.2	48	23
Tijamuchi (Cfl. Mamoré)	140	18	28.7	6.5	131	187	133	101	54.1	5.9	13.2	8.9	4.1	9.7	2.5	1.2	7.7	107	7
Apere (Puente)	150	1	22.5		64	35	128	65	41.5	1.8	6.0	6.2	1.8	4.9	2.6	3.2	8.0	76	11
Kuberene (Puente)	150	1	23.0		149	10	130	130	109.8	1.1	1.7	14.8	3.4	10.5	2.7	0.9	11.5	156	7
Musurita (Puente)	150	1	21.0		45	120	85	51	25.6	2.1	5.6	4.5	1.6	2.1	3.5	2.0	12.8	60	21
Moceruna (Puente)	150	1	22.0		43	120	38	11	30.2	2.1	3.1	4.0	1.5	3.1	3.3	1.1	10.8	59	18
Chevejecure (Puente)	150	1	22.0		62	0	29	9	23.6	1.8	2.5	4.5	1.8	2.5	4.1	1.3	8.6	51	17
Matos (Puente)	150	2	22.9		122	80	82	49	73.5	1.1	4.2	11.2	2.1	11.1	2.8	0.6	13.2	120	11
Apere (Cfl. Mamoré)	135	19	27.2	7.2	99	188	110	99	46.8	9.4	9.1	7.2	2.3	7.2	3.1	1.3	8.9	95	9
Maniqui à San Borja	180	2	28.1		103	43	98	114	62.3	2.5	4.6	10.0	2.0	3.1	2.1	0.2	11.3	98	12
Yacuma (Cfl. Mamoré)	130	18	27.1	6.8	70	182	112	135	37.7	2.7	6.4	4.9	1.9	4.1	2.3	1.5	8.6	70	12
Ichilo (Cfl. Grande)	160	2	24.6		95	0	18	56	29.4	3.7	11.6	7.5	3.2	4.0	2.1	3.4	5.3	70	8
Ichilo-Mamoré à Muyurina	160	6	25.3	6.5	165	74	605	615	55.6	8.4	25.3	14.4	6.2	8.1	2.5	1.2	7.4	129	6
Pojige (Cfl. Ichilo-Mamoré)	160	2	25.9		70	125	55	28	37.8	1.2	17.3	6.1	2.3	2.9	1.3	0.5	5.1	75	7
Ichilo-Mamoré (Cfl. Secure)	150	2	26.5		174	195	625	822	55.5	10.3	23.3	11.2	5.0	6.4	3.1	2.2	0.2	117	0
Boibo (Cfl. Ichilo-Mamoré)	150	2	24.9		80	210	250	118	44.4	2.5	4.2	4.8	2.5	6.4	4.7	0.5	8.7	79	11
Mamoré à Pto Ganadero	140	35	26.5	6.8	163	67	343	473	53.4	3.4	14.7	13.2	4.9	5.6	2.1	0.6	9.1	107	9
Ibare à Puerto Almacen	140	27	27.6	6.3	85	171	123	111	33.9	2.8	10.5	5.9	2.8	4.6	3.3	1.6	6.5	72	9
Mamoré à Montevideo	140	70	27.2	6.8	149	104	469	566	51.1	4.3	12.9	11.5	5.2	6.8	2.2	0.5	9.5	104	9
Iruyane (Cfl. Mamoré)	130	2	30.0		134	78	150	376	52.7	2.2	14.1	13.7	7.6	6.5	3.0	0.0	9.1	109	8
Puerto Siles à Puerto Siles	130	2	26.0		121	180	570	695	37.2	2.3	18.6	9.4	4.4	5.0	2.3	1.4	10.2	91	11
Mamoré à Puerto Siles	130	61	27.3	7.2	138	80	226	347	52.6	5.9	15.2	9.8	4.6	6.6	2.4	0.5	8.6	106	8
Mamoré (Cfl. Itenez)	130	3	28.0		83	235	558	175	35.6	1.0	9.3	6.9	3.1	3.9	2.2	1.6	10.3	74	14
Mamoré à Cooperativa	130	69	27.5	7.5	146	109	272	269	54.4	4.3	12.9	10.7	5.0	6.7	2.3	0.5	8.4	105	8
Viejo à Trinidad	150	1	27.0		108	80	45	34	39.0	1.7	7.0	9.0	3.6	4.2	2.9	0.9	25.0	93	27
Mocovi (Puente)	150	7	27.1	5.9	32	380	251	111	13.3	4.4	10.0	0.9	0.8	4.1	1.9	1.6	1.9	39	5
Mocovi à Laguna Cokinoki	150	8	27.5	5.8	47	177	72	25	25.4	3.9	5.6	3.0	1.5	6.8	3.0	1.8	3.9	55	7
Okreni (Cfl. Mamoré)	140	4	28.9	7.1	127	56	140	112	43.2	1.3	15.2	9.5	4.5	4.9	2.9	0.7	8.1	90	9
Okreni à Laguna Okreni	140	1	29.0		90	130	40	29	34.2	0.5	13.2	6.4	2.8	3.2	3.5	1.3	23.8	89	27
Yatachico (Cfl. Mamoré)	130	1	28.0		77	5	10	6	36.6	0.7	4.0	5.3	2.2	3.8	2.1	0.4	10.9	66	17
Mamoré à Guayamerin	120	105	27.7	5.6	90	88	211	258	35.0	2.6	9.0	6.8	2.9	3.9	2.0	0.5	9.7	72	13
Yata (Puente)	130	6	28.3	4.4	27	63	50	56	18.0	6.4	2.3	0.9	1.1	2.1	3.9	0.9	6.6	42	16
San Nicolas à Fortaleza	150	1	26.5		62	165	50	27	25.6	3.2	4.3	5.5	2.0	1.6	5.0	1.3	15.9	64	25
Machupo (Cfl. Itonamas)	130	1	25.4		43	160	65	0	28.2										
Itonamas (Cfl. Machupo)	130	1	25.6		48	160	60	12	30.7										
CV			0.1	0.1	0.9	0.8	2.2	3.4	0.8	1.0	2.0	1.2	1.4	1.3	1.3	1.1	0.4	0.9	0.7

## 6. Les matières dissoutes.

Dans les bassins des rios Béni, Madre de Dios et Orthon, les affluents de la plaine, qui drainent exclusivement les dépôts sédimentaires quaternaires, ont des salinités très faibles, comprises entre 15 et 50 mg.l<sup>-1</sup>, les faciès hydrochimiques sont mal définis (bicarbonaté calcique-sodique-magnésien), et la silice peut représenter 30% des matières dissoutes. Les fleuves qui ont une origine andine sont légèrement plus minéralisés (de 50 à 100 mg.l<sup>-1</sup>), alors que les cours d'eau qui drainent les séries sédimentaires tertiaires (rios Tahuamanu, Boyuyo) présentent les plus fortes teneurs (de 100 à 120 mg.l<sup>-1</sup>).

Dans le bassin du Rio Mamoré, le Rio Grande marque fortement le système avec des eaux encore chargées (300 mg.l<sup>-1</sup>) à la confluence avec le Rio Ichilo. Les teneurs les plus faibles (<50 mg.l<sup>-1</sup>) sont observées sur quelques affluents de plaine du Rio Ichilo (rios Chimoré, Choré) situés à proximité du piedmont andin, ou dans la région de Trinidad (Rio Mocovi). Les affluents de rive gauche du Rio Mamoré dans les Llanos présentent des concentrations comprises entre 50 et 150 mg.l<sup>-1</sup>, pour un faciès hydrochimique presque exclusivement bicarbonaté calcique. Ces teneurs, qui sont plus élevées que celles observées sur les affluents du Rio Béni, concernent également les fleuves qui n'ont pas d'origine andine (rios Iruyane, Tijamuchi,...). Cette différence peut être due à l'existence de série sédimentaires tertiaires non cartées, qui entraînent généralement une augmentation de la salinité. Mais il est possible que les phénomènes d'évaporation intervenant sur les zones d'inondations qui sont dans ce bassin très étendues, entraînent également une augmentation de la minéralisation. Le Rio Yata, qui draine exclusivement les Llanos, présente une minéralisation de 50 mg.l<sup>-1</sup> et un faciès bicarbonaté potassique.

Les coefficients de variation (CV) pour chacun des éléments montrent que la variabilité régionale des teneurs est plus faible dans les Llanos que dans les Andes, surtout pour Cl, Mg, Na et Fe. L'essentiel de cette variabilité est d'ailleurs causée par le Rio Grande.

### VI.A.2.d. Dans le bouclier brésilien.

Une douzaine de cours d'eau de la plaine, issus du bouclier brésilien, ont été échantillonnés. Ce petit nombre de prélèvements s'explique par les difficultés d'accès et l'éloignement de La Paz, ainsi que l'insécurité qui règne dans certaines régions frontalières avec le Brésil.

Tableau XXXXI : Physico-chimie des cours d'eau du bouclier brésilien en Amazonie bolivienne, 1983-1991.  
Bassins des rios Mamoré et Itenez.

[Alt.= altitude de la station (m), Nb.= nombre d'échantillons prélevés à la station, Temp.= température (°C), Cond.= conductivité électrique à 25°C (μS.cm<sup>-1</sup>), Coul.= couleur (unité Pt/Co), Turb.= turbidité (F.T.U.), MES= matières en suspension (mg.l<sup>-1</sup>), MD= matières dissoutes (mg.l<sup>-1</sup>), %SiO<sub>2</sub>= poids de la silice dans les matières dissoutes (%), teneurs élémentaires en mg.l<sup>-1</sup>].  
*Físico-química de los rios del escudo brasilero. Water physico-chemistry of the Brazilian shield rivers.*

Rio	Alt.	Nb.	Temp.	pH	Cond	Coul	Turb	MES	HCO3	Cl	SO4	Ca	Mg	Na	K	Fe	SiO2	MD	%SiO2
Negro (Cfl. Mamoré)	130	2	31.0		41	40	21	12	257	0.2	0.6	3.2	1.4	1.4	1.4	0.7	14.5	49	30
Ouro Preto (Cfl. Mamoré)	120	2	29.5		42	65	38	25	19.6	0.8	13.4	2.8	1.4	1.5	1.4	0.4	5.4	47	12
San Julian à Santa Tereza	250	1	23.0		263	40	39	24	158.8	10.6	5.6	20.8	6.6	17.2	16.4	0.0	35.5	272	13
Quizer (Cfl. San Pablo)	280	1	21.0		193	10	8	20	128.1	1.4	2.4	9.6	6.6	14.3	4.0	0.3	28.8	196	15
Limonas (Cfl. San Pablo)	280	1	20.0		173	0	20	48	115.3	1.8	3.2	8.0	5.9	14.5	3.4	0.6	25.3	178	14
El Ciervo à El Puente	240	1	24.0		74	15	47	54	46.1	0.7	1.8	3.9	1.6	10.0	3.4	1.7	44.2	113	39
Zapoco à San Roman	250	1	23.0		73	40	45	58	41.0	2.1	3.6	3.7	1.9	9.2	3.0	1.6	15.9	82	19
San Pablo à Santa Maria	200	1	25.5		258	0	14	40	149.9	6.0	9.0	18.4	7.7	20.0	7.7	0.4	22.7	242	9
Itenez à Vuelta Grande	125	57	27.7		38	48	28	35	21.5	1.5	2.2	2.4	1.2	2.5	2.1	0.5	12.7	47	27
Itenez à Campamento More	125	78	27.5	6.7	43	55	33	26	25.2	3.0	3.3	2.7	1.1	2.5	2.0	0.4	8.7	49	18
Blanco (Cfl. Guaporé)	130	1	26.1		29	90	40	5	23.1										
Guaporé (Cfl. Blanco)	130	1	25.5		21	70	30	17	17.9										
CV			0.1		0.9	0.7	0.4	0.6	0.9	1.1	0.9	0.9	0.8	0.8	1.0	0.8	0.6	0.7	0.5

Les résultats obtenus (Tableau XXXXI) permettent de distinguer deux types de cours d'eau. Les affluents de rive droite du Rio Mamoré (rios Negro et Ouro Preto) ainsi que le Rio Guaporé-Itenez, présentent des teneurs faibles (<50 mg.l<sup>-1</sup>), et de type bicarbonaté calcique. Ces cours d'eau

drainent essentiellement les séries précambriennes plutoniques acides du socle (Pareja & al., 1978). Un deuxième groupe est composé de rivières nettement plus minéralisées (de 80 à 300 mg.l<sup>-1</sup>), généralement de type bicarbonaté sodique. Ces cours d'eau qui drainent la bordure méridionale du socle, sont issus des séries du complexe métamorphique précambrien. Les coefficients de variation obtenus (CV) indiquent une variabilité régionale des teneurs assez faible, malgré un échantillonnage réduit.

### VI.A.3. Les éléments traces en solution.

La détermination des teneurs en éléments traces de la phase dissoute a été effectuée sur une trentaine d'échantillons dont un tiers provient du bassin andin de l'Alto-Béni, et les deux tiers restant concernent les Llanos (Tableau XXXXII). Pour un certain nombre d'éléments, aucun échantillon n'a présenté des teneurs supérieures aux limites de détection (Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, Hg, Mo, Pb, Sb, Se, Sn, V, W), et pour d'autres cette limite a été légèrement dépassée pour l'échantillon du Rio Grande à Abapo (Be, Li, Ti, U).

Tableau XXXXII : Eléments traces en solution des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, 1989-1990. Bassins des rios Béni et Mamoré. [Nb.= nombre d'échantillons prélevés, MD= matières dissoutes en mg.l<sup>-1</sup>, teneurs élémentaires en µg.l<sup>-1</sup>]. *Elementos menores en solución de los rios de la cuenca amazónica de Bolivia. Dissolved trace elements of the bolivian Amazon drainage basin rivers.*

Rio	Nb.	MD	Fe	Mn	Zn	Ni	Cu	Sr
Tipuani à Guanay	1	24	727	99	227	6	3	
Challana à Guanay	1	24	527	115	60	5	4	
Coroico à Teoponte	1	54	216	4	119	5	8	
Kaka (Cfl. Alto-Béni)	1	49	927	88	258	3	4	
La Paz (Cfl. Tamampaya)	1	149	553	53	339	6	6	
Tamampaya (Cfl. La Paz)	1	55	735	29	199	4	5	
Boopi (Cfl. Cotacajes)	1	104	1030	69	431	7	5	
Cotacajes (Cfl. Boopi)	1	121	382	23	124	3	3	
Alto-Béni (Cfl. Kaka)	1	110	639	28	135	4	6	
Béni à Angosto del Bala	1	81	580	20	61	12	5	64
Béni à Portachuelo	1	82	703	48	79	9	8	39
Ivon (Cfl. Béni)	1	44	1040	21	95	1	3	
Madre de Dios à Miraflores	1	75	1160	39	104	1	9	72
Buyuyo (Vado)	1	114	1590	44	168	5	10	
Tahuamanu à Porvenir	1	157	1340	67	173	4	8	
Béni à Cachuela Esperanza	1	65	1470	33	69	2	8	61
Grande à Abapo	1	353	918	45	144	5	12	227
Grande (Cfl. Ichilo)	1	311	844	21	100	4	10	
Ichilo à Puerto Villarroel	1	56	771	223	546	10	8	46
Chaparé (Cfl. Ichilo)	1	164	891	43	74	4	5	
Mamoré à Muyurina	1	177	1500	48	649	6	18	
Pojige (Cfl. Mamoré)	1	96	2750	48	156	4	6	
Sécuré (Cfl. Mamoré)	1	96	1550	25	81	3	4	
Mamoré à Montevideo	1	145	1950	56	191	4	9	74
Tijamuchi (Cfl. Mamoré)	1	89	2100	61	254	2	6	
Apéré (Cfl. Mamoré)	1	87	2010	50	136	4	4	
Yacuma (Cfl. Mamoré)	1	100	2510	62	482	3	6	
Mamoré à Cooperativa	1	104	2090	58	168	5	12	56
Itenez à Campamento Moré	1	37	1250	48	216	8	7	22
Ouro Preto (Cfl. Mamoré)	1	69	643	19	68	2	4	
Mamoré à Guayaramerin	1	86	2320	44	310	14	11	44
Yata (puente)	1	59	1450	60	269	3	7	
CV		0.7	0.5	0.7	0.7	0.6	0.5	0.8
Moyenne mondiale (*)			40	8	30	2	10	60

(\*) d'après Martin & Meybeck, 1979.

### VI.A.3.a. Dans les Andes.

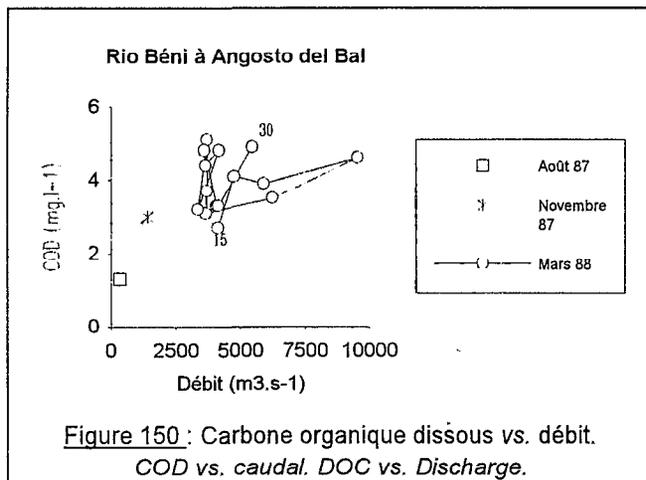
Les échantillons andins correspondent à quelques tributaires du bassin du Rio Béni, drainés par les rios Kaka et Alto-Béni. Les teneurs sont généralement plus faibles que dans les Llanos, même si elles sont largement supérieures à la moyenne mondiale. L'influence de la pollution anthropique, liée à de fortes concentrations urbaines (Rio La Paz-Boopi), ou à l'activité minière (Rio Tipuani-Kaka) est sensible pour certains éléments (Mn, Ni, Zn). Le Rio Grande s'individualise pour des teneurs plus fortes en Cu et Sr.

### VI.A.3.b. Dans les Llanos.

Dans les Llanos, les teneurs en Fe sont nettement plus élevées que dans les Andes, notamment pour les affluents de rive gauche du Rio Mamoré, et dans une moindre mesure dans les bassins des rios Orthon et Madre de Dios. La station de Puerto Villarroel sur le Rio Ichilo indique des valeurs fortes pour Mn, Ni et Zn, qui sont peut être liées à une contamination locale. Le Cu marque fortement les échantillons du Rio Grande, et cette influence est visible sur tout le cours du Rio Mamoré, jusqu'à Guayaramerin.

## VI.B. LE CARBONE ORGANIQUE DISSOUS (COD).

Le carbone organique dissous et particulaire a fait l'objet d'une étude portant sur 52 cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, dont 41 dans les Andes. Aux stations du PHICAB dans les Llanos, les échantillons ont été prélevés de 2 à 4 fois suivant les stations (Tableau XXXIII), à différentes époques hydrologiques : en basses eaux (Juillet-Août 87), en montée de crue (Novembre 87 et Décembre 88), et en hautes eaux (Mars 88). Dans les Andes, les principaux cours d'eau ont été échantillonnés une seule fois, en Mars, Avril ou Juin 1988.



Les teneurs moyennes en carbone organique dissous (COD) varient régionalement de 1.2 à 3.5 mg.l<sup>-1</sup> dans les Andes, et de 4.2 à 7.4 mg.l<sup>-1</sup> dans les Llanos. Le carbone organique dissous a été mesuré à pas de temps journalier lors d'un épisode de crue de fréquence annuelle, à la station de Angosto del Bala sur le Rio Béni. Au cours de cette crue, les teneurs en COD ont varié de 2.7 à 5.1 mg.l<sup>-1</sup>, sans relation directe avec le débit (Figure 150) ou les matières dissoutes. En utilisant l'ensemble des données de la station, la tendance généralement observée d'augmentation des teneurs en COD avec le débit, est retrouvée (Spitzky & Leenheer, 1991; Meybeck, in press).

Mais, comme cela a déjà été observé en Amérique du Sud tropicale (Richey et al., 1980; Furch et Junk, 1985; Lewis et al., 1986; Richey et al., 1990), et dans le bassin de la Gambie (Lesack et al., 1984), la variation saisonnière du carbone organique dans un cours d'eau reste limitée.

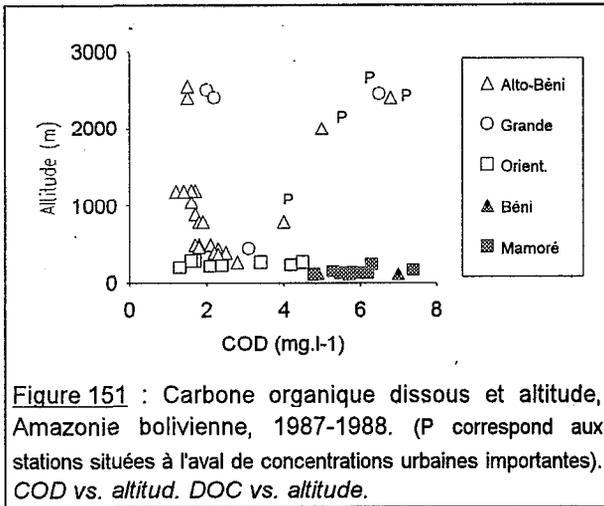
La distribution régionale des teneurs en COD en fonction de l'altitude (Figure 151) permet de séparer le domaine andin (zones A, B, et C correspondant aux bassins de l'Alto-Béni, du Grande, et orientaux), des Llanos (zones D et E : bassins du Béni et du Mamoré). Les valeurs observées sont comparables à celles mesurées en Amazonie brésilienne (Richey et al., 1980, 1990, 1991, Furch et Junk, 1985), et sur le bassin de l'Orénoque (Lewis et Weibezahn, 1981; Nemeth et al., 1982; Lewis et al., 1986; Depetris et Paolini, 1991; Paolini, 1992). La région du Chaparé (zone C) correspond à une zone de transition entre le domaine andin et les Llanos, avec des teneurs variant de 1.3 à 4.2 mg.l<sup>-1</sup> (Figure 152). La station de Puerto Villarroel sur le Rio Ichilo, située à une trentaine de kilomètres à l'aval du piedmont andin, présente la concentration en COD maximum de 7.4 mg.l<sup>-1</sup>, ce qui laisse à penser que la transition entre domaine andin et Llanos est très rapide.

**Tableau XXXXIII** : Carbone organique dissous en Amazonie bolivienne, (valeurs moyennes), caractéristiques des cours d'eau échantillonnés (Alt.=altitude du point d'eau, Sup.=superficie du bassin versant, qs=débit spécifique, Forêt=pourcentage du bassin versant possédant une couverture forestière {d'après la carte de végétation de Bolivie}, les valeurs entre [-] correspondent à la seule partie bolivienne du bassin, Nb. éch.=nombre d'échantillons).

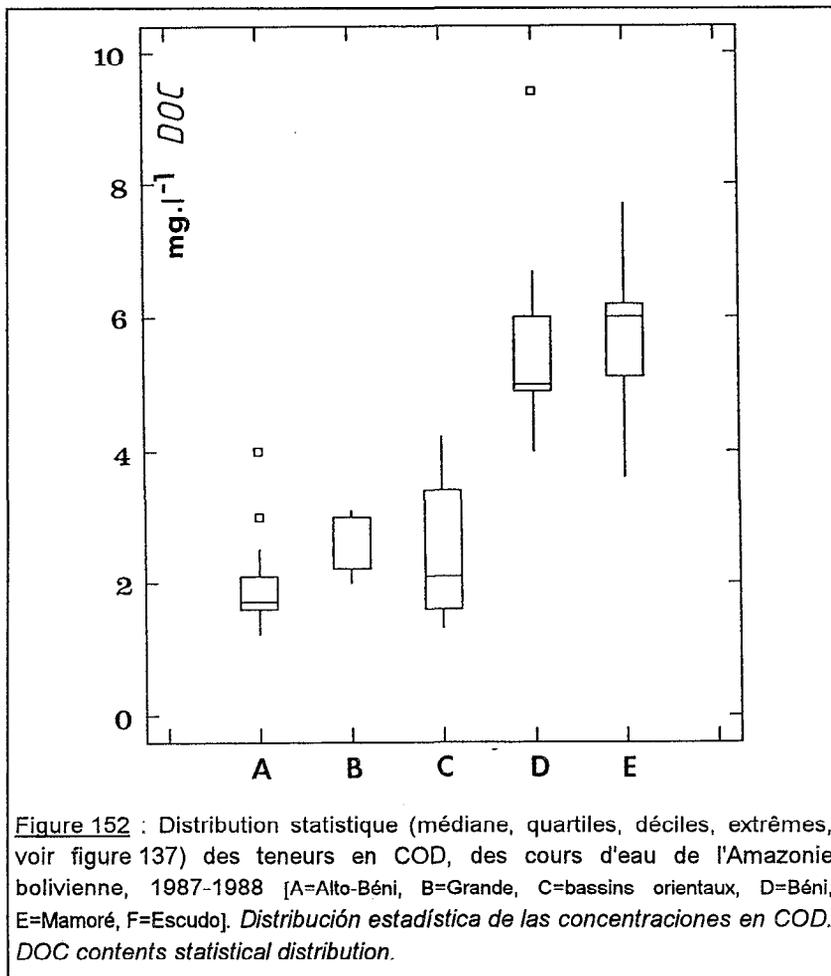
*COD en la cuenca amazónica de Bolivia. DOC in the bolivian Amazon drainage basin.*

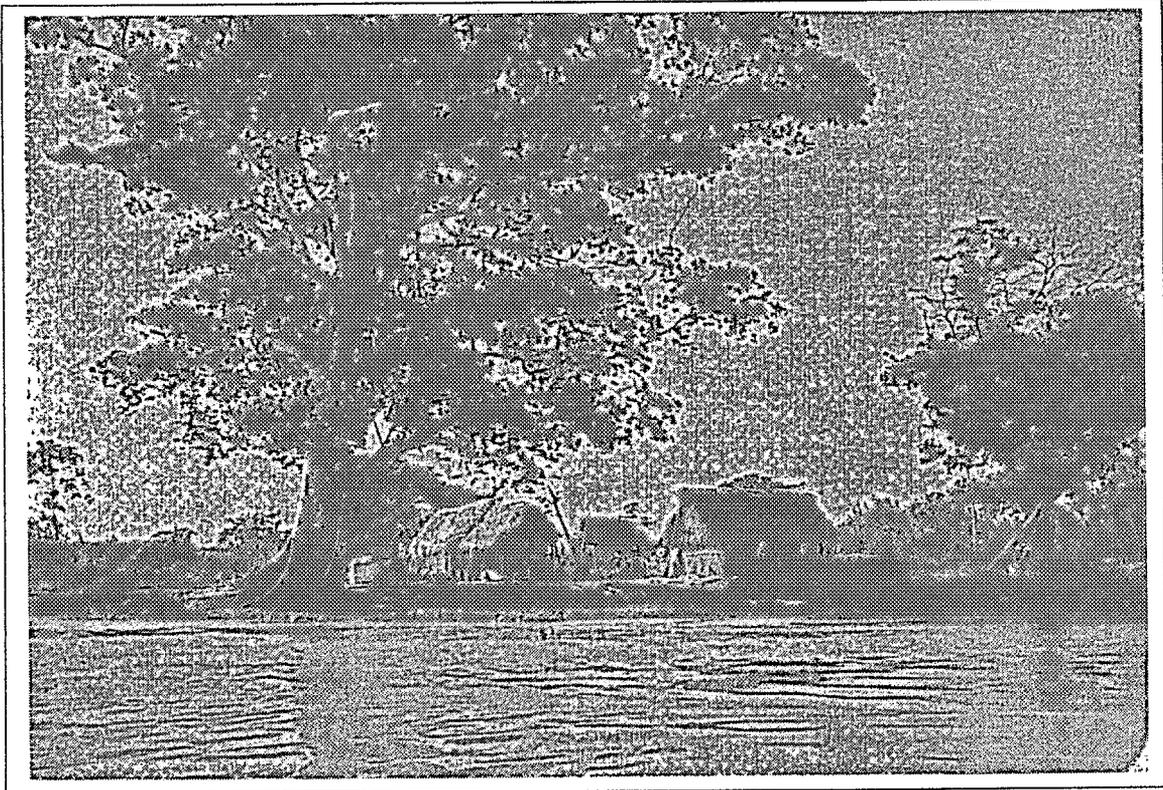
Zone	Code	Rio	Alt. (m)	Sup. (km <sup>2</sup> )	qs (l.s <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup> )	Forêt (%)	Nb. éch.	MD (mg.l <sup>-1</sup> )	COD (mg.l <sup>-1</sup> )
A	SOR	San Cristobal à Sorata	2400	110	.16	0	1	58	1.5
	CON	Consata à Consata	900	2400	16	0	1	241	1.7
	MAP	Mapiri à Guanay	500	10100	18	47	2	93	1.8
	TIP	Tipuani à Guanay	500	1400	26	34	2	49	1.7
	CHA	Challana à Guanay	500	1900	55	66	1	32	1.8
	ZON	Zongo à Islani	1200	330	50	15	1	32	1.7
	YOL	San Juan à Yolosa	1200	100	50	4	1	42	1.6
	COR	Coroico à Santa Barbara	800	610	43	34	1	46	1.8
	TEO	Coroico à Teoponte	500	5400	33	77	2	43	1.7
	KAK	Kaka à Teoponte	480	18800	26	57	2	61	1.8
	UND	Unduavi à Puente Villa	1190	360	19	0	1	59	1.2
	TAQ	Taquesi à Puente Villa	1190	590	19	0	1	42	1.4
	TAM	Tamampaya à Villa Barrientos	1050	1900	19	15	1	108	1.6
	LPZ	La Paz à Tahuapalca	2400	930	11	0	1	1370	6.8
	TIR	La Paz à Tirata	2000	1100	11	0	1		5.0
	LUR	Luribay à Luribay	2550	810	11	0	1	374	1.5
	PLA	La Paz à La Plazuela	800	5200	11	0	1	649	4.0
	MIG	Miguillas à La Plazuela	800	1000	11	0	1	83	1.9
	ENC	La Paz à El Encuentro	500	7400	11	2	1	236	2.1
ASU	Boopi à La Asunta	450	10900	13	11	1	121	2.3	
BOO	Boopi à San Miguel Huachi	400	12500	15	22	1	148	2.5	
COT	Cotacajes à San Miguel Huachi	400	16000	20	46	1	168	2.2	
ALB	Alto-Béni à Sapecho	380	29100	21	37	2	180	2.3	
AB	Béni à Angosto del Bala	280	67500	30	58	17	87	2.8	
B	ROC	Rocha à Parotani	2450	3600	5	1	1	232	6.5
	TAP	Tapacari à Parotani	2500	940	5	0	1	391	2.0
	ARQ	Arque à Capinota	2400	2300	5	0	1	274	2.2
	AP	Grande à Abapo	450	59800	5	18	3	375	3.1
C	ESP	Esperitu Santos à Villa Tunari	300	2700	70	76	1	117	1.7
	MAT	San Mateo à Villa Tunari	300	2400	70	77	1	135	1.6
	CHI	Chimoré (puente)	210	1900	70	100	1	43	1.3
	SAJ	Sajta (puente)	220	2100	70	97	1	47	2.1
	IOA	Ichoa (puente)	230	670	70	100	1	52	2.4
	ICH	Ichilo (puente)	240	2100	70	100	1	77	4.2
	YAP	Yapacani à Yapacani	280	6900	13	77	1	315	3.4
	PIR	Piray à puente Eisenhower	280	4100	13	63	1	153	4.5
D	PC	Béni à Portachuelo	130	119000	24	62	3	97	4.8
	MF	Madre de Dios à Miraflores	130	124200	41	[89]	3	68	4.9
	RIB	Béni à Riberalta	125	243000	34	[68]	1		4.8
	CA	Orthon à Caracoles	125	32300	14	[100]	3	81	7.0
	CE	Béni à Cachuela Esperanza	120	282500	32	[72]	3	84	5.7
E	BAN	Grande à Puerto Banegas	250	67000	8	27	1	414	6.3
	PV	Ichilo à Puerto Villaruel	170	7600	78	99	2	60	7.4
	MU	Mamoré à Muyurina	160	124000	30	49	2	120	5.3
	SEC	Securé (confluence Mamoré)	150	17000	30	77	1	85	5.8
	PG	Mamoré à Puerto Ganadero	140	144000	22	53	1	128	6.0
	MO	Mamoré à Montevideo	140	159100	20	52	3	113	6.1
	TIJ	Tijamuchi (confluence Mamoré)	140	7600	30	15	1	123	5.5
	APE	Aperé (confluence Mamoré)	135	17000	30	60	1	199	6.2
	PS	Mamoré à Puerto Siles	130	216200	25	48	4	118	5.5
	VG	Itenez à Vuelta Grande	130	354300	6	[74]	2	53	5.9
	GM	Mamoré à Guayaramerin	120	599400	14	[62]	3	101	4.8

6. Les matières dissoutes.



Les stations situées à l'aval des grandes villes du pays (La Paz, Cochabamba et Santa Cruz) échappent à ce schéma, et les teneurs en COD apparaissent anormalement élevées. Au confluent avec le Rio Tamampaya, 150 km à l'aval de la capitale, les teneurs en COD du Rio La Paz sont comparables à celles des cours d'eau voisins non pollués, du fait de phénomènes de dilution et auto purification (Guyot et al., 1989).



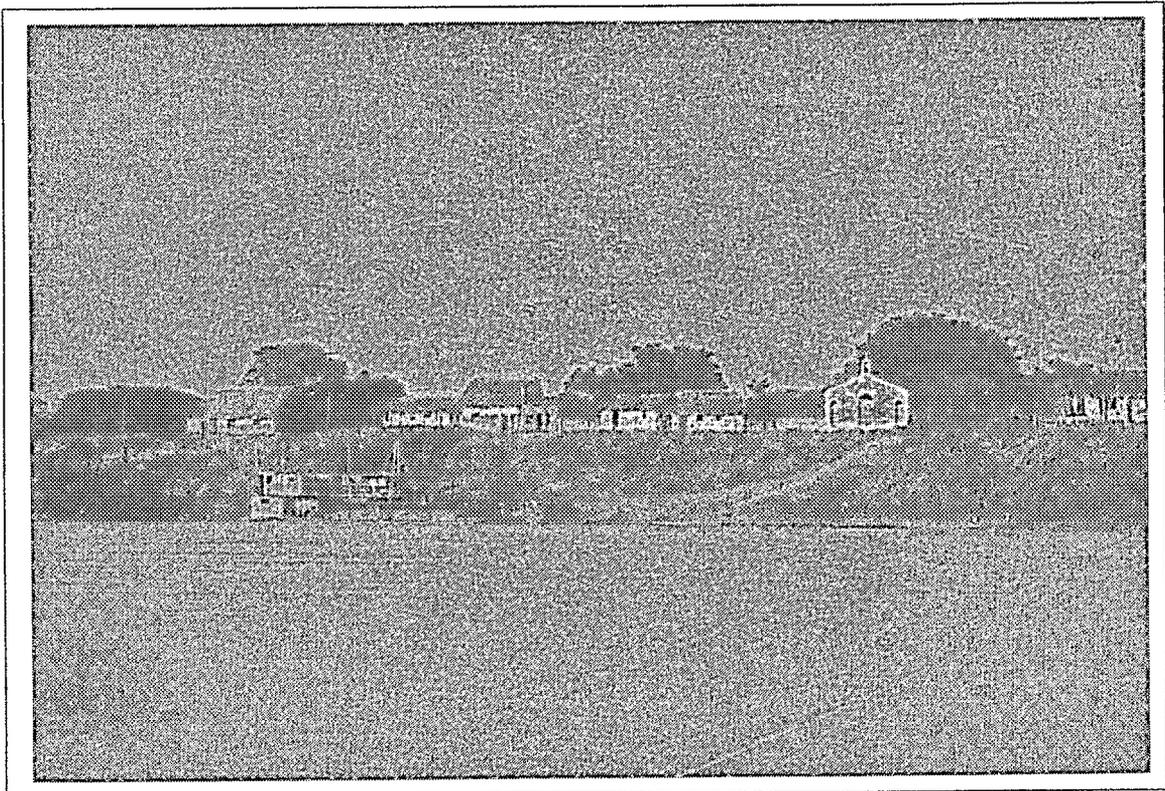


↑ Photo 45 : Le Rio Mamoré à Puerto Varador (140 m), en hautes eaux.

*El Río Mamoré en Puerto Varador en época de aguas altas. The Mamore river at Puerto Varador, high water*

↓ Photo 46 . Le Rio Mamoré à Puerto Siles (130 m), en basses eaux.

*El Río Mamoré en Puerto Siles en época de aguas bajas. The Mamore river at Puerto Siles, low water*



**VI.C. LE REGIME.****VI.C.1. Le régime global des matières dissoutes.****VI.C.1.a. Dans les Andes.**

L'étude du régime des matières dissoutes dans les Andes de Bolivie a été abordée pour la première fois par M.A. Roche (Roche et al., 1986; Roche et Fernandez, 1988), qui, avec l'appui du SENAMHI, a organisé un échantillonnage journalier sur quelques cours d'eau andins du bassin de l'Alto-Béni (Tableau XXXIV). A ces mesures, se sont ajoutées celles concernant une étude sur la typologie des cours d'eaux de la région de La Paz (Wasson et Marin, 1988), et celles obtenues dans le bassin du Rio Achumani, à La Paz (Bourges et Guyot, 1989).

Tableau XXXIV : Les matières dissoutes dans les bassins andins de l'Amazonie bolivienne.

(Alt.= altitude de la station, Sup.= superficie du bassin versant, Pér.= période d'observation, Org.= organisme gestionnaire, Nb. éch.= nombre d'échantillons pour détermination des matières dissoutes (MD), et pour la mesure de la conductivité (Cond.), QD= flux moyen annuel de matières dissoutes, CV= coefficient de variation des flux moyens mensuels au cours de l'année, JFM= poids des mois de Janvier-Février-Mars sur le volume annuel exporté).

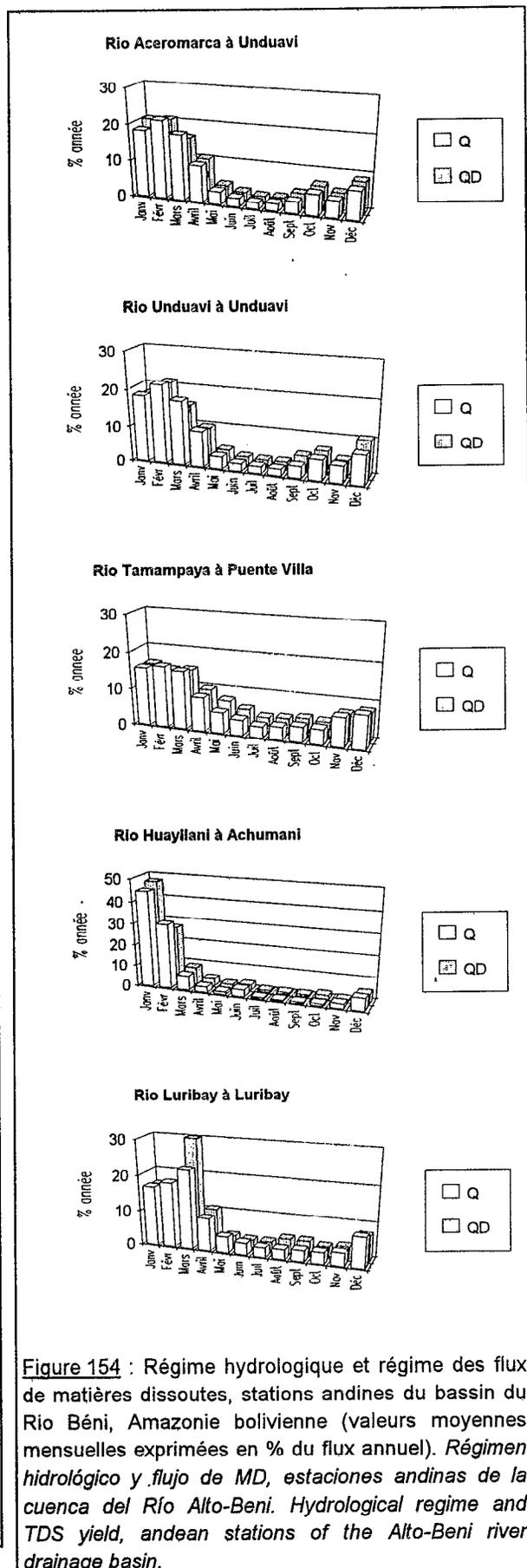
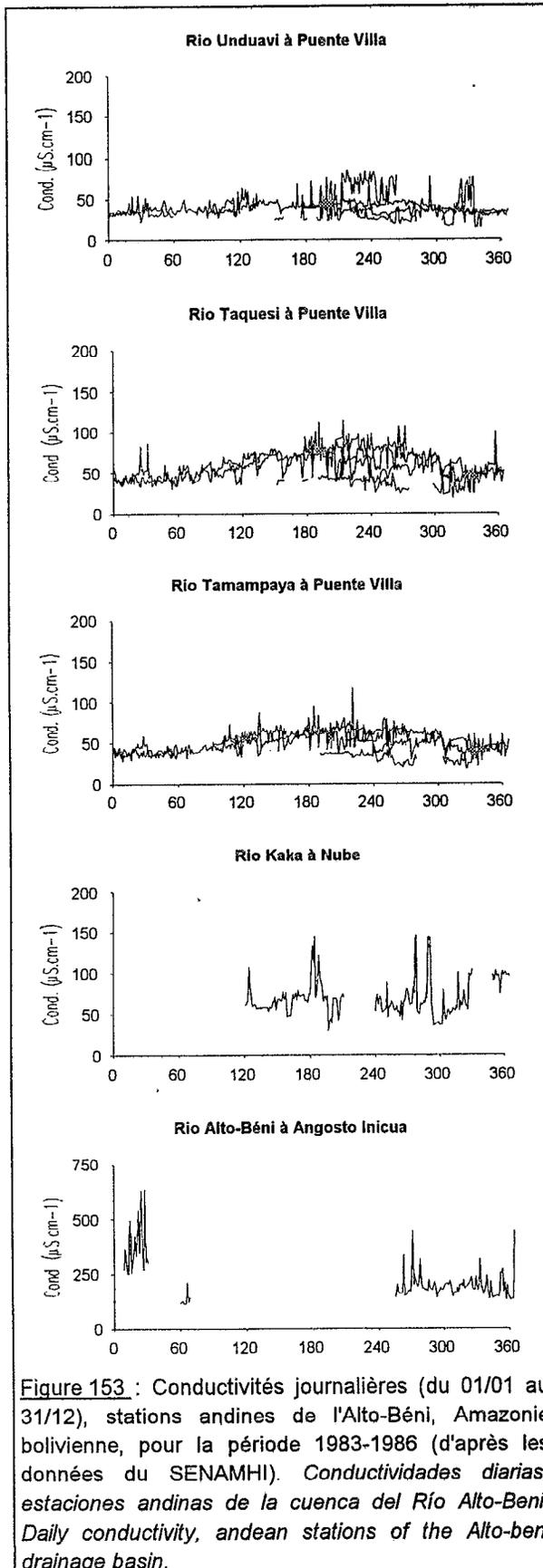
*Las materias en solución en las cuencas andinas. TDS in andean drainage basins.*

Rio	Alt. m	Sup. km <sup>2</sup>	Pér.	Org.	Références	Débit m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Nb. MD	éch. Cond	MD mg.l <sup>-1</sup>	QD 10 <sup>3</sup> t.an <sup>-1</sup>	CV	JFM (%)
Aceromarca à Unduavi	2960	61	87-88	Orstom	Guyot & Wasson	2,8	36	0	37	3.4	0,8	57
Unduavi à Unduavi	2940	66	87-88	Orstom	Guyot & Wasson	3,0	38	0	34	3,1	0,8	54
Unduavi à Puente Villa	1190	360	83-86	Senamhi	Roche & al., 1986		15	933	40			
Taquesi à Puente Villa	1190	590	83-86	Senamhi	Roche & al., 1986		15	1016	46			
Tamampaya à Puente Villa	1185	950	83-86	Senamhi	Roche & al., 1986	52	8	986	44	64	0,5	45
Huayllani à Achumani	3620	17	89-91	Phicab	Bourges & Guyot	0,1	9	807	150	0,3	1,7	82
Quellumani à Achumani	3580	20	89-91	Phicab	Bourges & Guyot	0,1	5	395	200	0,4	1,3	68
Luribay à Luribay	2550	810	87-88	Ortsom	Guyot & Wasson	10	39	0	890	290	1,0	59
Porvenir à Porvenir	2500	240	87-88	Ortsom	Guyot & Wasson	3	36	0	480	40	0,9	55

Les flux de matières dissoutes observés sur ces cours d'eau andins présentent des variations saisonnières équivalentes à celles des débits (Tableau X), et nettement plus faibles que celles des flux de matières en suspension (Tableau XXVIII). Le poids des trois mois de hautes eaux (Janvier-Février-Mars : JFM) est inférieur à 60%, sauf pour les rios Huayllani et Quellumani, du bassin du Rio Achumani, où ce pourcentage peut dépasser 80%.

Les matières en solution transportées par les rivières andines présentent une évolution saisonnière des teneurs (Figure 153) généralement inverse à celle des débits, bien que localement certaines exceptions apparaissent (Roche et al., 1986). Les courbes obtenues indiquent de nombreuses variations brutales, en dent de scie, correspondant aux averses pluvieuses dans le cas du bassin du Rio Tamampaya, ou à l'apport de sous-bassins aux caractéristiques contrastées pour les rios Kaka et Alto-Béni. Une légère tendance à l'augmentation des teneurs apparaît en basses eaux sur les tributaires du Rio Tamampaya. Du fait de la faible variabilité saisonnière des matières en solution, le régime des flux de matières dissoute est pratiquement identique à celui du débit liquide (Figure 154). Certaines différences sont toutefois remarquées, comme sur le Rio Luribay où les teneurs augmentent en crue, phénomène particulier observé dans les Andes de Bolivie (Roche et al., 1986; Guyot et al., 1990).

L'évolution saisonnière des matières dissoutes est généralement inversement proportionnelle au débit (Meybeck, 1970, 1984, 1985; Grove, 1972; Carbonnel et Meybeck, 1975; Roche, 1975, 1980; Bakalowicz, 1979; Gac, 1980; Guyot, 1983; Probst, 1983; Walling et Webb, 1983; Mudry, 1987). Ce schéma est observé pour le Rio Tamampaya (Figure 155), avec une augmentation sensible des teneurs en basses eaux, alors que celles-ci restent à peu près constantes et faibles en hautes eaux. Par contre, sur les rios Kaka et Alto-Béni qui drainent des bassins plus étendus, cette relation conductivité-débit est plus complexe, probablement en raison de la forte hétérogénéité des bassins versants. Certains points traduisent une tendance à l'augmentation des teneurs en matières dissoutes avec le débit.



6. Les matières dissoutes.

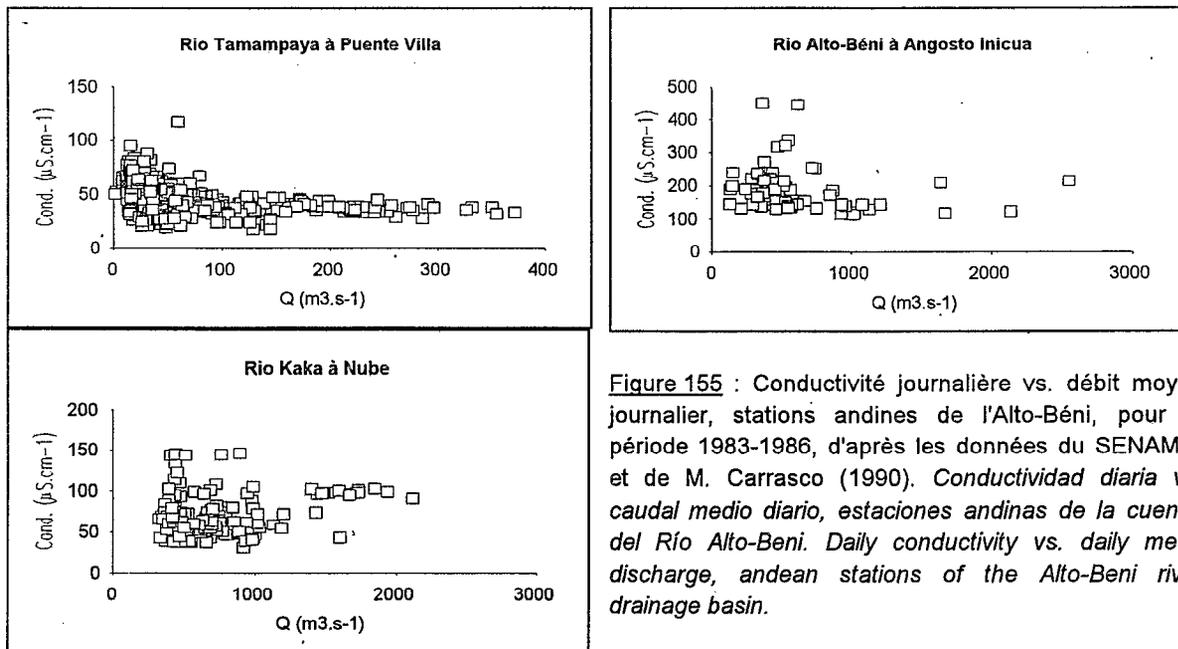


Figure 155 : Conductivité journalière vs. débit moyen journalier, stations andines de l'Alto-Béni, pour la période 1983-1986, d'après les données du SENAMHI et de M. Carrasco (1990). *Conductividad diaria vs. caudal medio diario, estaciones andinas de la cuenca del Río Alto-Beni. Daily conductivity vs. daily mean discharge, andean stations of the Alto-Beni river drainage basin.*

VI.C.1.b. Dans les Llanos.

Dans les Llanos, les matières dissoutes ont été suivies en continu aux stations du réseau PHICAB, où de 1000 à 2000 prélèvements journaliers ont été réalisés par station (Tableau XXXXV).

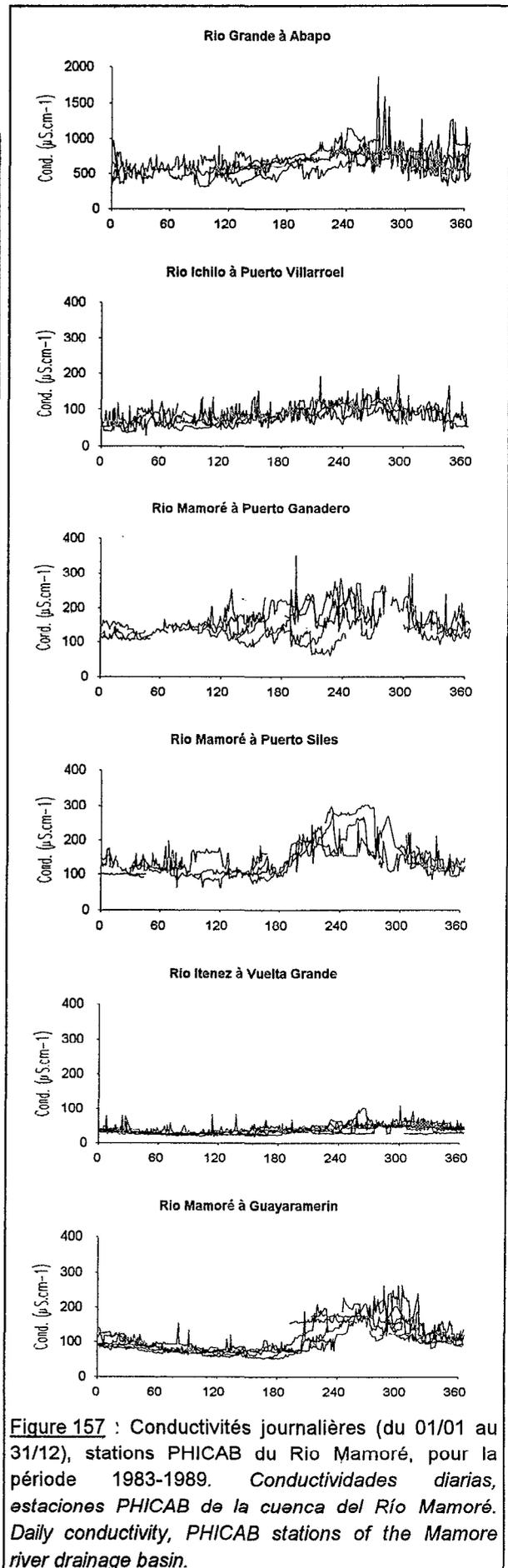
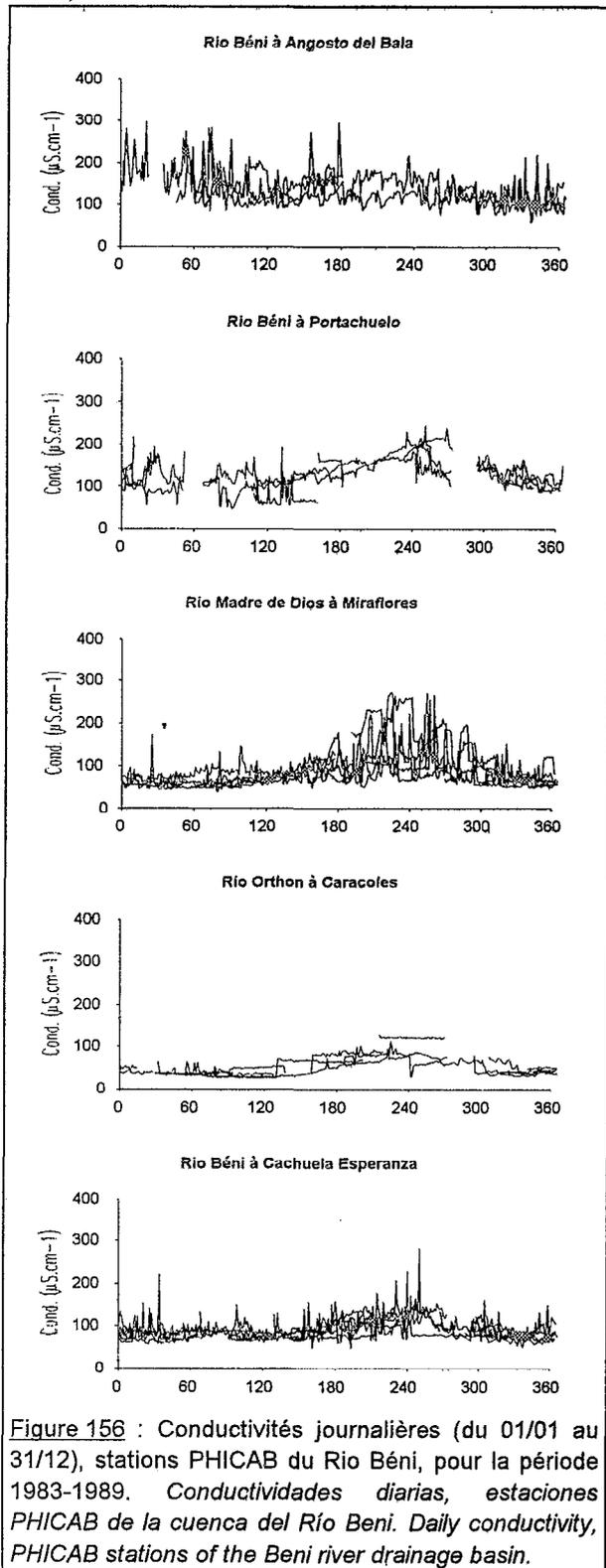
Tableau XXXXV : Les matières dissoutes aux stations du réseau PHICAB en Amazonie bolivienne.

(Alt.= altitude de la station, Sup.= superficie du bassin versant, Pér.= période d'observation, Org.= organisme gestionnaire, Nb. éch.= nombre d'échantillons pour détermination des matières dissoutes (MD), et pour la mesure de la conductivité (Cond.), QD= flux moyen annuel de matières dissoutes, CV= coefficient de variation des flux moyens mensuels au cours de l'année, JFM= poids des mois de Janvier-Février-Mars sur le volume annuel exporté).

*Materias disueltas en las estaciones de la red PHICAB. TDS in the PHICAB network stations.*

Rio	Alt. m	Sup. km <sup>2</sup>	Pér.	Org.	Références	Débit m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Nb. éch. MD Cond	MD mg.l <sup>-1</sup>	QD 10 <sup>6</sup> .tan <sup>-1</sup>	CV	JFM %
Béni à Angosto del Bala	280	67500	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	2050	79 1026	80	5.2	0.8	55
Béni à Portachuelo	130	119000	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	2870	66 913	92	7.8	0.5	44
Madre de Dios à Miraflores	130	124200	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	5090	91 1848	78	11	0.4	38
Orthon à Caracoles	125	32300	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	460	46 1061	65	0.9	0.4	30
Béni à Cachuela Esperanza	120	282500	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	8920	92 1831	76	21	0.6	45
Grande à Abapo	450	59800	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	300	72 1448	390	3.2	0.8	48
Ichilo à Puerto Villaruel	170	7600	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	590	102 1208	56	1.0	0.4	37
Mamoré à Puerto Ganadero	140	159100	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	3150	105 1055	102	9.1	0.6	41
Mamoré à Puerto Siles	130	216200	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	5350	130 1139	106	15	0.5	38
Itenez à Vuelta Grande	130	354300	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	2260	135 2047	46	2.8	0.6	35
Mamoré à Guayaramerin	120	599400	83-89	Phicab	Guyot & al., 1989	8340	105 1925	80	19	0.5	35
Madeira à Villabella	115	903500	83-89			17600		78	40	0.5	40

La variation saisonnière de ces flux est du même ordre que dans les Andes, avec des coefficients de variation (CV) compris entre 0.4 et 0.8. Cette variabilité est équivalente à celle des débits (Tableau X), et le CV est sensiblement deux fois plus faible que pour les flux de matières en suspension (Tableau XXIX). Les trois mois de hautes eaux andines (de Janvier à Mars) sont responsables de 30 à 55% de l'exportation annuelle de matières dissoute, avec les valeurs les plus fortes pour les stations du piedmont andin.



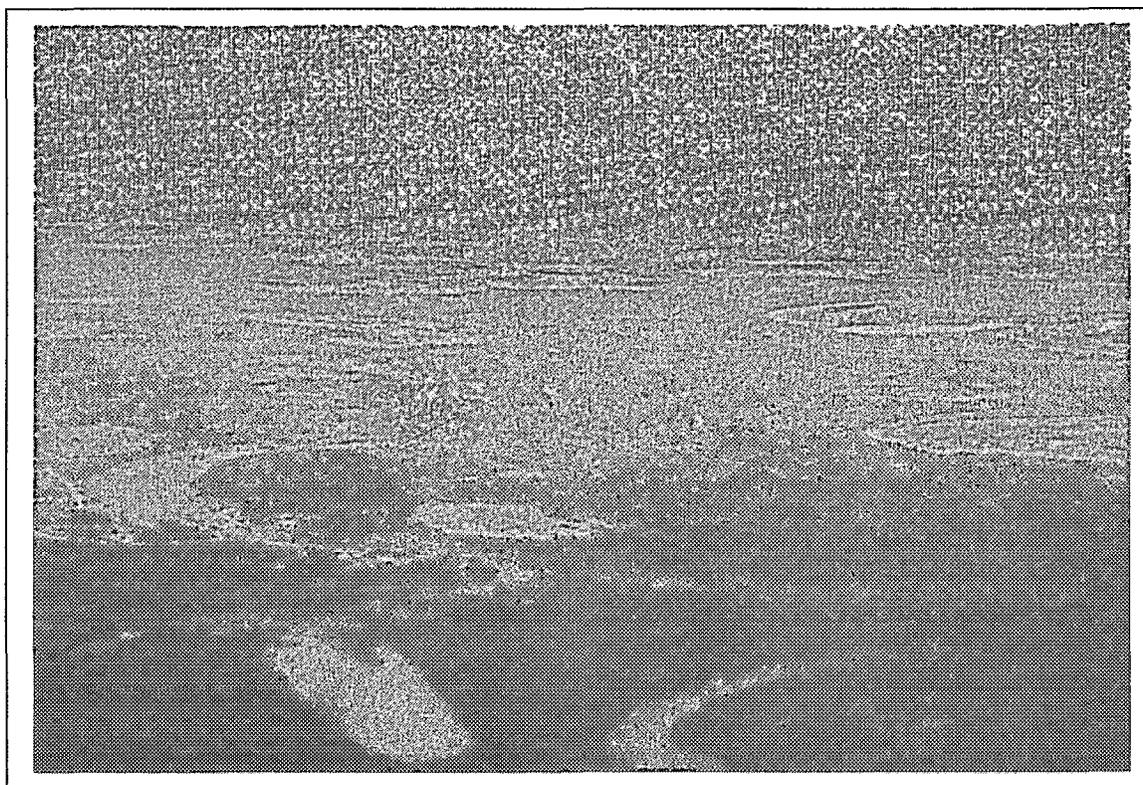
## 6. Les matières dissoutes.

L'évolution saisonnière des conductivités aux stations du réseau PHICAB (Figures 156 & 157) montre une variabilité temporelle des teneurs marquée, mais avec une amplitude plus faible que celle observée pour les turbidités (Figures 114 & 115).

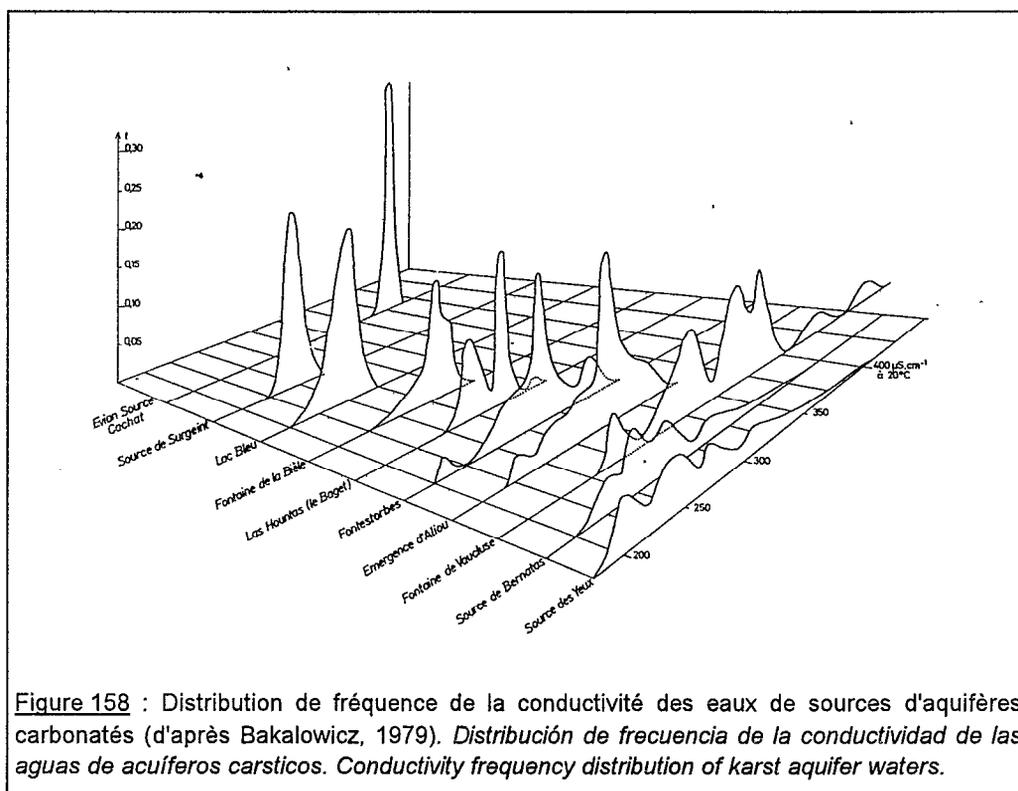
Dans le bassin du Rio Béni (Figure 156), la station du piedmont andin (Angosto del Bala) présente des évolutions rapides des concentrations, en dents de scie, et ce tout au long de l'année, sans qu'il soit possible de détecter une tendance saisonnière marquée. Les maximums de concentration en matières dissoutes apparaissent lors des périodes de hautes eaux, de décembre à mars. Plus à l'aval, à Portachuelo, l'amplitude des variations diminue et le régime saisonnier avec l'alternance de hautes et basses eaux s'installe, comme cela a déjà été remarqué pour les débits. Cette tendance est nettement visible sur le Rio Madre de Dios à Miraflores, où les lacunes d'échantillonnage sont beaucoup moins nombreuses. Le Rio Caracoles, fleuve de la plaine amazonienne, possède des concentrations plus faibles, et la variation des teneurs est moins brutale. Les plus fortes salinités sont rencontrées en période d'étiage. A Cachuela Esperanza, l'évolution temporelle des matières dissoutes du Rio Béni est donc la combinaison d'un régime andin et d'un régime de plaine, où des variations fortes et rapides de la salinité se surimposent sur un régime annuel d'alternance entre hautes et basses eaux.

A Abapo sur le Rio Grande (Figure 157), le style andin à forte variabilité est retrouvé, mais avec des maximums de concentration observé en fin d'étiage, lors des premières crues. Le régime saisonnier annuel est nettement perceptible. Sur le Rio Ichilo, comme pour les débits, les variations sont d'une amplitude plus faible, et s'observent tout au long de l'année. A l'aval, sur le Rio Mamoré, les fortes variations de la salinité influencées par les apports du Rio Grande, se surimposent à un régime saisonnier annuel qui devient de plus en plus marqué d'amont en aval. Cette particularité est la conséquence du régime hydrologique observé dans cette région, influencé par les zones d'inondation. Le Rio Itenez, comme le Rio Orthon, présente des teneurs stables et faibles. A Guayaramerin, le Rio Mamoré présente un régime intermédiaire avec des pics de concentration intervenant surtout en fin d'étiage, et une fluctuation annuelle des teneurs liée à l'alternance des hautes et basses eaux.

↓ Photo 47 : Les lagunes de la région de Trinidad (140 m).  
*Las lagunas de la región de Trinidad. The Trinidad area lakes.*



Les distributions de fréquence des conductivités (Figure 158) peuvent être de bons indicateurs du fonctionnement hydrogéochimique d'aquifères karstiques (Bakalowicz, 1979, Bakalowicz et Mangin, 1980). L'utilisation de cette méthode sur des sources karstiques et des cours d'eau du Sud de la France a permis de mieux connaître le fonctionnement hydrodynamique des bassins étudiés (Fabre et Guyot, 1984; Guyot, 1983, 1986)

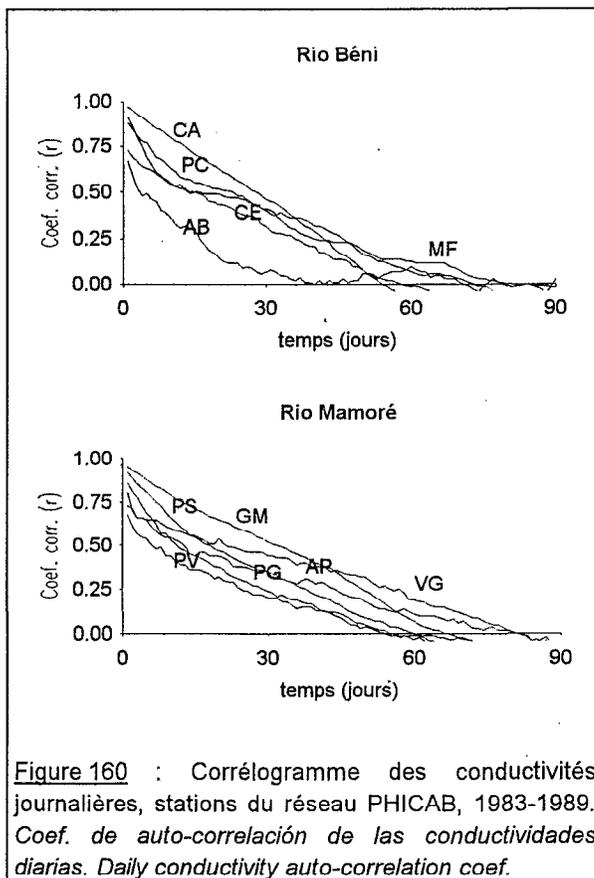
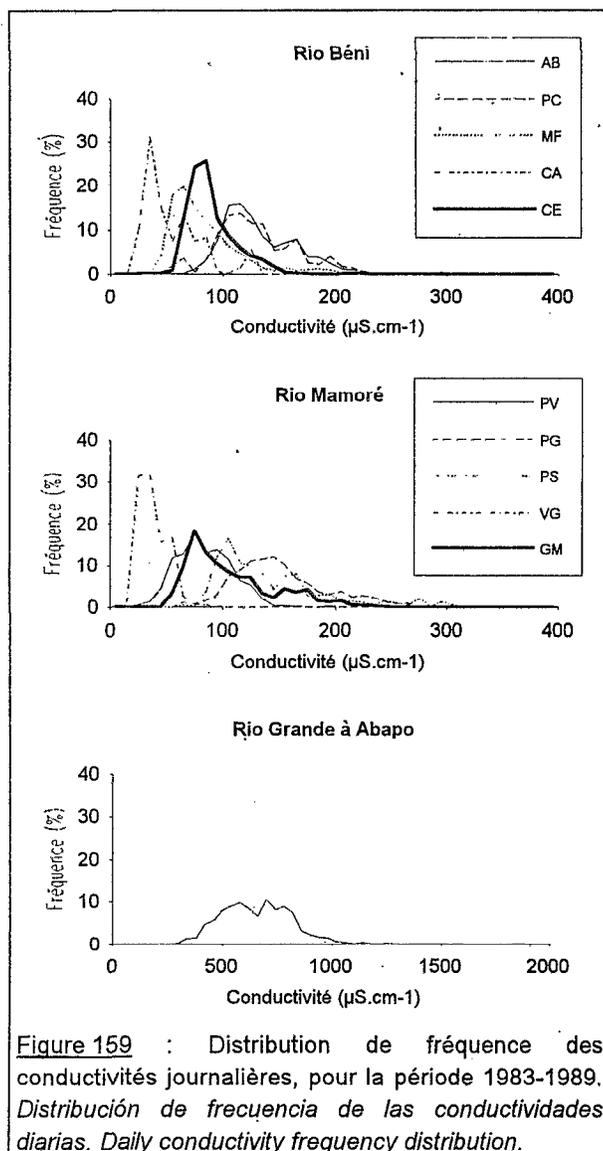


En Amazonie bolivienne, l'emploi des distributions de fréquence des conductivités (Figure 159) permet d'individualiser nettement les cours d'eau andins ou d'origine andine, de ceux issus des Llanos ou du bouclier brésilien.

Dans le bassin du Rio Béni, les distributions obtenues à Angosto del Bala et Portachuelo sont identiques, étalées et plurimodales, traduisant l'existence de plusieurs familles hydrochimiques différentes dans le bassin versant. Ce type de distribution est également observé sur le Rio Orthon, mais avec des teneurs plus faibles. Le Rio Madre de Dios et le Rio Béni à Cachuela Esperanza présentent des courbes similaires, unimodales à dissymétrie positive, qui sont la résultante des apports de la plaine (Rio Orthon) et andins (Rio Béni). Ce résultat pourrait faire penser, à tort, que les bassins de ces fleuves sont homogènes.

Le Rio Grande à Abapo présente une distribution unimodale, mais très étalée et concernant de fortes concentrations. Pour le Rio Ichilo à Puerto Villarroel, la distribution des conductivités est également unimodale. Les formateurs andins du Rio Mamoré ont donc des bassins plus homogènes que dans le cas du Rio Béni, mais les différences s'observent à l'aval, dans les Llanos, entre les divers tributaires.

A Puerto Ganadero, le Rio Mamoré présente une distribution unimodale comparable à ses deux principaux formateurs, mais avec des teneurs intermédiaires. A Puerto Siles, la distribution s'étale, et devient nettement plurimodale, avec l'apparition d'un premier mode pour des teneurs plus faibles, correspondant aux apports de la plaine qui sont moins minéralisés. Le Rio Itenez, issus des Llanos et du bouclier, montre des conductivités faibles, avec une distribution unimodale peu étalée. En conséquence, la tendance observée à Puerto Siles, s'accroît à Guayaramerin, avec un étalement plus grand de la gamme de variation des conductivités, et le déplacement vers les faibles teneurs du premier mode.



L'utilisation de l'analyse corrélatrice (Mangin, 1981, 1984) sur les valeurs de la conductivité journalière (Figure 160 et tableau XXXVI), confirment les observations formulées pour le Rio Pilcomayo.

Les coefficients d'auto-corrélation obtenus avec les conductivités sont nettement inférieurs, quand ils sont significatifs, à ceux des débits moyens journaliers (Tableau XI), et légèrement supérieurs ou équivalent à ceux des turbidités (Tableau XXX). Il en est de même pour la valeur du seuil de validité de ces coefficients (dts), qui varie de 20 jours pour la station de piedmont andin la plus variable (AB) à un peu moins de 50 jours les fleuves de plaine.

Parmi les stations andines, celles d'Angosto del Bala est la seule à présenter une décroissance rapide du coefficient d'auto-corrélation, traduisant une plus grande hétérogénéité temporelle des teneurs à cette station.

Au vu de ces résultats, l'évaluation précise des flux globaux de matières dissoutes dans les fleuves de l'Amazonie bolivienne, passe par un échantillonnage bimensuel (tous les 15 jours) à décadaire pour la plupart des stations. Dans le cas du Rio Béni au piedmont andin (Angosto del Bala), la fréquence des prélèvements devra être pour le moins hebdomadaire.

La comparaison du régime moyen mensuel des matières dissoutes exportées (QD) avec le régime hydrologique (Q) aux mêmes stations (Figures 161 et 162) montre la forte liaison entre ces deux variables. Du fait de la variation réduite des concentrations en matières en solution au cours du cycle hydrologique, c'est le débit qui est essentiellement responsable de l'évolution saisonnière des flux de matières dissoutes transportées.

Tableau XXXXVI : Coefficient de corrélation des conductivités journalières, aux stations du réseau PHICAB, pour la période 1983-1989, pour différents pas de temps. dts=seuil de validité au delà duquel le coefficient n'est pas significativement différent de zéro. (Voir Tableau VII pour le code des stations).

Coef. de auto-correlación de las conductividades diarias. Daily conductivity auto-correlation coef.

Code Station	dt=1j.	dt=3j.	dt=5j.	dt=10j.	dt=15j.	dt=30j.	dt=60j.	dt=90j.	dts (jours)
AB	0.67	0.52	0.49	0.36	0.31	0.06	0.10	0.03	19
PC	0.88	0.81	0.77	0.63	0.55	0.41	0.07	-0.14	40
MF	0.91	0.80	0.69	0.54	0.50	0.41	0.13	-0.02	47
CA	0.97	0.93	0.89	0.80	0.71	0.48	-0.09	-0.32	36
CE	0.73	0.67	0.63	0.55	0.50	0.33	-0.01	-0.13	40
AP	0.80	0.66	0.65	0.55	0.44	0.36	0.11	-0.08	45
PV	0.68	0.57	0.54	0.44	0.36	0.22	-0.03	-0.08	32
PG	0.86	0.78	0.69	0.53	0.44	0.25	-0.01	-0.08	29
PS	0.92	0.86	0.81	0.66	0.55	0.36	0.00	-0.20	34
VG	0.73	0.66	0.65	0.60	0.56	0.46	0.19	-0.08	43
GM	0.95	0.92	0.88	0.79	0.71	0.54	0.07	-0.22	47

Aux stations du piedmont andin, le flux de matières dissoutes est proportionnellement plus important que le débit en fin d'étiage, lors des premières crues (Décembre à Abapo et Puerto Villarroel, Janvier à Angosto del Bala). Ce phénomène traduit une augmentation des teneurs en matières en solution, correspondant à la chasse par l'onde de crue des eaux stagnantes du bassin, ou au lessivage des dépôts évaporitiques du lit des cours d'eau andins. Dans les Llanos, le régime des flux de matières en solution est plus régulier que le régime hydrologique, avec des valeurs proportionnellement plus faibles et plus fortes, respectivement en hautes et basses eaux.

A Villabella, le Rio Madeira présente un régime de matières en solution qui est la somme des flux mesurés sur les rios Béni et Mamoré (Figure 163). La contribution relative de chacun des deux tributaires est comparable à celle des débits, avec 53% des matières dissoutes provenant du Rio Béni, et 47% du Rio Mamoré. Ces résultats sont très proches de l'estimation des apports salins au Rio Madeira, avec des valeurs respectives de 54 et 46% (Roche et al., 1986). La teneur moyenne en matières dissoutes du Rio Madeira à Villabella est estimée à environ 75 mg.l<sup>-1</sup>, à partir des flux respectifs des rios Béni et Mamoré.

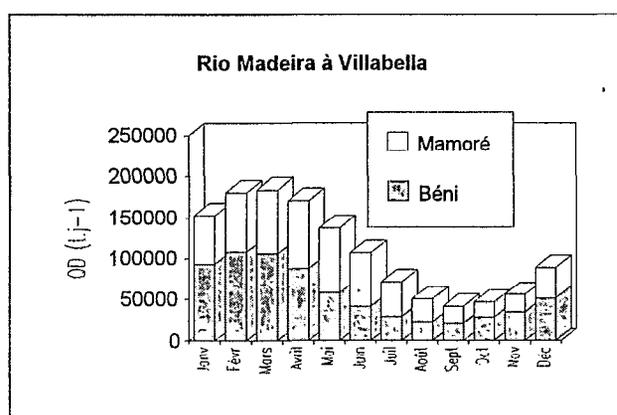


Figure 163 : Flux moyen mensuel de matières dissoutes du Rio Madeira à Villabella, pour la période 1983-1989. Flujo medio mensual de MD. Monthly mean TDS yield.

La relation liant la conductivité (ou les matières dissoutes) au débit a été établie pour chacune des stations du réseau PHICAB dans les Llanos (Figures 164 et 165). A Angosto del Bala sur le Rio Béni, aucune tendance générale ne peut être dégagée, des teneurs élevées pouvant survenir en étiage comme en crue. Pour les autres stations, l'augmentation du débit se traduit généralement par une légère diminution de la minéralisation des eaux. A Portachuelo sur le Rio Béni, cette tendance est compliquée par une remontée de la salinité vers les forts débits. Ce phénomène est encore perceptible à Cachuela Esperanza. Sur l'ensemble du bassin du Rio Mamoré, les distributions sont comparables, avec une légère chute de la salinité quand les débits augmentent. Sur le Rio Itenez, les teneurs sont pratiquement constantes.

6. Les matières dissoutes.

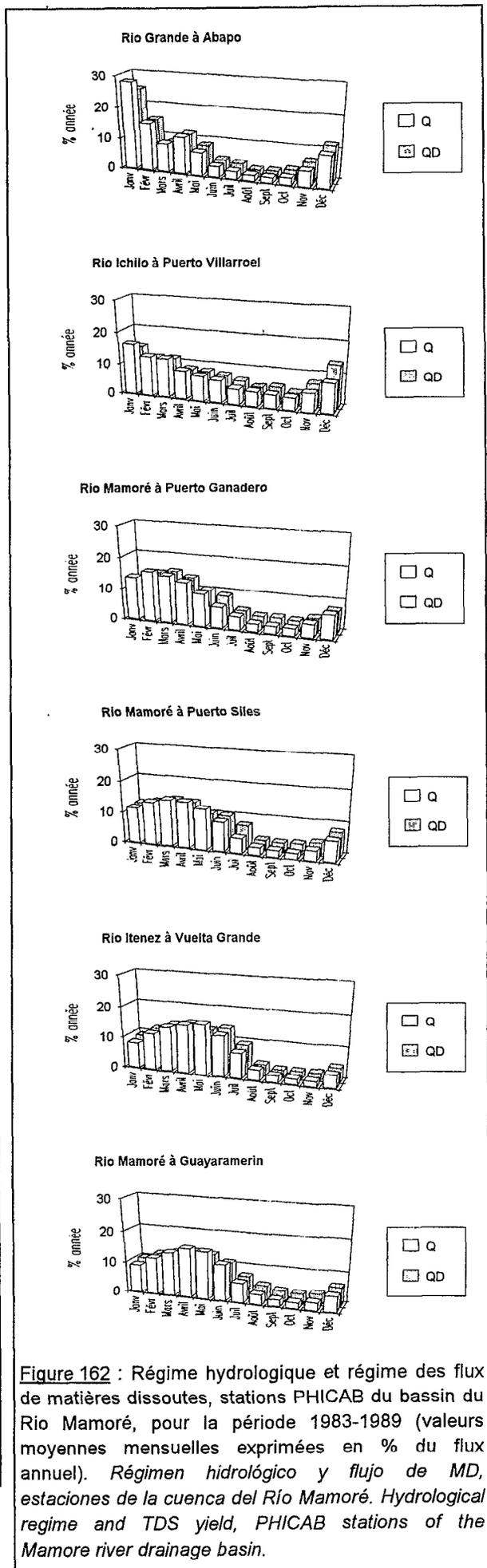
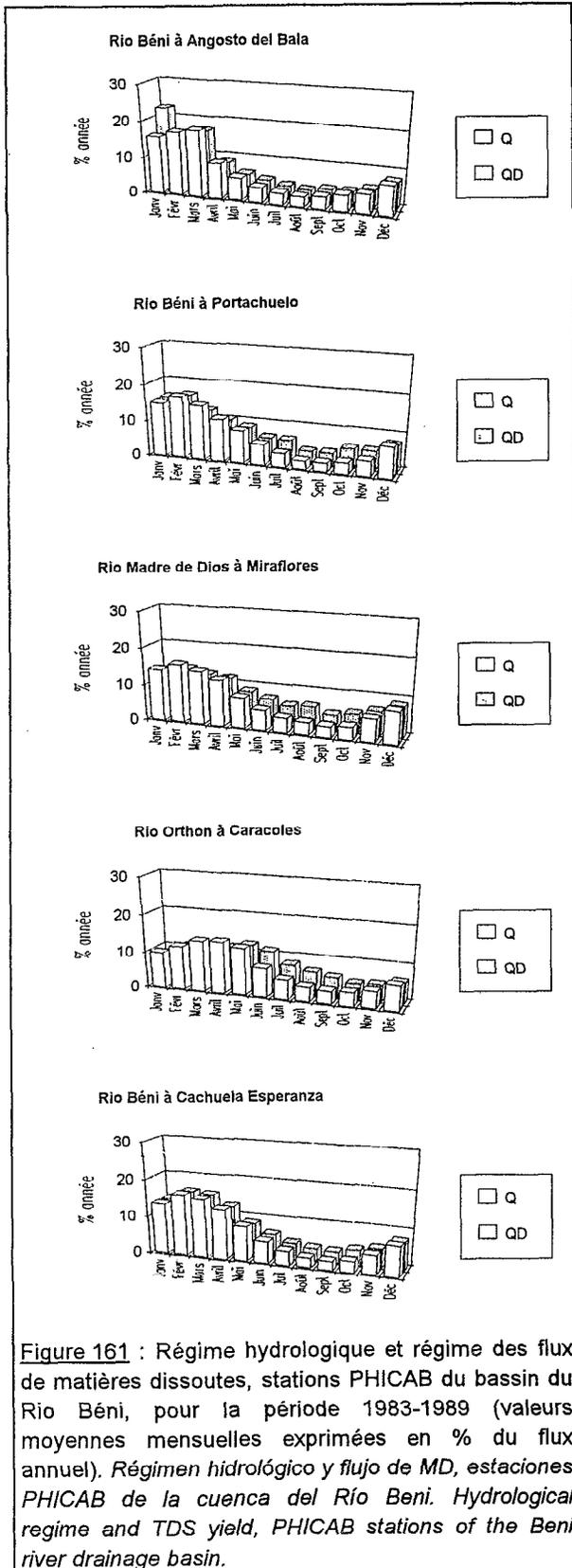




Photo 48 & 49 : Confluence du Rio Mamoré (eaux blanches) et du Rio Guaporé-Itenez (eaux noires),  
à la frontière boliviano-brésilienne (125 m).

*Confluencia del Río Mamoré (aguas blancas) y del Río Guapore-Itenez (aguas negras).*  
*Confluence of the Mamore river (white waters) and the Guapore-Itenez river (black waters).*



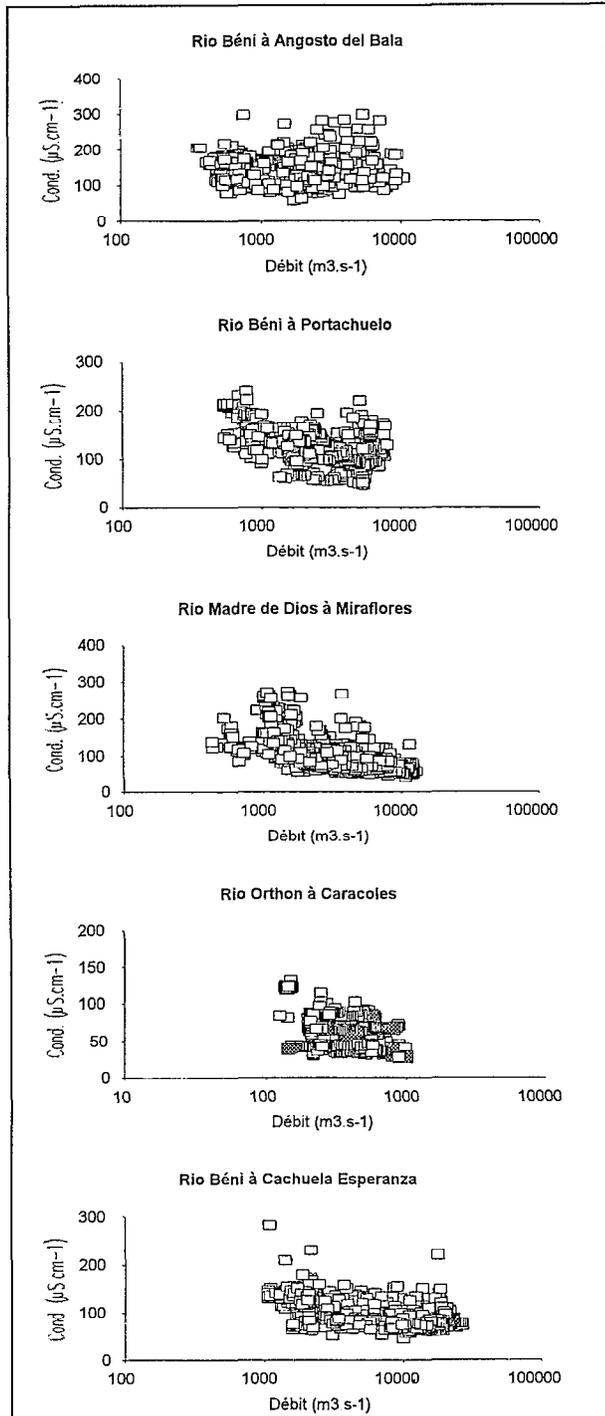


Figure 164 : Conductivité journalière vs. débit moyen journalier, stations PHICAB du bassin du Rio Béni, pour la période 1983-1989. *Conductividad diaria vs. caudal medio diario, estaciones PHICAB de la cuenca del Río Beni. Daily conductivity vs. daily mean discharge, PHICAB stations of the Beni river drainage basin.*

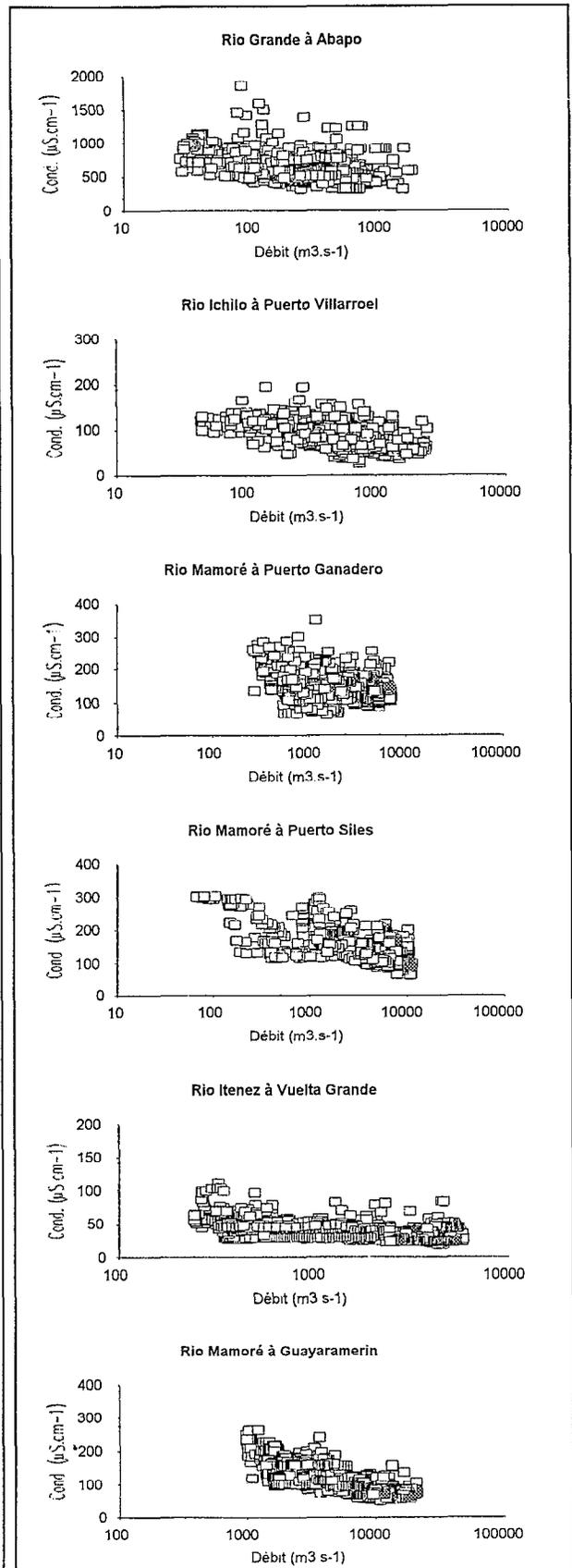
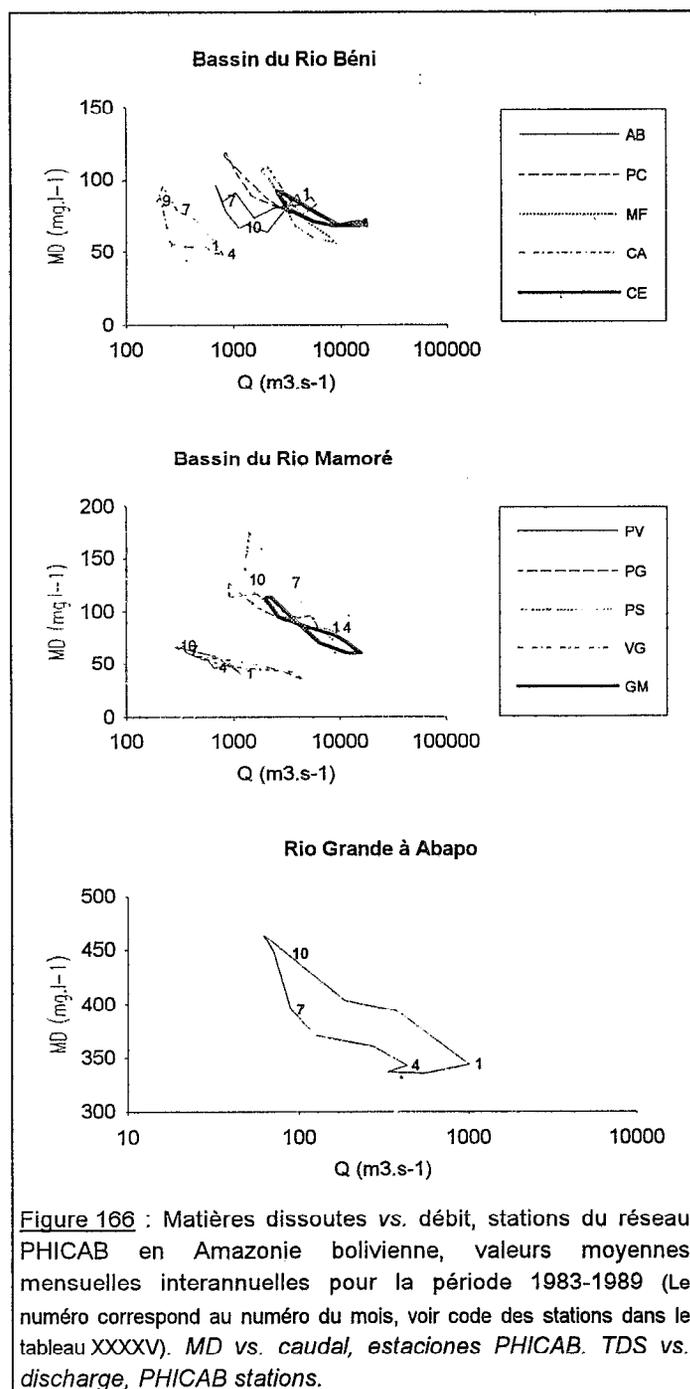


Figure 165 : Conductivité journalière vs. débit moyen journalier, stations PHICAB du bassin du Rio Mamoré, pour la période 1983-1989. *Conductividad diaria vs. caudal medio diario, estaciones PHICAB de la cuenca del Río Mamoré. Daily conductivity vs. daily mean discharge, PHICAB stations of the Mamore river drainage basin.*



En utilisant les valeurs moyennes mensuelles interannuelles (1983-1989) du débit et des matières dissoutes, une courbe enveloppe moyenne peut être définie pour chaque station (Figure 166). Dans le bassin du Rio Béni, les stations des Llanos présentent un cycle saisonnier dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, traduisant pour un même débit des concentrations plus élevées en décrue que lors de la montée des eaux. Cette augmentation de la salinité à la décrue peut s'expliquer par la vidange des plaines d'inondations, ou la participation d'une composante souterraine à l'écoulement (Roche, 1980; Meybeck, 1985).

Le Rio Grande à Abapo présente un cycle très net dans le sens des aiguilles d'une montre, avec des concentrations plus fortes lors de la montée de crue qu'en décrue, correspondant généralement au lessivage de terrains salés (Meybeck, 1985).

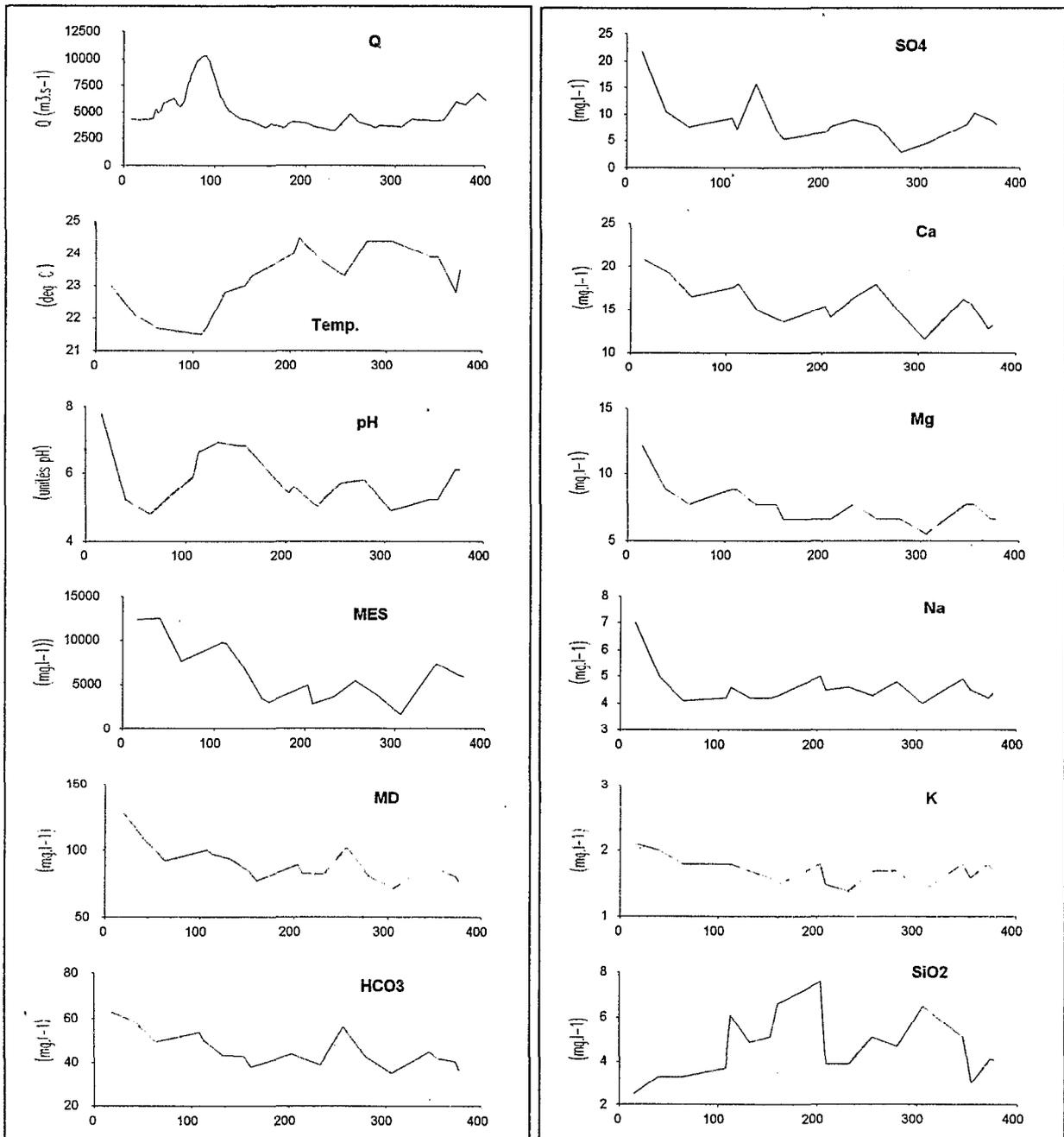
A Angosto del Bala, le Rio Béni montre une courbe en forme de "8" où pour les forts débits, le sens des aiguilles d'une montre est de règle, alors qu'ensuite c'est l'inverse qui se produit. Cette situation mixte traduit le lessivage de terrains salifères et des dépôts évaporitiques observés dans le lit des cours d'eau de la zone aride (rios La Paz et Luribay), alors qu'ensuite, une autre partie de la salinité est produite par la vidange de zones d'inondations ou d'aquifères alluviaux situés dans le subandin. Cette particularité explique la plurimodalité de la distribution de fréquence des conductivités journalières observée sur ce cours d'eau (Figure 159).

Dans le bassin du Rio Mamoré, le Rio Ichilo (Puerto Villarroel) et le Rio Itenez (Vuelta Grande) ont des cycles dans le sens des aiguilles d'une montre, bien que l'enveloppe soit très aplatie, et les teneurs peu variables. Cette évolution peut s'expliquer par une source pédologique des éléments transportés par ces fleuves, la salinité ayant alors un comportement similaire à celui de la matière organique (Meybeck, 1985). A Puerto Ganadero et Puerto Siles, le Rio Mamoré présente un cycle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, comparable à ceux observés dans les Llanos du Béni. Ce cycle est particulièrement net à Puerto Siles, ce qui semble indiquer que ce phénomène est lié à la vidange des zones d'inondation. A Guayaramerin, le Rio Mamoré a un cycle complexe, en forme de "8", dans le sens des aiguilles d'une montre en hautes eaux, et dans le sens contraire en basses eaux.

**VI.C.2. Le régime des éléments majeurs.**

Le régime des éléments majeurs en solution faisant l'objet de deux thèses en cours à l'IQ-UMSA de La Paz, ce sujet ne sera pas développé en détail dans cet ouvrage. Seuls des résultats provisoires relatifs à des études déjà publiées (Guyot et al., 1990, 1991) seront exposés.

**VI.C.2.a. Le Rio Béni au piedmont des Andes.**



**Figure 167 :** Evolution du débit, de la température, du pH, des matières en suspension, des matières dissoutes, et des éléments majeurs en solution, au cours d'une crue du Rio Béni à Rurrenabaque, du 15 au 30 Mars 1988. *Evolución del caudal, de la temperatura, del pH, de las MES y MD, y de los elementos mayores en solución durante una crecida del Río Beni en Rurrenabaque, Marzo de 1988. Discharge, temperature, pH, TSS, TDS and dissolved major elements evolution during a flood of the Beni river at Rurrenabaque, March 1988.*



↶ Photo 50 : Méandres du Rio Mamoré dans les Llanos près de Puerto Varador (140 m). *Meandros del Río Mamoré cerca de Puerto Varador. Mamore river meanders near Puerto Varador.*

↓ Photo 51 : Les rapides du Rio Béni à Cachuela Esperanza (120 m). *Las cachuelas del Río Beni en Cachuela Esperanza. The Beni river rapids at Cachuela Esperanza.*



Au piedmont des Andes, le Rio Béni à Rurrenabaque a fait l'objet d'un échantillonnage journalier au cours d'une crue de fréquence annuelle. L'évolution des concentrations en éléments majeurs au cours de cet épisode (Figure 167) a montré que la plupart des éléments ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Ca, Mg, Na, K) suivent la même évolution que les matières dissoutes, mais sans grande relation avec le débit. Les teneurs en silice dissoute évoluent différemment, avec des valeurs maximums enregistrées alors que les débits diminuent (Guyot & al., 1990).

**VI.C.2.b. Le Rio Mamoré dans la plaine d'inondation.**

L'évolution de l'hydrochimie du Rio Mamoré à Puerto Ganadero (ou Puerto Varador) a été étudiée au cours de deux cycles hydrologiques, de septembre 1986 à mai 1988 (Guyot et al., 1991). Les résultats obtenus ont montré que les concentrations maximales en matières dissoutes s'observent en période d'étiage, et les crues entraînent une baisse de la salinité, par phénomène de dilution par les eaux de pluie. La plupart des éléments en solution suivent la même évolution que les matières dissoutes, dont Cl, ce qui permet de penser que l'origine des Chlorures est à rechercher dans la nature lithologique des bassins andins, et non dans les précipitations. Le potassium, avec des teneurs globalement plus stables au cours du cycle hydrologique, présente cependant des pics, à la fois en période de hautes et de basses eaux. Le fer dont les teneurs sont faibles, montre également des pics de concentration qui correspondent à la montée des eaux. L'augmentation des teneurs en fer et en potassium lors de la montée des eaux peut correspondre à l'arrivée d'eaux stagnantes restées en contact avec la végétation, et qui ont été chassées par l'onde de crue. La silice dissoute présente une évolution synchrone à celle des débits, avec de fortes variations.

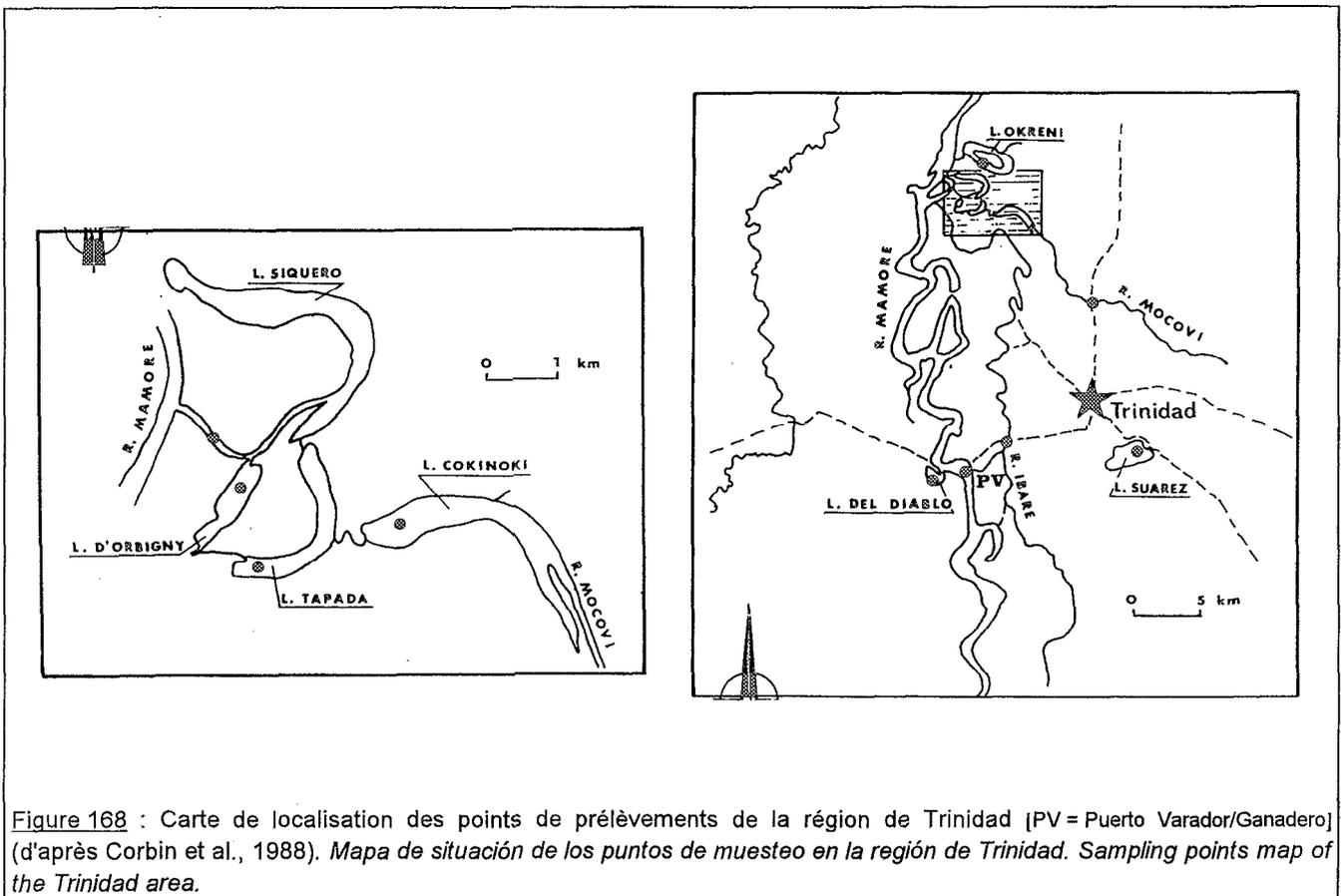


Figure 168 : Carte de localisation des points de prélèvements de la région de Trinidad [PV = Puerto Varador/Ganadero] (d'après Corbin et al., 1988). *Mapa de situación de los puntos de muestreo en la región de Trinidad. Sampling points map of the Trinidad area.*

En période de hautes eaux, toute la région de Trinidad (Figure 168) est soumise à d'importantes inondations en raison de la crue annuelle du Rio Mamoré d'origine andine. Le suivi hydrochimique d'un système de lacs connectés au Rio Mamoré, et alimenté par une rivière de la plaine (le Rio Mocovi), a été entrepris par l'ORSTOM de septembre 1986 à mai 1988, pour comprendre le fonctionnement hydrobiologique de cet écosystème particulier (Corbin et al., 1988).

Les résultats obtenus ont montré qu'en période de hautes eaux, la quasi-totalité des milieux étudiés sont sous l'influence directe du Rio Mamoré, ce qui se traduit par une augmentation des teneurs en matières dissoutes et particulaires. Les courbes d'évolution des teneurs en matières dissoutes et en suspension, ainsi que celles des concentrations en potassium, établies pour l'ensemble du système, indique clairement l'existence d'inversions du gradient hydrochimique au cours du cycle hydrologique (Figure 169).

En Novembre 1986, les eaux de cette fin de période d'étiage sont très basses et l'écoulement général s'effectue en direction du Rio Mamoré dans lequel se vidangent tous les lacs. Les teneurs en MES sont alors faibles sur l'ensemble du système et la minéralisation augmente progressivement de l'amont vers l'aval. Les concentrations en K sont plus fortes dans les lacs que dans les cours d'eau. Dans la région étudiée, K semble être un indicateur des milieux confinés, à faible taux de renouvellement.

En Janvier 1987, la saison des pluies a commencé et le Rio Mamoré est en début de crue, présentant de fortes teneurs en MES. L'écoulement général s'est inversé dans la partie aval du système et le Rio Mamoré alimente la Laguna Okreni et la Laguna Siquero. Le Rio Mocovi alimente normalement la Laguna Cokinoki et la Laguna Tapada. Les profils des teneurs en MES en MD témoignent de la pénétration des eaux du Rio Mamoré dans les lacs Okreni, Siquero et d'Orbigny. Le système Mocovi-Cokinoki-Tapada reste encore non perturbé. Les concentrations en potassium décroissent sur l'ensemble du système, sauf dans le Rio Mamoré et dans la Laguna Okreni. Seule la Laguna d'Orbigny, qui n'est pas le siège d'un écoulement notable, garde une teneur élevée.

En Mars 1987, alors que les eaux du Rio Mamoré sont à leur niveau maximal, il n'existe plus d'écoulement canalisé dans le lit du fleuve, mais une zone d'inondation qui s'étend sur l'ensemble des écosystèmes étudiés. Les teneurs en MES restent faibles bien que légèrement supérieures dans le Rio Mamoré. Le profil des courbes de MD montre que la totalité du milieu lacustre est sous l'influence des inondations, seul le Rio Mocovi n'est pas affecté. Les teneurs en K, plus élevées que lors de la montée des eaux, présentent une diminution progressive de l'amont vers l'aval.

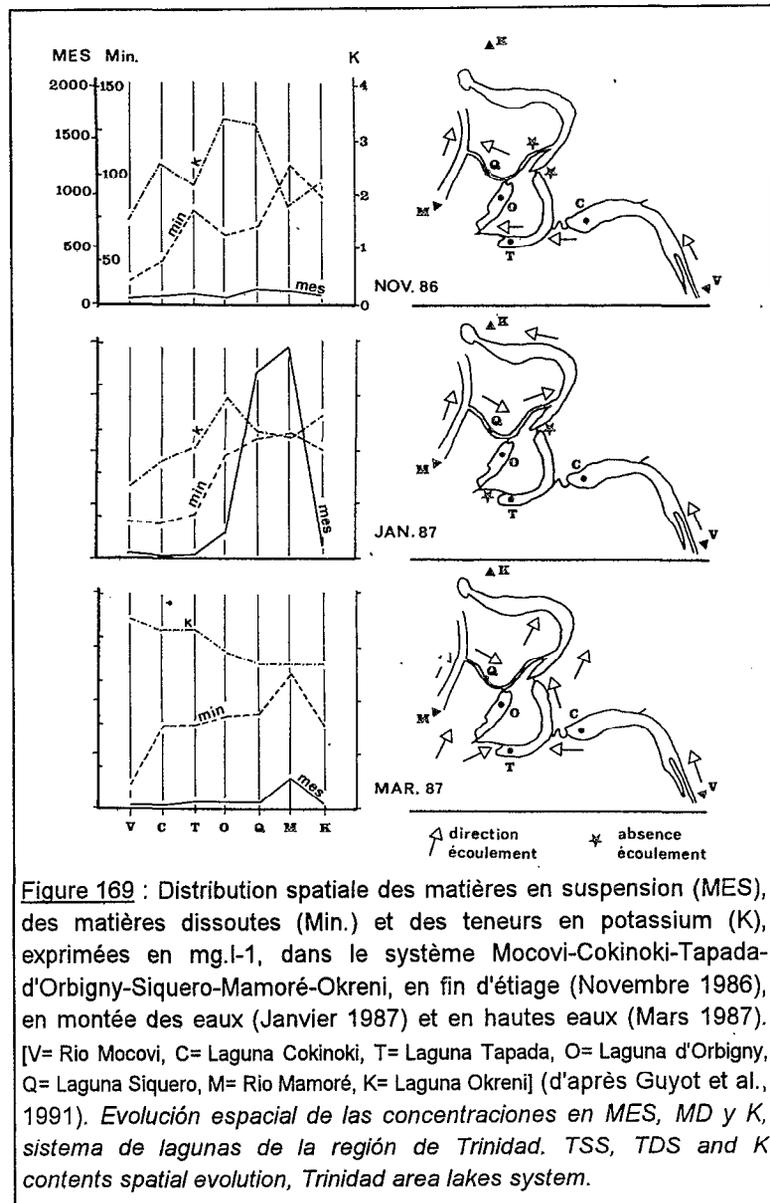


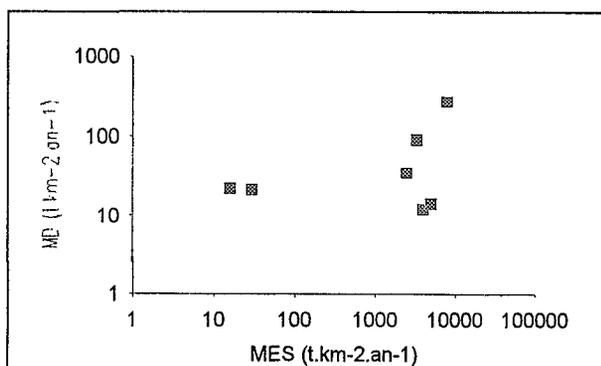
Figure 169 : Distribution spatiale des matières en suspension (MES), des matières dissoutes (Min.) et des teneurs en potassium (K), exprimées en mg.l-1, dans le système Mocovi-Cokinoki-Tapada-d'Orbigny-Siquero-Mamoré-Okreni, en fin d'étiage (Novembre 1986), en montée des eaux (Janvier 1987) et en hautes eaux (Mars 1987). [V= Rio Mocovi, C= Laguna Cokinoki, T= Laguna Tapada, O= Laguna d'Orbigny, Q= Laguna Siquero, M= Rio Mamoré, K= Laguna Okreni] (d'après Guyot et al., 1991). *Evolución espacial de las concentraciones en MES, MD y K, sistema de lagunas de la región de Trinidad. TSS, TDS and K contents spatial evolution, Trinidad area lakes system.*

**VI.D. LE BILAN.****VI.D.1. Le bilan global.****VI.D.1.a. Dans les Andes.**

Un bilan de matières dissoutes a été établi pour 7 bassins andins de l'Alto-Béni pour lesquels il existait des chroniques de données suffisantes. Le calcul du flux annuel de matières dissoutes permet d'estimer dans ces bassins, un taux de transport en solution ( $T_d$ ) moyen (Tableau XXXVII). Les teneurs en bicarbonates n'ont pas été prises en compte dans ce calcul, du fait de leur origine essentiellement atmosphérique, en raison de l'absence de séries carbonatées d'extension notable dans les bassins versants. Les valeurs obtenues ne sont que des ordres de grandeur.

**Tableau XXXVII** : Taux de transport en solution de quelques bassins andins de l'Amazonie bolivienne, [Alt.= altitude de la station, Sup.= superficie du bassin versant, MD= teneur moyenne en matières dissoutes, QD= flux moyen annuel de matières dissoutes, QD\*= flux moyen annuel de matières dissoutes sans les bicarbonates, Td= taux de transport en solution].  
*Transporte en solución en algunas cuencas andinas. TDS yield for ones andean stations.*

Rio	Alt. (m)	Sup. (km <sup>2</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	MD (mg.l <sup>-1</sup> )	QD (10 <sup>3</sup> t.an <sup>-1</sup> )	QD* (10 <sup>3</sup> t.an <sup>-1</sup> )	Td (t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )
Aceramarca à Unduavi	2960	61	2.8	37	3.4	1.3	22
Unduavi à Unduavi	2940	66	3.0	34	3.1	1.3	21
Tamampaya à Pte Villa	1185	950	52	44	64	33	35
Huayllani à Achumani	3620	17	0.1	150	0.3	0.2	12
Quellumani à Achumani	3580	20	0.1	200	0.4	0.3	14
Luribay à Luribay	2550	810	10	890	290	220	270
Porvenir à Porvenir	2500	240	3	480	40	22	90



**Figure 170** : Taux de transport en solution vs. taux de transport en suspension, bassins andins de l'Amazonie bolivienne. *Transporte en solución vs. transporte en suspensión. TDS yield vs. TSS yield.*

Les résultats obtenus sur ces 7 bassins montrent que la distribution régionale de ces taux de transport en solution (ou taux d'érosion chimique), est beaucoup plus homogène que celle des taux de transport en suspension (Tableau XXXI). A l'amont des bassins, les formateurs du Rio Unduavi (rios Unduavi et Aceramarca), les taux de transport en solution sont du même ordre de grandeur que ceux de l'érosion mécanique, alors que dans le cas du Rio Achumani (rios Huayllani et Quellumani), l'érosion mécanique est de 300 à 400 fois plus importante (Figure 170). Pour des bassins de plus grande extension (>100 km<sup>2</sup>), ce rapport varie de 30 (rios Luribay et Porvenir) à 70 (Rio Tamampaya). Les taux les plus faibles sont obtenus sur les têtes de bassin, soit en raison de la nature lithologique des affleurements très

peu solubles (bassin du Rio Unduavi), ou du fait d'un faible coefficient de ruissellement (bassin du Rio Achumani).

La relation entre taux de transport en solution ( $T_d$ ) et le ruissellement (Figure 171) permet de distinguer deux domaines différents. La totalité des fleuves des Llanos et quelques cours d'eau andins définissent un groupe, où l'augmentation du ruissellement entraîne une augmentation progressive de l'altération. Mais dans certains bassins de l'Alto-Béni, où un ruissellement faible est observé, le taux d'érosion chimique est maximum. Ces bassins sont les mêmes qui produisent de fortes teneurs en MES et les plus forts taux de transport en suspension (Figure 129), et cette particularité semble être liée à l'altération physique des roches en zone semi-aride qui facilite la mise en solution des éléments les plus solubles (Rio Luribay, Rio La Paz). Malgré tout, la relation liant le

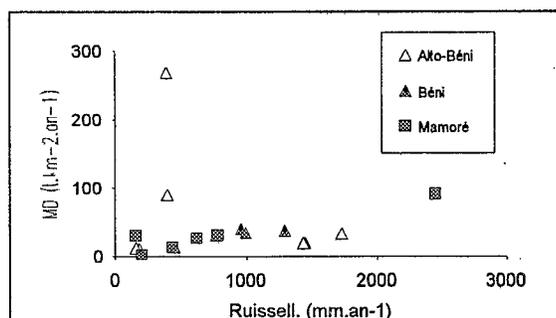


Figure 171 : Taux de transport en solution vs. ruissellement, en Amazonie bolivienne. *Transporte en solución vs. escurrimiento. TDS yield vs. runoff.*

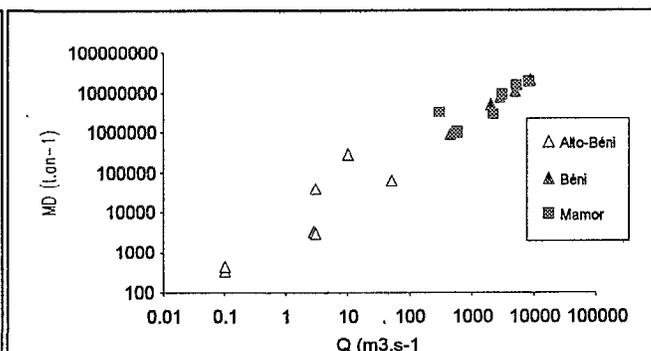


Figure 172 : Flux de matières dissoutes vs. débit, en Amazonie bolivienne. *Flujo de MD vs. caudal. TDS yield vs. discharge.*

flux de matières dissoutes et le débit (Figure 172) est assez bonne, car l'influence de la variation du débit sur les flux est plus importante que la variation des teneurs.

L'estimation de l'exportation de matières dissoutes du domaine andin de l'Amazonie bolivienne a été tentée, en utilisant les résultats des stations de Angosto del Bala et Abapo qui représentent près de 75% de la superficie totale de ce domaine. Les apports des autres bassins ont été estimés sur les bases des données hydrochimiques (Tableau XXXVIII) et de la carte des débits spécifiques (Roche et al., 1990). Ces résultats ne sont que des ordres de grandeur.

La partie andine du bassin versant amazonien de Bolivie exporte un flux moyen de matières dissoutes estimé à  $14 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ . En supprimant les bicarbonates des matières dissoutes compte tenu de l'absence de séries carbonatées d'extension notable dans les Andes de Bolivie, le taux de transport en solution moyen est d'environ  $40 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , soit 80 fois plus faible que le taux de transport en suspension.

Tableau XXXVIII : Bilan estimé de l'exportation de matières dissoutes des bassins andins. *Balance del transporte de MD en las cuencas andinas. TDS yield budget for the andean basins.*

Rio	Superficie		Flux de MD	
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	(%)
Madidi	2600	2	0.2	1
Béni	68600	40	5.3	37
Yacuma	2700	2	0.5	4
Apéré	900	1	0.2	1
Sécuré	5200	3	0.9	6
Chaparé	5500	3	1.4	10
Ichilo	7600	4	1.0	7
Yapacani	7000	4	0.8	6
Piray	2800	2	0.3	2
Grande	61200	35	3.3	24
Parapeti	9100	5	0.3	2
Total	173200	100	14.2	100

#### VI.D.1.b. Dans le bouclier brésilien.

Comme pour les bassins andins sans mesures directes, et compte tenu de la faible variabilité temporelle des teneurs en solution, le flux de matières dissoutes a été estimé à partir des résultats d'analyses physico-chimiques ponctuelles (Tableau XXXXI) et de la carte des débits spécifiques (Roche et al., 1990).

Les résultats obtenus (Tableau XXXIX) indiquent que les flux de matières dissoutes ainsi calculées, sont environ deux fois plus faible que les flux de matières particulaires. Le flux global

## 6. Les matières dissoutes.

moyen de matières en solution, issus du bouclier brésilien est estimé à environ  $1.7 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ . Le taux de transport en solution du bouclier brésilien, qui n'est bien sur qu'un ordre de grandeur, est d'environ  $4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ .

Tableau XXXXIX : Bilan estimé de l'exportation de matières dissoutes des bassins du bouclier brésilien en Amazonie bolivienne. *Balance del transporte de MD en las cuencas del escudo brasilero. TDS yield budget for the Brazilian shield basins.*

Rio	Superficie		Flux de MD	
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	(%)
Béni	900	0.4	0.02	1
Mamoré*	12100	5	0.2	12
Itenez*	6900	3	0.1	36
Machupo-San Julian	15200	6	0.1	6
Blanco-Baures	61200	25	0.3	17
Guaporé-Paragua	151900	61	1.0	58
Total	248200	100	1.7	100

### VI.D.1.c. Dans les Llanos.

Le calcul du bilan de matières dissoutes dans les Llanos de Bolivie à partir des flux mesurés aux stations du réseau PHICAB (Tableau L) montre qu'une partie importante de l'exportation provient du domaine andin, avec 70% pour le Rio Béni à Portachuelo, et 55% pour le Rio Mamoré à Guayaramerin. Le taux de transport en solution de la plaine amazonienne varie suivant les bassins de 5 à 27  $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Ces chiffres ne sont qu'indicatifs, mais il est intéressant de remarquer que la plus forte production spécifique des Llanos en matières dissoutes, s'effectue entre Puerto Ganadero et Puerto Siles sur le Rio Mamoré. La valeur moyenne de  $15 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , qui est observée sur le Rio Orthon disposant d'une longue chronique de mesures, semble être représentative de l'apport des Llanos du bassin amazonien de Bolivie.

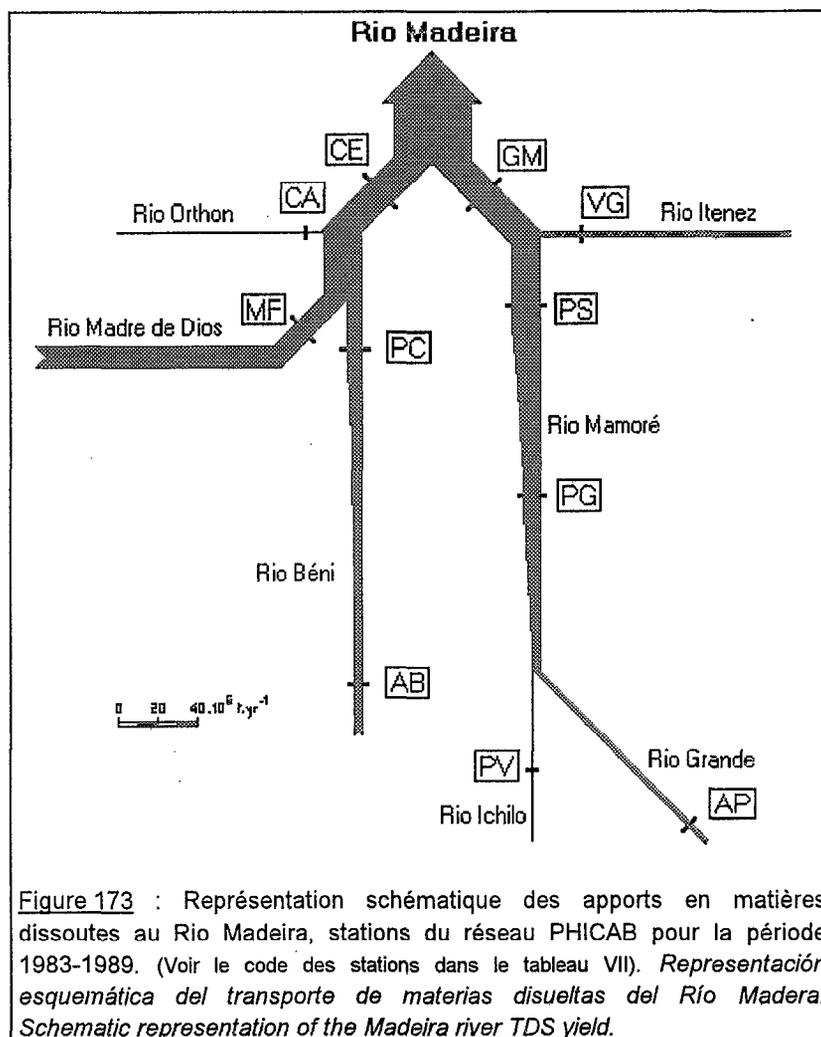
A Villabella, le Rio Madeira reçoit un flux de matières dissoutes de l'ordre de  $40 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ , (Figure 173), dont 53% proviennent du Rio Béni, et 47% du Rio Mamoré, distribution très voisine de celle des débits (Figure 174). En comparant ces valeurs avec celles des grands fleuves mondiaux (Tableau IV), le Rio Madeira à Villabella serait parmi les 20 premiers s'il débouchait à l'océan.

Tableau L : Bilan du transport de matières en solution dans les Llanos de Bolivie, stations du réseau PHICAB, pour la période 1983-1989. [Sup.= superficie, QD= flux de matières dissoutes,  $\delta$ QD= variation amont-aval du flux de matières dissoutes, Td= taux de transport en solution global moyen annuel, Tdl= Td estimé pour les Llanos].

*Balance del transporte de MD en los Llanos. TDS yield budget for the Llanos.*

Code Station	Sup. bassin (km <sup>2</sup> )	Sup. Llanos (km <sup>2</sup> )	Apports			QD		Td (t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	Tdl (t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )
			Andes (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	Bouclier (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	Total (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	observé (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	$\delta$ QD (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )		
AB	67500	0	5.2	0	5.2	5.2	0	41	0
PC	119000	47800	5.5	0	5.5	7.8	+2.3	33	24
MF	124200	80200	---	0	---	11	---	39	---
CA	32300	32300	0	0	0	0.9	+0.9	15	15
CE	282500	167300	---	0	---	21	---	35	---
AP	59800	0	3.2	0	3.2	3.2	0	32	0
PV	7600	2200	0.9	0	0.9	1.0	+0.1	92	22
PG	159100	69800	7.7	0	7.7	9.1	+1.4	28	10
PS	216200	123300	8.4	0	8.4	15	+6.6	33	27
VG	354300	111000	0.3	1.5	1.8	2.8	+1.0	4	5
GM	599400	256900	8.7	1.7	10.4	19	+8.6	15	17

[Voir code des stations dans le Tableau XXIX, les valeurs de Td et Tdl sont calculés sans les bicarbonates, --- correspond aux apports non définis en raison de l'extension d'une partie du bassin versant au Pérou].



### VI.D.2. Le bilan élémentaire.

#### VI.D.2.a. Le Rio Madeira à Villabella.

A partir du bilan global établi à chacune des stations du réseau PHICAB (Tableau L), et de la composition hydrochimique moyenne en matières dissoutes à ces mêmes stations (Tableaux XXXX et XXXXI), le bilan de chaque élément analysé est possible à calculer. Ainsi, les flux élémentaires en solution du Rio Madeira à Villabella ont été calculés (Tableau LI).

Tableau LI : Bilan élémentaire des matières dissoutes du Rio Madeira à Villabella, pour la période 1983-1989.

Balance de los elementos mayores en solución, Río Madera en Villabella.

Dissolved major elements budget, Madeira river at Villabella.

Élément	Béni ( $10^3 \text{ t.an}^{-1}$ )	Mamoré ( $10^3 \text{ t.an}^{-1}$ )	Madeira ( $10^3 \text{ t.an}^{-1}$ )
HCO <sub>3</sub>	10800	9700	20500
SiO <sub>2</sub>	3000	2530	5530
SO <sub>4</sub>	2140	1940	4080
Ca	2160	1730	3890
Mg	690	760	1450
Na	760	990	1750
Cl	730	660	1390
K	440	530	970
Fe	190	130	320

### VI.D.2.b. Le carbone organique dissous.

De la même manière, en utilisant les valeurs moyennes de carbone organique dissous et les valeurs moyennes du ruissellement par bassin (Tableau XXXXIII), un taux de production de carbone organique dissous a pu être calculé. Les résultats obtenus, qui varient de  $0.3 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  pour les formateurs andins du Rio Grande, à  $18 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  sur le Rio Ichilo, montrent une bonne corrélation pour les bassins andins, entre l'extension de la couverture forestière et ce taux de productivité de carbone organique dissous (Figure 175).

La relation classique entre le flux de carbone organique dissous et le ruissellement (Spitzzy et Leenheer, 1991; Esser et Kohlmaier, 1991) permet de séparer en Amazonie bolivienne le domaine andin des Llanos (Figure 176). Pour une valeur de ruissellement donné, la production de COD dans les Llanos est 3.5 fois plus élevée que dans les Andes.

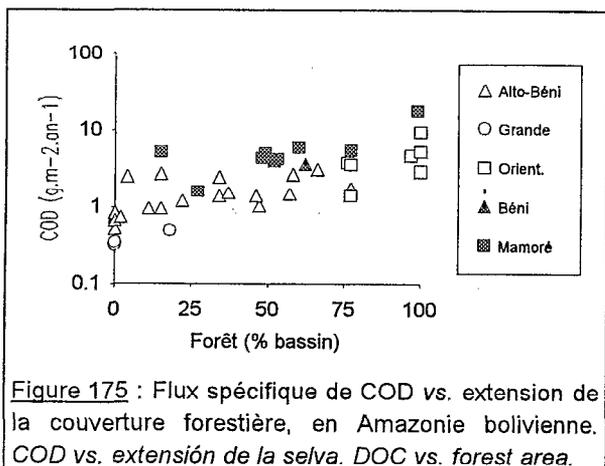


Figure 175 : Flux spécifique de COD vs. extension de la couverture forestière, en Amazonie bolivienne. COD vs. extensión de la selva. DOC vs. forest area.

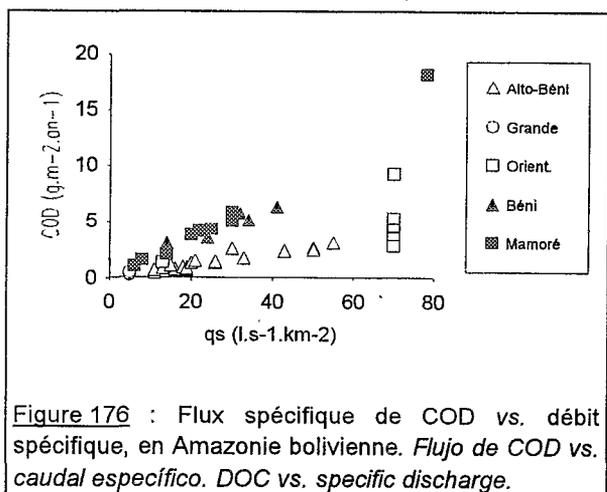


Figure 176 : Flux spécifique de COD vs. débit spécifique, en Amazonie bolivienne. Flujo de COD vs. caudal específico. DOC vs. specific discharge.

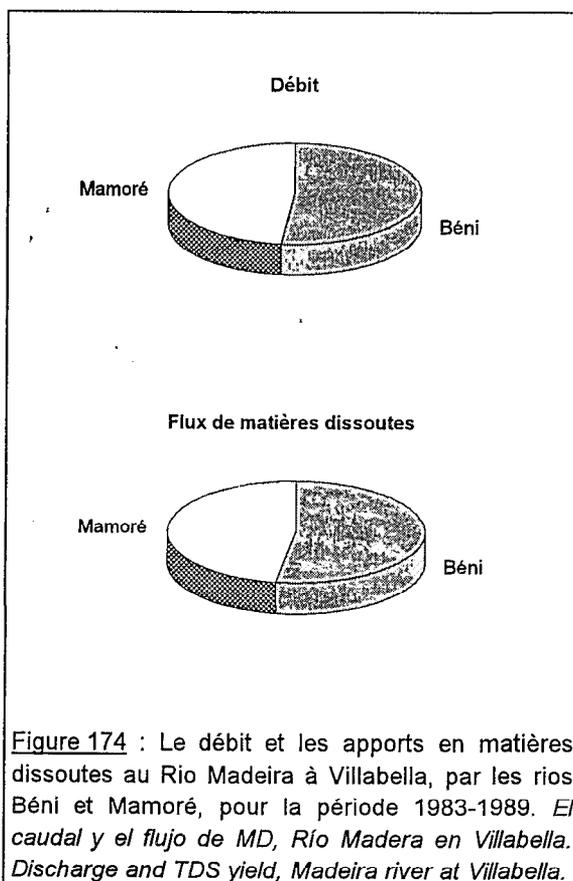
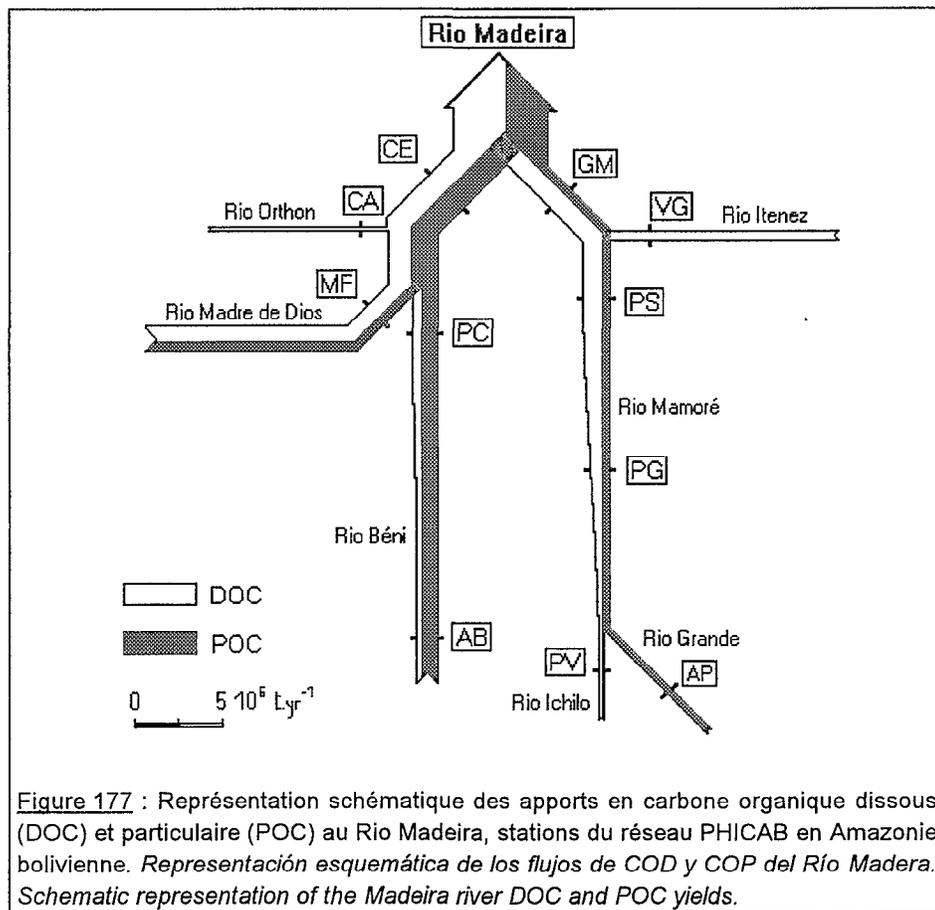


Figure 174 : Le débit et les apports en matières dissoutes au Rio Madeira à Villabella, par les rios Béni et Mamoré, pour la période 1983-1989. El caudal y el flujo de MD, Río Madera en Villabella. Discharge and TDS yield, Madeira river at Villabella.

En zone semi-aride, cette production de COD est inférieure à  $1 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , alors que dans les vallées andines humides, elle est de  $1$  à  $3 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  (Yungas, Alto-Béni). Dans le Chaparé et les Llanos, les valeurs obtenues varient de  $3$  à  $6 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , bien que des valeurs extrêmes soient localement enregistrées. Le bassin du Rio Itenez, qui draine d'importantes zones de savane inondable en bordure du bouclier brésilien présente un taux de  $1.2 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Le Rio Ichilo à Puerto Villarroel, issu de la zone forestière hyper-humide du Chaparé, soumise à une intense colonisation, montre le flux maximum avec  $18.2 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . De telles valeurs ont été observées sur des cours d'eau de Malaisie soumis au déboisement (Schlesinger et Melack, 1981), suggérant une possible cause anthropique aux teneurs rencontrées sur le Rio Ichilo.

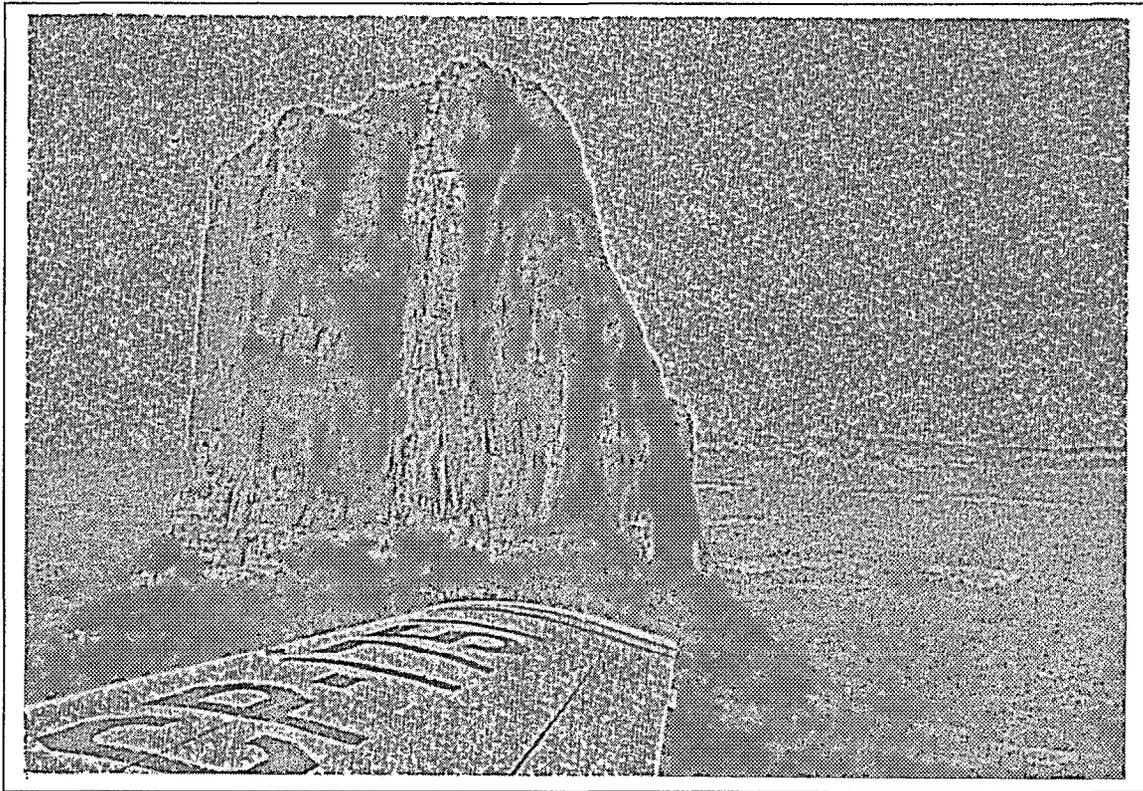
En utilisant la relation liant le carbone organique particulaire et les matières en suspension (Figure 105), et les données des flux de MES aux stations du réseau PHICAB, le flux de COP a pu être estimé avec une précision acceptable. Les flux globaux de carbone organique (dissous et particulaire) ont ainsi été calculés (Figure 177).



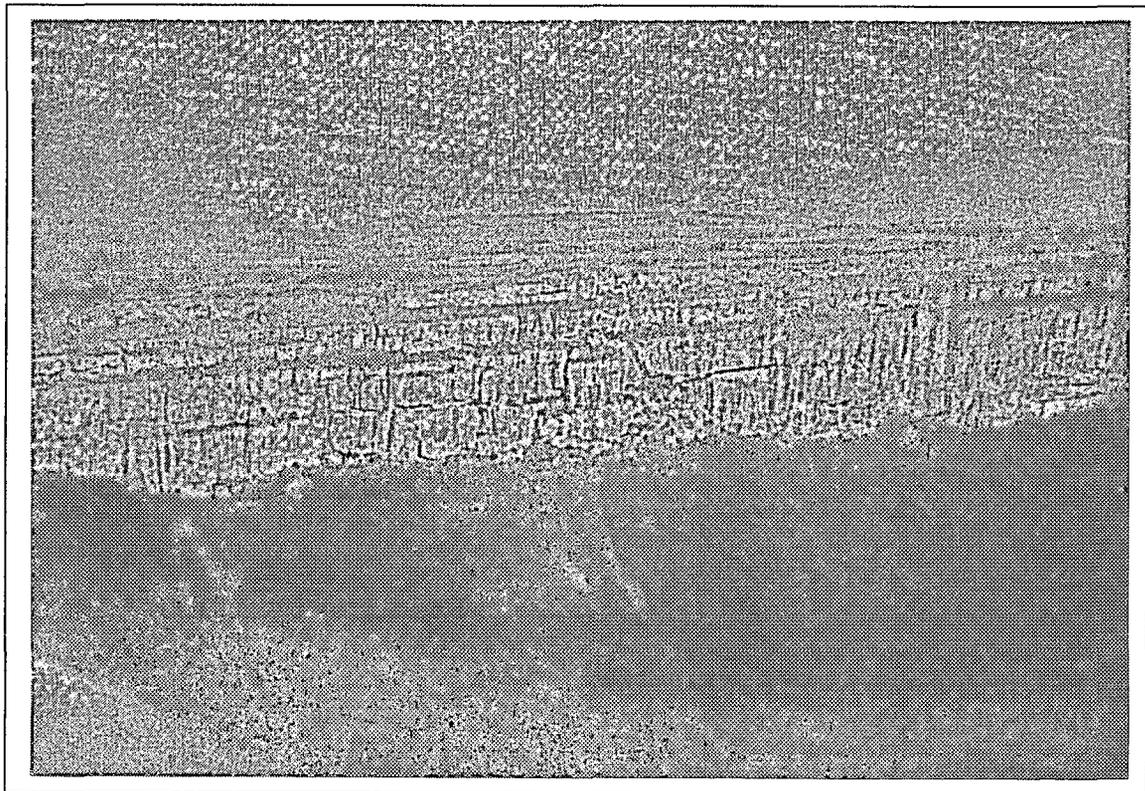
↓ **Photo 52** : Le Rio Béni à Cachuela Esperanza (120 m).  
*El Río Beni en Cachuela Esperanza. The Beni river at Cachuela Esperanza.*



6. Les matières dissoutes.



↕ Photo 53 & 54 : Les séries du Paléozoïque des Serranías Chiquitanas, dans l'Orient bolivien (700-800 m).  
*Las series del Paleozoico de las Serranías Chiquitanas, en el Oriente boliviano.*  
*The Serranías Chiquitanas Paleozoic series, in the Estern Bolivia.*

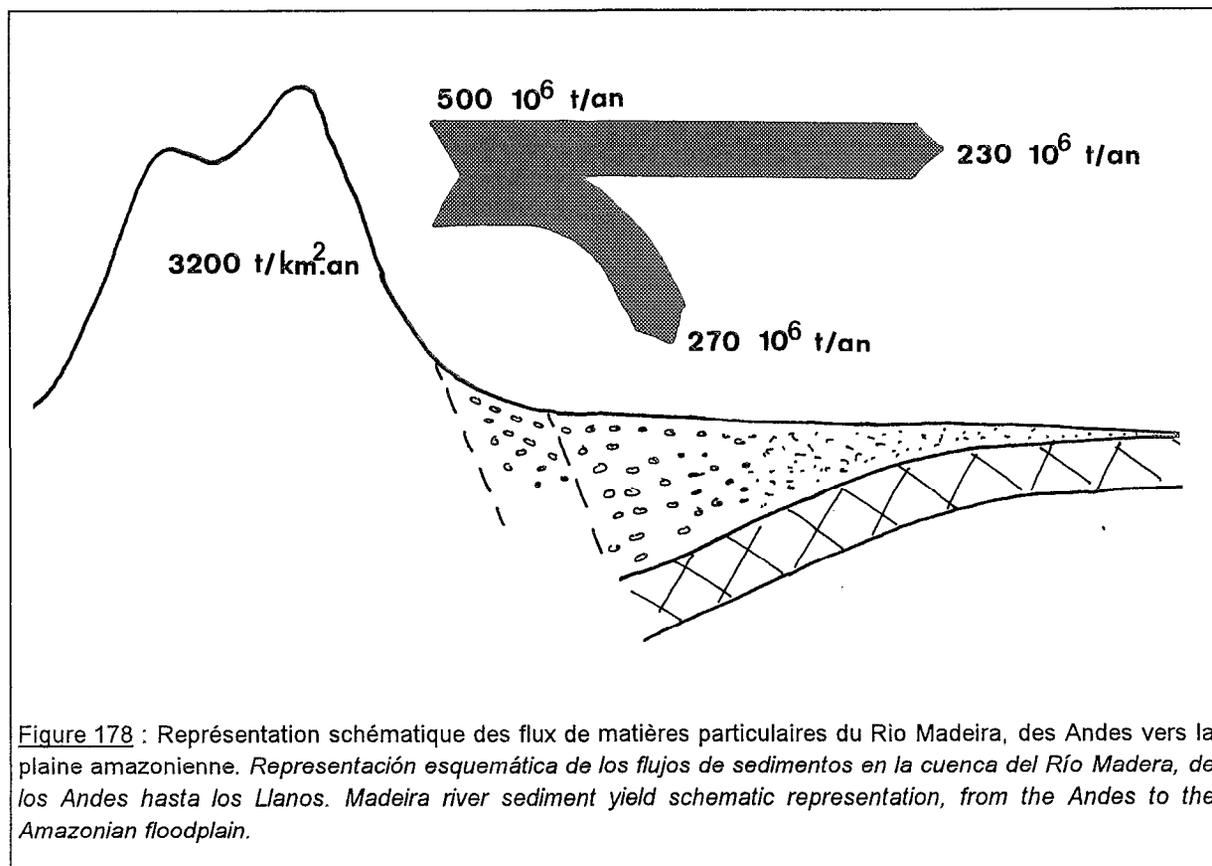


## CONCLUSION

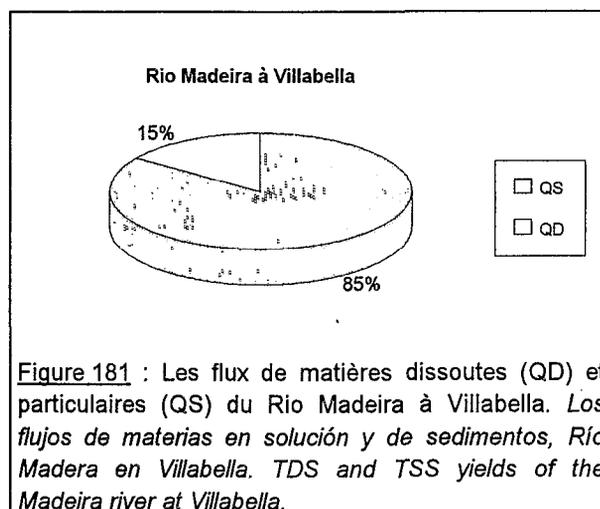
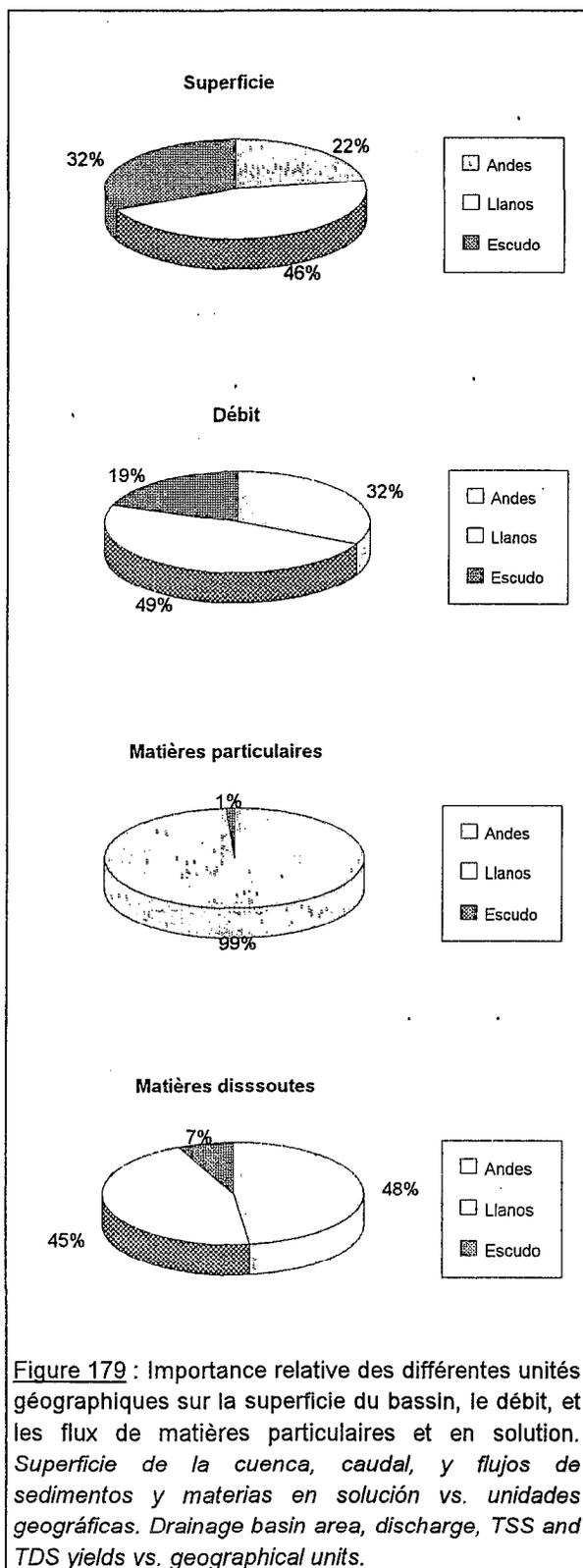
Les résultats obtenus dans ce travail constituent la première étape d'une étude plus générale sur les flux hydrogéochimiques du bassin amazonien. Le Rio Madeira est le seul tributaire andin du bassin amazonien, dont les flux sont aujourd'hui connus avec précision, grâce à la mise en place d'un échantillonnage continu sur près de 7 années, aux 11 stations du réseau PHICAB.

En complétant l'information acquise sur ce réseau, avec les données anciennes et inédites de plusieurs réseaux nationaux d'observation (SENAMHI, ENDE, SEARPI), le régime des flux de matières particulaires a pu être étudié en détail dans les Andes de Bolivie. Le calcul des taux de transport en suspension (Ts) a montré l'existence d'une forte variabilité régionale (de 20 à 18000 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>), liée à des conditions topographiques, géologiques et climatologiques contrastées. L'identification des processus entraînant cette forte hétérogénéité spatiale a permis d'élucider l'origine des sources de matières particulaires, alors que la plupart des cours d'eau andins échantillonnés jusqu'à présent, indiquaient des teneurs faibles en matières en suspension (Sioli, 1984). Ainsi, le Rio La Paz à Cajetillas qui ne représente que 5% du débit, et 10% de la superficie du bassin du Rio Béni à Angosto del Bala, apporte à cette station plus de 50% du volume sédimentaire observé.

Pour la première fois à cette échelle, les flux de matières particulaires exportés par un grand bassin andin (173000 km<sup>2</sup>) ont été mesurés, permettant d'estimer un taux d'érosion mécanique théorique moyen de cette partie de la chaîne andine (3200 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>). La connaissance plus précise des flux de matières dissoutes a permis d'affiner la première estimation proposée par M.A. Roche (Roche & al., 1986; Roche & Fernandez, 1988). Le taux de transport en solution (Td) moyen exporté des bassins andins (40 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>) est environ 80 fois plus faible que le taux de transport en suspension.



Conclusion.



Dans les Llanos, plus de 60% du flux de matières particulaires d'origine andine, va se déposer lors de la traversée de la plaine d'inondation (Figure 178). Le dépôt de  $75 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$  de sédiments dans le bassin du Rio Béni, et de plus de  $150 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$  dans celui du Rio Mamoré, s'effectue essentiellement dans les zones de piedmont où une forte subsidence, liée à la géodynamique de l'avant pays andin, est observée. Au delà d'une distance de quelques dizaines de km du piedmont andin, la taille des matières particulaires transportées (transport de fond et matières en suspension), n'évolue plus de manière significative d'amont en aval, sur plus de 600 km.

Le taux de transport en solution varie suivant les bassins de 5 à  $30 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Pour le bouclier brésilien, les données obtenues indiquent un taux de transport en suspension (Ts) de 15 à  $20 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$  pour un taux de transport en solution de l'ordre de  $4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ .

Ainsi, le flux de matières particulaires exporté par le Rio Madeira à Villabella (sans compter le Rio Madre de Dios pour lequel les apports andins ne sont pas connus) provient pour 99% des bassins andins, qui fournissent également 48% des matières dissoutes et 32% des apports hydriques, alors qu'ils n'occupent que 22% de la superficie totale du bassin (Figures 179 & 180). A l'échelle du bassin amazonien, le Rio Madeira est donc considéré comme un fleuve andin.

A Villabella, le Rio Madeira présente un flux global de  $270 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ , dont 15% sous forme dissoute et 85% sous forme particulaire (Figure 181).

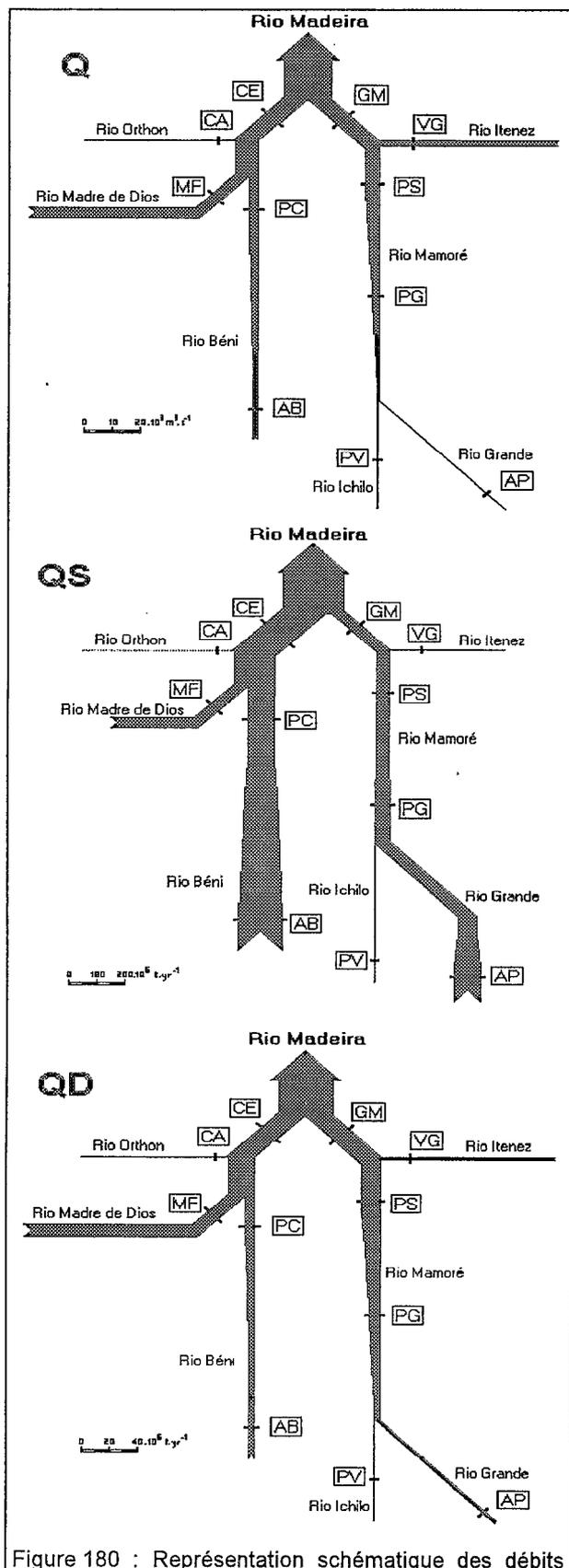


Figure 180 : Représentation schématique des débits (Q) et des flux de matières particulaires (QS) et en solution (QD) dans le bassin du Rio Madeira [Voir code des stations dans tableau VII]. *Representación esquemática de los caudales y de los flujos de sedimentos y materias disueltas en la cuenca del Río Madera. Discharge, TSS and TDS yields schematic representation of the Madeira river drainage basin.*

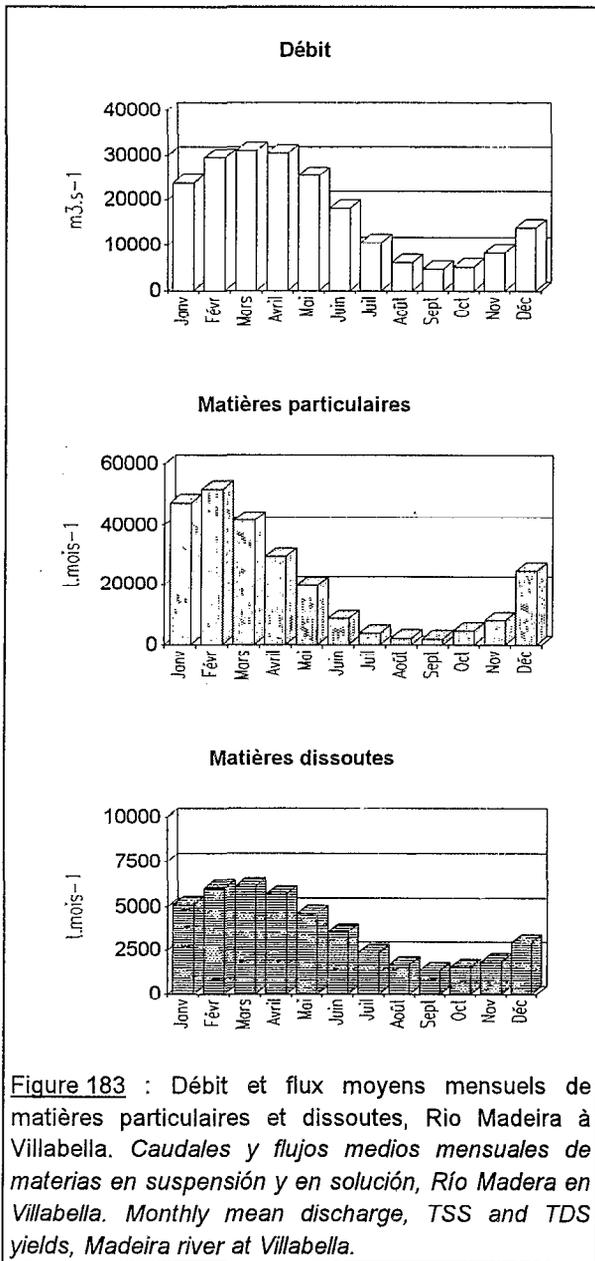
L'étude qualitative du matériel transporté par les fleuves de l'Amazonie bolivienne a montré une grande constance régionale et temporelle de la géochimie des matières en suspension. La minéralogie des argiles, et la chimie des solutions présentent quelques tendances régionales liées à la nature lithologique des séries rencontrées. Ainsi, les cours d'eau drainant les séries sédimentaires tertiaires situées dans les Andes (bassin de l'Alto-Béni), dans les zones de piedmont, ou dans les Llanos (bassin du Rio Orthon) présentent des caractéristiques minéralogiques (argiles) et hydrochimiques particulières. De même, certaines séries andines très altérées du Paléozoïque sont à l'origine de fortes teneurs en matières dissoutes et particulaires.

Les fortes variations des teneurs globales en matières en solution et en suspension observées au cours du cycle hydrologique n'affectent que très peu les concentrations relatives des éléments de la phase dissoute et particulaire. Ces résultats ont permis le calcul de bilans élémentaires.  $\text{SiO}_2$  (dont 4% sous forme dissoute),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  représentent 75% du flux total de matières exportées par le Rio Madeira à Villabella (Figure 182).

Le suivi en continu, à partir d'un double échantillonnage, journalier et décadaire, a permis de connaître le régime de ces flux de matières. Du fait d'une forte variabilité saisonnière des teneurs en matières en suspension, l'exportation de matières particulaires s'effectue essentiellement lors des trois mois de hautes eaux, qui peuvent totaliser dans les Andes plus de 90% de l'exportation sédimentaire annuelle. Ce pourcentage varie de 60 à 80% pour les stations du piedmont andin, pour une valeur moyenne de 50% dans les Llanos.

Les matières en solution présentent des variations de concentrations plus faibles au cours du cycle hydrologique, et le flux de matières dissoutes s'apparente au régime hydrologique (Figures 180

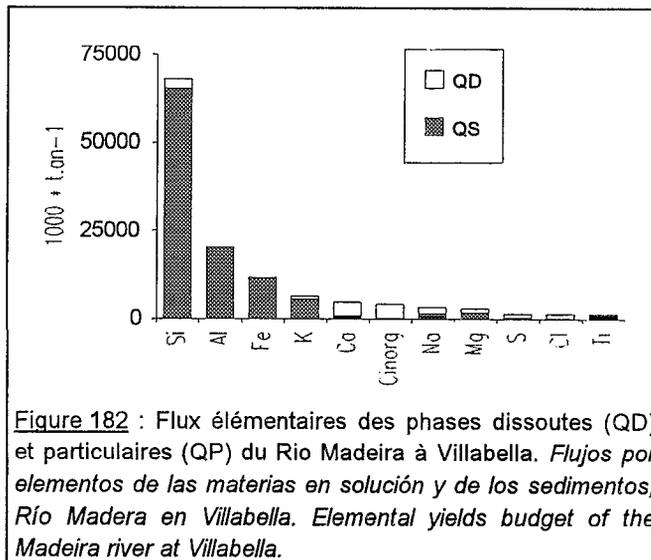
Conclusion.

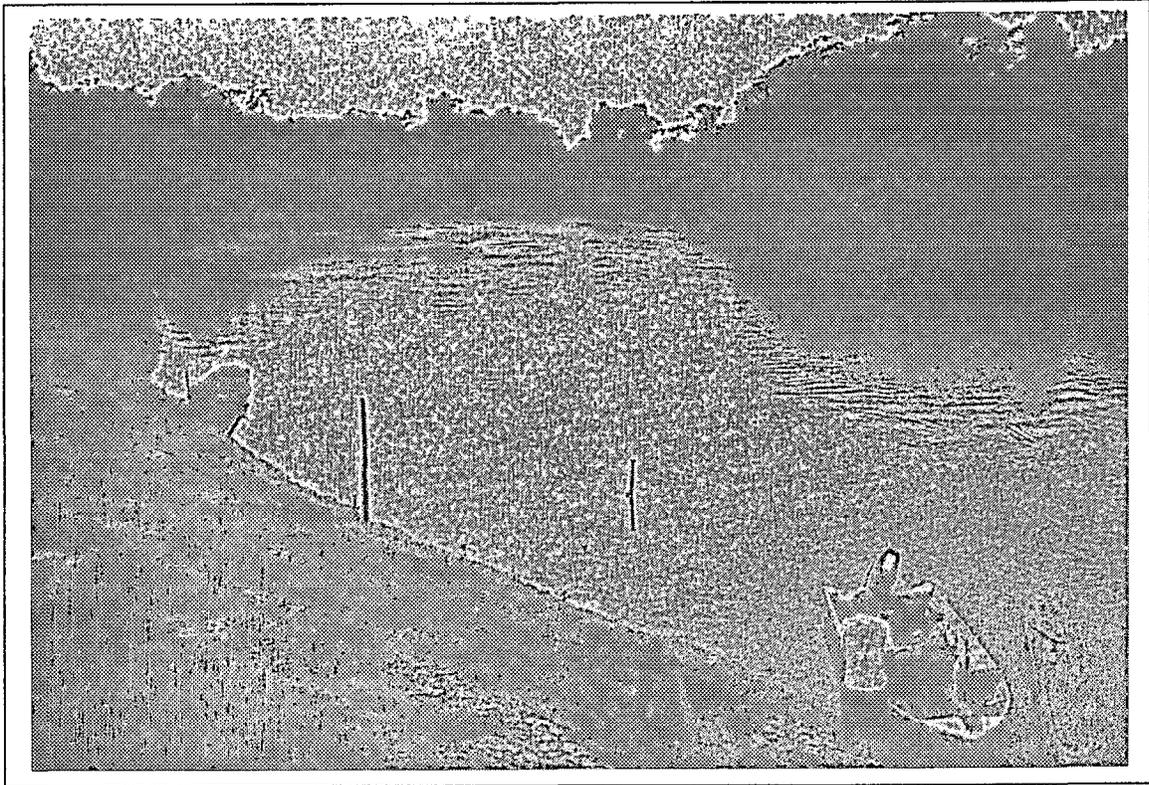


& 183). Malgré l'étendue du bassin versant drainé (903500 km<sup>2</sup>), le Rio Madeira à Villabella présente un régime saisonnier du flux de matières particulaires très marqué.

L'étude statistique de la variabilité temporelle des teneurs a montré qu'une estimation des flux de matières particulaires passe par un échantillonnage décadaire pour les stations des Llanos, et un échantillon tous les 5 jours pour les stations du piedmont andin. Pour les matières dissoutes, la fréquence d'échantillonnage souhaitable varie de 15 jours à 1 mois.

La mise en place d'un réseau d'échantillonnage en Amazonie brésilienne pour le suivi des flux de matières dissoutes et particulaires, devra tenir compte des résultats obtenus sur le haut-bassin du Rio Madeira. Pour une bonne estimation des flux de matières particulaires, un échantillonnage décadaire est à conseiller pour les fleuves d'origine andine (Rio Solimões et Rio Madeira). Un échantillonnage mensuel sera suffisant pour l'estimation des matières dissoutes.





↑ Photo 55 : Le Rio Orthon à la station de Caracoles (125 m).  
*El Río Orthon en la estación de Caracoles. The Orthon river at Caracoles gauging station.*

↓ Photo 56 : La pirogue du PHICAB sur le Rio Mamoré à Guayaramerin (120 m).  
*La canoa del PHICAB sobre el Río Mamoré en Guayaramerin.  
The PHICAB canoe on the Mamore river at Guayaramerin.*



## Références bibliographiques

- Abasto Lara N. 1987. Balance hidrico superficial de la cuenca del Río Madre de Dios, Amazonia, Bolivia, Peru. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 260 p.
- Abasto Lara N., Hoorelbecke R., Roche M.A., Rubin de Celis L. 1985. Alturas de agua y caudales, limnigramas e hidrogramas de la red hidrometrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 70 p.
- Absy M.L., Cleef A., Fournier M., Martin L., Servant M., Sifeddine A., Ferreira da Silva M., Soubies F., Suguio K., Turcq B., Van der Hammen T. 1991. Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le Sud-est de l'Amazonie au cours des 60000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, Sér. II, 312 : 673-678.
- Agassiz A. 1876. Hydrographic sketch of Lake Titicaca. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences : 283-292.
- Ahlfeld F., Branisa L. 1960. Geología de Bolivia. Ed. Don Bosco, La Paz, 245 p.
- Ahlfeld F., Schneider-Scherbina A. 1964. Los yacimientos minerales y de hidrocarburos de Bolivia. Boletín del Servicio Geológico de Bolivia, 5, 388 p.
- Ahnert F. 1970. Functional relationships between denudation, relief, and uplift in large mid-latitude drainage basins. American Journal of Science, 268 : 243-263.
- Alekin O.A. 1978. Water erosion and Land Surface, 518-525. In World Water Balance and Water Resources of the Earth, Studies and Reports in Hydrology 25, UNESCO, Paris.
- Alekin O.A., Brazhnikova L.V. 1968. Dissolved matter discharge and mechanical and chemical erosion, 35-41. In Geochemistry, Precipitation, Evaporation, Soil Moisture, Hydrometry, Bern, Sept-Oct. 1967, IAHS publ. 78.
- Allenby R.J. 1988. Origin of rectangular and aligned lakes in the Beni Basin of Bolivia. Tectonophysics 145 : 1-20.
- Almeida G.L., Trujillo G.Y. 1984. Los principales procesos erosivos en Ecuador. Ed. Pronareg, Quito, 30 p.
- Anderson H.W. 1954. Suspended sediment discharge as related to streamflow, topography, soil, and land use. Trans. American Geophysical Union, 35(2) : 268-281.
- Antunez de Mayolo S.E. 1983. Sera posible pronosticar las variaciones de nivel de las aguas del Lago Titicaca? Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima 103 : 26-34.
- Aoyama J., Hamamitsu Y., Quintana B.H., Altamirano R., Ogawa H. 1990. Estudio de los efectos de la siembra de alevinos de trucha Arco Iris en lagunas pequeñas existentes en la cuenca altiplánica. Publ. Jica, La Paz, 52 p.
- Apaza Chavez R. 1989. Sensibilidad de los organismos benticos a la contaminación por efluentes mineros. Caso laguna Milluni, La Paz. In IV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, La Paz, Oct. 1989.
- Aranyossy J.F. 1989. Quelques exemples pratiques d'application des isotopes de l'environnement aux études hydrogéologiques. Hydrogéologie, 3 : 159-166.
- Arduz Eguía G. 1988. La producción de plata en Potosí, 229-243. In Potosí patrimonio cultural de la humanidad, Ed. Compañía Minera del Sur.
- Arellano Albornóz R. 1988. Balance hidrico superficial de la cuenca del Río Pilcomayo, Río de La Plata, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 100 p.
- Armentia N. 1897. Limites de Bolivia con el Perú por la parte de Caupolicán. Ed. Oficina Nacional de Inmigración, Estadística y Propaganda Geográfica, La Paz, 240 p.
- Armentia N. 1905. Descripción del territorio de la misiones Franciscanas de Apolobamba, por otro nombre Frontera de Caupolicán. Tip. Artística, La Paz, 238 p.
- Arnous de Rivière H. 1900. Explorations in the rubber districts of Bolivia. Journal of the American Geographical Society 32 : 432-440.
- Arze C., Salm H. 1979. Estudio de los contenidos de elementos contaminantes en aguas y sedimentos provenientes de Mina Matilde. Revista Boliviana de Química, 3(1) : 69-96.
- Asociación Icla. 1982. Proyecto Icla : Hidrología y sedimentología, Informe final. Sucre, 149 p.
- Asociación Misicuni. 1987. Proyecto multiple Misicuni, Informe hidrológico. Publ. Ende, Cochabamba, 30 p.
- Aubouin J. 1973. Présentation de la Cordillère des Andes. Revue de géographie physique et de géologie dynamique 15(1/2) : 5-10.
- Audebaud E., Capdevilla R., Dalmayrac B., Debelmas J., Laubacher G., Lefevre C., Marocco R., Martinez C., Mattauer M., Megard F., Paredes J., Tomasi P. 1973. Les traits géologiques essentiels des Andes centrales (Pérou-Bolívie). Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique 15 (1/2) : 73-114.

Références bibliographiques.

- Baby P., Hérail G., Lopez J.M., Lopez O., Oller J., Pareja J., Sempere T., Tuffiño D. 1989. Structure de la zone subandine de Bolivie : influence de la géométrie des séries sédimentaires antéorogéniques sur la propagation des chevauchements. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 309 : 1717-1722.
- Badaut D., Risacher F. 1983. Authigenic smectite on diatom frustules in Bolivian saline lakes. Geochimica Cosmochimica Acta, 47 : 363-375.
- Bakalowicz M. 1974. Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. 1. Relation entre minéralisation et conductivité. Annales de Spéléologie, 29 : 167-173.
- Bakalowicz M. 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse de doctorat d'état ès Sciences Naturelles, Univ. Paris VI, 269 p.
- Bakalowicz M., Mangin A. 1980. L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. Mémoire hors-série de la Société Géologique de France, 11 : 71-79.
- Baker V.R. 1978. Adjustment of fluvial systems to climate and source terrain in tropical and subtropical environments. Memoir of the Canadian Society of Petroleum Geologists, 5 : 211-230.
- Ballivián O., Bles J.L., Servant M. 1978. El plio-cuaternario de la región de La Paz (Andes orientales, Bolivia). Cahiers Orstom Série Géologie 10(1) : 101-113.
- Ballivián O., Risacher F. 1981. Les bassins à évaporites de l'Altiplano bolivien, les Salares. Publ. Orstom, Paris, 246 p.
- Balzan L. 1891. Da Asunción a La Paz. Boll. Soc. Geogr. Italiana 4 : 452-472 & 561-580.
- Balzan L. 1891. Da La Paz a Irupana. Boll. Soc. Geogr. Italiana 4 : 725-737.
- Balzan L. 1891. Da Irupana a Covendo. Boll. Soc. Geogr. Italiana 28 : 911-929.
- Balzan L. 1892. Da Covendo a Reyes. Boll. Soc. Geogr. Italiana 29 : 232-261.
- Balzan L. 1892. Da Reyes a Villabella. Boll. Soc. Geogr. Italiana 29 : 570-594.
- Balzan L. 1894. Da Villabella a Trinidad. Boll. Soc. Geogr. Italiana 31 : 61-74.
- Balzan L. 1894. Da Trinidad a Santa Cruz de la Sierra e Corumbà e ritorno al Paraguay. Boll. Soc. Geogr. Italiana 31 : 695-710.
- Bandelier A.F. 1905. The basin of Lake Titicaca. Bulletin of the American Geographical Society 37(8) : 449-460.
- Baptista Gumucio M. 1988. Potosí, patrimonio cultural de la humanidad, 9-132. *In* Potosí patrimonio cultural de la humanidad, Ed. Compañía Minera del Sur.
- Bard J.P., Botello R., Martínez C., Subieta T. 1974. Relations entre tectonique, métamorphisme et mise en place d'un granite éohercynien à deux micas dans la cordillère Real de Bolivie (massif de Zongo-Yani). Cahiers Orstom Série Géologie 6(1) : 3-18.
- Bariand P., Cesbron F., Geffroy J. 1977. Les minéraux, leurs gisements, leurs associations. Tome 1. Ed. Brgm, Orléans, 145 p.
- Barragán Guzmán M.C. 1990. Estudio sedimentológico de la cuenca andina del Río Beni. Tesis Umsa, La Paz, 267 p.
- Basu A.R., Sharma M., DeCelles P.G. 1990. Nd, Sr-isotopic provenance and trace element geochemistry of Amazonian foreland basin fluvial sands, Bolivia and Peru : implications for ensialic Andean orogeny. Earth and Planetary Science Letters, 100 : 1-17.
- Benavidez Fuentes C.F. 1988. Influencia de los cambios en el uso del suelo sobre el escurrimiento y la erosión en la cuenca del Río Pirai. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 241 p.
- 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.
- Béquio E.A.L., Lou W.C., Siciliano M.A., Silveira O.V. 1983. Interpretations of the sedimentological behaviour of the Tocantins-Araguaia basin, 141-151. *In* Hydrology of Humid Tropical Regions, Keller R. (ed.), IAHS Publ. 140.
- Bernard C. 1988. Les incas, peuple du soleil. Ed. Gallimard, Paris, 192 p.
- Berthois L., Hoorelbeck J. 1968. Etude dynamique de la sédimentation dans trois cours d'eau de la Guyane Française. Mémoires Orstom 26, Paris, 128 p.
- Beveridge M. 1983. Un estudio de los niveles de metales pesados en el Lago Poopó, Bolivia. 40 p.
- Bigarella J.J. 1973. Geology of the Amazon and Parnaíba basins, 25-86. *In* Ocean basins and margins : the South Atlantic.
- Billon B. 1968. Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). Cahiers Orstom Série Hydrologie 5(2) : 3-13.
- BMSA, Base Metal Synergy Associates. 1988. Evaluation of water sources in the Milluni Grande catchment, Bolivia. BMSA Report 225/88, 57 p.
- Boechat Lopes U., Menezes Santos U., Novikoff A. 1982. Etude limnologique des eaux du lac du Arroz (île de Careiro, Amazonie centrale, Brésil). Cahiers Orstom Série Géologie 12(2) : 147-164.
- Boero Rojo H. 1978. Bolivia Mágica. Ed. Los amigos del libro, La Paz, 640 p.
- Bordas M.P. 1991. An outline of hydrosedimentological zones in the Brazilian Amazon basin, 191-203. *In* Water Management of the Amazon Basin, Braga B.P.F. & Fernandez-Jauregui C. (eds.), Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo.

- Bordas M.P., Lanna A.E., Semmelmann F.R. 1988. Evaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques rudimentaires, 359-368. *In Sediment Budgets*, Bordas M.P. & Walling D.E. (eds.), IAHS Publ. 174.
- Boulangé B., Litherland M. 1978. Surfaces d'aplanissements en zone amazonienne de Bolivie (Région de San Ignacio de Velasco-Santa Cruz). *Cahiers Orstom Série Géologie* 10(1) : 145-151.
- Boulangé B., Rodrigo L.A., Vargas C. 1978. Morphologie, formation et aspects sédimentologiques du lac Poopó, Bolivie. *Cahiers Orstom Série Géologie* 10(1) : 69-78.
- Boulangé B., Aquize Jaen E. 1981. Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 14(4) : 269-287.
- Boulangé B., Vargas C., Rodrigo L.A. 1981. La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 14(4) : 299-309.
- Bourges J. 1986. La red hidrométrica del Phicab y los primeros resultados obtenidos, 37-43. *In 1<sup>er</sup> Symposium de la Investigación francesa en Bolivia*, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Bourges J. 1987. Projet de Cachuela Esperanza. Etude sommaire des apports. Publ. Phicab, La Paz, 20 p.
- Bourges J. 1988. Necesidad de una red hidrométrica para el desarrollo. Aplicación a la represa de Cachuela Esperanza, 90-97. *In 2<sup>do</sup> Simposio de la Investigación francesa en Bolivia*, C. Dejoux (ed.), Publ. Orstom, La Paz.
- Bourges J. 1989. La investigación hidrológica en el Beni : ejemplos de aplicación para el desarrollo de infraestructuras y previsión de crecidas, 9-22. *In 3<sup>er</sup> Simposio de la Investigación francesa en Bolivia*, Publ. Phicab, La Paz.
- Bourges J., Guyot J.L., 1989. Projet d'étude du bassin d'Achumani, La Paz, Bolivie. Publ. Phicab, La Paz, 12 p.
- Bourges J., Ribstein P. 1991. Bilan hydrologique de deux glaciers boliviens. Projet d'étude. Publ. Orstom, La Paz, 17 p.
- Bourges J., Hoorelbecke R. 1992. Régime des écoulements dans le système ando-amazonien. *In Journées Hydrologiques de l'Orstom*, Montpellier, Septembre 1992.
- Bourges J., Cortes J., Hoorelbecke R. 1987. Etude des débits du Rio Mamoré à Guayaramerin. Publ. Phicab, La Paz, 26 p.
- Bourges J., Guyot J.L., Hoorelbecke R., Roche M.A. 1990. Analysis of water flow and transportation of sediment in an Andes-Amazonian basin : the River Beni at Riberalta. *In Hydrology and Water management of the Amazon basin*, Manaus.
- Bourges J., Guyot J.L., Carrasco M., 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., Ribstein P., Hoorelbecke R., Dietze C., Cortes J. 1992. Precipitaciones y escurrimiento de una pequeña cuenca en zona de montaña : el Río Achumani (La Paz, Bolivia). *In Los recursos hídricos en Bolivia y su dimensión ambiental*, *AGID Geoscience*, 20 : 303-312.
- Bowles F.A., Fleischer P. 1985. Orinoco and Amazon river sediment input to the Eastern Caribbean Basin. *Marine Geology* 68 : 53-72.
- Brabben T.E. 1981. Use of turbidity monitors to assess sediment yield in East Java, Indonesia, 105-113. *In Erosion and Sediment Transport Measurement*, Florence, June 1981. IAHS Publ. 133.
- Bricquet J.P. 1989. Transports en solution et en suspension par le bassin du fleuve Congo. Bilan à Brazzaville en 1987, 131-146. *In Quatrième Journées Hydrologiques de l'Orstom*, Montpellier, Sept. 1988.
- Brinkmann W.L.F. 1970. Natural waters in Amazonia. *Amazoniana* 2(4) : 443-448.
- Brinkmann W.L.F. 1983. Nutrient balance of a central Amazonian rainforest : comparison of natural and man-managed systems, 153-463. *In Hydrology of Humid Tropical Regions*, Keller R. (ed.), IAHS Publ. 140.
- Brockmann C.E. 1978. Mapa de cobertura y uso actual de la tierra, Bolivia, memoria explicativa. Publ. Erts-Geobol, La Paz, 116 p.
- Brockmann C.E. 1986. Perfil ambiental de Bolivia. Publ. U.S. AID, La Paz, 166 p.
- Burz J. 1977. Sediment load discharge in the semi-arid region of northern Peru, 269-277. *In Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*, IAHS Publ. 122.
- Cabeza de Vaca D., Gutierrez de Escobar J., Vizcaino J. 1586. Descripción y relación de la ciudad de La Paz, 65-80. *In Relaciones Geográficas de Indias*, Perú, Tomo II. Tip. Hernández, Madrid, 1885.
- Callède J. 1974. Bassin versant représentatif de Sarki, République Centrafricaine. Publ. Orstom, Bangui, 121 p.
- Callède J., Hiez G., Jacon J. 1985. Pesquisas hidrológicas na Amazônia Brasileira. Publ. Dnaee, Brasília, 17 p.
- Callède J., Claudino L.J. 1987. Coopération franco-brésilienne en Amazonie : transmission par satellite des hauteurs d'eau de l'Amazone et de ses affluents. *In 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'Amazone et de ses affluents. *Hydrologie Continentale* 1(2) : 95-110.

Références bibliographiques.

- Camacho F., Montaña J.L., Guzman N. 1984. Inventario de nieves y hielos de Bolivia. *In Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur*, Santiago, Dic. 1984. Publ. Unesco.
- Campbell K.E., Frailey D. 1984. Holocene Flooding and Species Diversity in Southwestern Amazonia. *Quaternary Research* 21 : 369-375.
- Campbell K.E., Frailey C.D., Arellano J. 1985. The geology of the Rio Beni : further evidence for Holocene flooding in Amazonia. *Contributions in Science*, 364 : 1-18.
- Campos J., Dumont J.F. 1991. Estudio preliminar de fotos aéreas del Río Mamoré. Publ. Orstom, La Paz, 22 p.
- Carbonnel J.P., Meybeck M. 1975. Quality variations of the Mekong river at Phnom Penh, Cambodia, and chemical transport in the Mekong basin. *Journal of Hydrology*, 27 : 249-265.
- Carmouze J.P., Arze C., Quintanilla J. 1978. Circulación de materia (agua-sales disueltas) através del sistema fluvio-lacustre del Altiplano : la regulación hidrica é hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó. *Cahiers Orstom Série Géologie* 10(1) : 49-68.
- Carmouze J.P., Arze C., Quintanilla J. 1981. Régulation hydrochimique du lac Titicaca et l'hydrochimie de ses tributaires. *Revue d'hydrobiologie tropicale*, 14(4) : 329-348.
- Carmouze J.P., Aquize E., Arze C., Quintanilla J. 1983. Le bilan énergétique du lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 16(2) : 135-144.
- Carmouze J.P., Arze C., Quintanilla J. 1984. Le lac Titicaca : stratification physique et métabolisme associé. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 17(1) : 3-11.
- Carn M., Laubacher G., Gelot J.L., Valdivia E., Delgado M., Fornari M., Hérail G., Jungbluth R., Macedo O., Marocco R., Rodriguez W., Zegarra J., Camones E. 1990. Prospección eléctrica en placeres fluvio-glaciales de oro del distrito de Ananea. *Géodynamique* 5(1) : 3-16.
- Carney H.J. 1984. Productivity, population growth and physiological responses to nutrient enrichments by phytoplankton of Lake Titicaca, Peru-Bolivia. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22 : 1253-1257.
- Carrasco Nattes M. 1990. Estudio del regimen del escurrimiento superficial en la cuenca andina del Rio Beni. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz.
- Carre P. 1972. Quelques aspects du régime des apports fluviatiles de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cahiers Orstom Série Hydrologie* 9(1) : 19-45.
- Carvajal Fernandez J. 1988. Climatología e hidrología, estudio de crecidas por el modelo Hymo 10 en la cuenca del Rio Pirai, Amazonia andina, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 276 p.
- Castany G. 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed. Dunod, Paris, 236 p.
- Cehak K., Kessler A. 1976. Varianzspektrumanalyse der Seespiegelschwankungen des Titicaca-Sees (Südamerika). *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B*, 24 : 201-208.
- Chabert J. 1967. Les grottes de Toro-Toro, Bolivie. *Grottes et Gouffres* 39 : 25-27.
- Chavez M. 1926. Eldorado boliviano. Imp. Renacimiento, La Paz, 240 p.
- Chavez G.A. 1987. Generación de crecidas en la cuenca del Rio Ichilo en base al modelo matemático HUIG, Amazonia, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 276 p.
- Chávez Suárez J. 1986. Historia de Moxos. Ed. Don Bosco, La Paz, 506 p.
- Chouret A. 1977. Régime des apports fluviatiles de matériaux solides en suspension vers le Lac Tchad : synthèse des études de l'ORSTOM en République du Tchad, 126-133. *In Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*, Paris, July 1977. IAHS Publ. 122.
- Clocchiatti R., Leribault L., Rodrigo L.A. 1978. Endoscopie et exoscopie de grains de quartz des formations du Pliocène et du Quaternaire de La Paz, Bolivie. *Cahiers Orstom série Géologie*, 10(1) : 127-143.
- Cochrane T.T. 1973. El potencial agrícola del uso de la tierra en Bolivia; un mapa de sistemas de tierras. Ed. Don Bosco, La Paz, 826 p.
- Colinvaux P, Miller M.C., Liu K.B., Steinitz-Kannan M., Frost I. 1985. Discovery of permanent Amazon lakes and hydraulic disturbance in the upper Amazon basin. *Nature* 313 : 42-45.
- Colinvaux P. 1987. Amazon diversity in light of the Paleocological record. *Quaternary Science Reviews* 6 : 93-114.
- Collot D. 1980. Les macrophytes de quelques lacs andins : lac Titicaca, lac Poopó, lacs des vallées d'Ichu Kkota et d'Ovehuyo. Publ. Orstom, Paris, 115 p.
- Colomb C. 1492-1493. Journal de bord. Trad. S. Estorach & M. Lequenne. Ed. Maspero, Paris, 1989, 235 p.
- Colombani J. 1967. Note sur les instruments et les méthodes utilisés pour la mesure des débits solides en suspension du Mono au Togo, 517-528. *In River Morphology*, Bern, Oct. 1967. IAHS Publ. 75.
- Colombani J. 1967. Contribution à la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension. *Cahiers Orstom Série Hydrologie* 4(2) : 27-36.
- Colombani J., Fritsch J.M., Susini J. 1981. Dispositif de prélèvement automatique d'un échantillon moyen de transport solide en suspension pondéré en fonction du débit, et dispositif de mesure par électrodes spécifiques des concentrations en solutés, 131-136. *In Erosion and Sediment*

- Transport Measurement, Florence, June 1981. IAHS Publ. 133.
- Conway M. 1899. Explorations in the bolivian Andes. The Geographical Journal 14(1) : 14-34.
- Corbel J. 1964. L'érosion terrestre, étude quantitative. Annales de Géographie 398 : 385-412.
- Corbin D., Guyot J.L., Calle H., Quintanilla J. 1988. Datos fisico-químicos de los medios acuáticos de la zona del Mamoré central, región de Trinidad, Amazonia boliviana. Publ. Orstom, La Paz, N°8, 58 p.
- Cordova E.M. 1988. Etude hydrographique, hydrologique et sur modèle réduit du fleuve Ichilo-Mamoré. Mémoire d'Ingénieur en Hydrologie, Univ. Cath. de Louvain, 245 p.
- Costa Barros M., Praciano Garcia L.M., Hiez G., Rancan L., Oliveira E. de. 1985. Bacia do Rio Amazonas. Boletim Pluviométrico, P-1.01, Publ. Dnaee, Brasília, 116 p.
- Coudrain-Ribstein A., Héral G., Martínez J., Bergeron M., Viscarra G., Ruiz J.A., Thompson C.J. 1992. Estudio de la presencia de oro en las aguas de yacimientos de oro aluvial de Bolivia (Tipuani y Suches). In 10<sup>mo</sup> Congreso Geológico Boliviano, La Paz, Octubre de 1992.
- Crespo L.S. 1901. Monografía de la ciudad de La Paz. Boletín de la Sociedad Geográfica de La Paz 7, 8 : 237-268.
- Cruz Llanos C. 1987. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Itenez, Amazonia, Bolivia, Brasil. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 216 p.
- 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.
- Custode E., Viennot M. 1986. El riesgo de erosión en la región Amazónica, 79-88. In La erosión en Ecuador, Cedig, Quito.
- Dall'Olio A., Salati E., Tatagiba de Azevedo C., Matsui E. 1979. Modelo de fracionamento isotópico da água na bacia Amazônica (Primeira aproximação). Acta Amazônica 9(4) : 675-687.
- Damuth J.E., Fairbridge R.W. 1970. Equatorial atlantic deep-sea arkosic sands and ice-age aridity in tropical South America. Geological Society of America Bulletin 81 : 189-206.
- Damuth J.E., Kumar N. 1975. Amazon cone : Morphology, Sediments, Age, and Growth Pattern. Geological Society of America Bulletin 86 : 863-878.
- Davis L.C. 1964. The Amazon's Rate of Flow. Natural History 73 : 14-19.
- Day J.A., Davies B.R. 1986. The Amazon River system, 289-318. In The Ecology of River Systems, Davies B.R. & Walker K.F. (eds.), W. Junk, Dordrecht.
- De Noni G., Trujillo G. 1986. La erosión actual en Ecuador : localización, manifestaciones y causas, 5-14. In La erosión en Ecuador, Cedig, Quito.
- De Noni G., Trujillo G., Viennot M. 1986. L'érosion et la conservation des sols en Equateur. Cahiers Orstom Série Pédologie 22(2) : 235-245.
- DeCelles P.G., Hertel F. 1989. Petrology of fluvial sands from the Amazonian foreland basin, Peru and Bolivia. Geological Society of America Bulletin, 101 : 1552-1562.
- Degens E.T., Kempe S., Richey J.E. 1991. Summary : 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, Chichester.
- Denevan W.M. 1966. La geografía cultural aborigen de los llanos de Mojos. Trad. J.M. Barnadas, Ed. Juventud, 1980, La Paz, 272 p.
- Denevan W.M. 1970. Aboriginal drained-field cultivation in the Americas. Science 169 : 647-654.
- Depetris P.J., Griffin J.J. 1968. Suspended load in the Rio de La Plata drainage basin. Sedimentology, 11 : 53-60.
- Depetris P.J., Lenardón A.M.L. 1982. Particulate and dissolved phases in the Paraná River. Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg, Scope/Unep Sonderband, 52 : 385-395.
- Depetris P.J., Paolini J.E. 1991. Biogeochemical aspects of South American Rivers : the Parana and the Orinoco, 105-125. In Biogeochemistry of Major World Rivers, Scope 42, Degens E.T., Kempe S., Richey J.E. (eds.), J. Wiley, Chichester.
- Depraetere C. 1991. Demiurge 2.0. Chaîne de production et de traitement de modèles numériques de terrain. Ed. Orstom, Paris, 123 p.
- Devol A.H., Zaret T.M., Forsberg B.R. 1984. Sedimentary organic matter diagenesis and its relation to the carbon budget of tropical Amazon floodplain lakes. Verh. Internat. Verein. Limnol. 22 : 1299-1304.
- Devol A.H., Quay P.D., Richey J.E., Martinelli L.A. 1987. The role of gas exchange in the inorganic carbon, oxygen, and <sup>222</sup>Rn budgets of the Amazon River. Limnology and Oceanography 32(1) : 235-248.
- Díaz Arguedas J. 1971. Expedicionarios y exploradores del suelo boliviano. La Paz, 198 p.
- Díaz A., Mazo F., Pasten R., Stache R. 1990. Estudio geológico-geomorfológico de las cuencas Irapavi-Achumani, La Paz. Revista Técnica de YPF, 11(2/3) : 243-258.
- Dickinson W.T. 1981. Accuracy and precision of suspended sediment loads, 195-202. In Erosion and Sediment Transport Measurement, Florence, June 1981. IAHS Publ. 133.

Références bibliographiques.

- Djuwansah M., Delaune M., Marius C. 1992. Sédimentologie des formations Holocènes de la Guyane française, 133-149. In Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le Quaternaire, M.T. Prost (ed.), Ostom, Paris.
- Dobrovoly E. 1969. Un torrente de barro de gran volúmen, post-glacial en el valle de La Paz, Bolivia. Bol. Sec. Geol. Bol., 12 : 5-17.
- Douglas I. 1967. Natural and man-made erosion in the humid tropics of Australia, Malaysia and Singapore, 17-30. In Symposium on River Morphology, Bern, Oct. 1967. IAHS Publ. 75.
- Drago E.C., Amsler M.L. 1988. Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná River: concentration, granulometry and influence of the main tributaries, 381-396. In Sediment Budgets, Bordas P. & Walling D.E. (eds.). IAHS Publ. 174.
- Dubreuil P. 1969. Recueil quadrilingue de mots usuels en hydrologie. Publ. Orstom, Paris, 113 p.
- Dubreuil P., Guiscafne J., Nouvelot J.F., Olivry J.C. 1975. Le bassin de la rivière Sanaga. Monographies Hydrologiques de l'Orstom 3, 350 p.
- Duchaufour P. 1991. Pédologie. Ed. Masson, Paris, 289 p.
- Dumont J.F. 1988. Importancia de las deformaciones recientes sobre la estructuración geografica de la baja amazonia peruana. Folio Amazonico 1(1) : 63-70.
- Dumont J.F., Lamotte S., Kahn F. 1990. Wetland and upland forest ecosystems in Peruvian Amazonia : plant species diversity in the light of some geological and botanical evidence. Forest Ecology and Management 33/34 : 125-139.
- Dumont J.F., Hérail G., Guyot J.L. 1991. Subsistencia, inestabilidad y repartición de los placeres distales de oro. El caso del Río Beni (Bolivia), 43-46. In International Symposium on Alluvial Gold Placers, G. Hérail (ed.), La Paz.
- Dunne T. 1979. Sediment Yield and land use in tropical catchments. Journal of Hydrology, 42 : 281-300.
- Eder F.J. 1772. Breve descripción de las reducciones de Mojos. Trad. J.M. Barnadas, Ed. Historia Boliviana, 1985, Cochabamba, 424 p.
- Edwards A.M.C., Thornes J.B. 1970. Observations on the Dissolved Solids of the Casiquiare and Upper Orinoco, April-June, 1968. Amazoniana 2(3) : 245-256.
- Eisma D., Van der Marel. 1971. Marine muds along the Guyana Coast and their origin from the Amazon basin. Contributions to Mineralogy and Petrology, 31 : 321-334.
- Eisma D., Van der Gaast S.J., Martin J.M., Thomas A.J. 1978. Suspended matter and bottom deposits of the Orinoco delta : turbidity, mineralogy and elementary composition. Netherlands Journal of Sea Research 12(2) : 224-251.
- Eisma D., Kalf J., Van der Gaast S.J. 1978. Suspended matter in the Zaïre estuary and adjacent Atlantic Ocean. Netherlands Journal of Sea Research 12(3/4) : 382-406.
- Ellenberg H. 1981. Desarrollar sin destruir, repuestas de un ecólogo a 15 preguntas de agrónomos y planificadores bolivianos. Publ. Umsa, La Paz, 55 p.
- Emmett W.W. 1981. Measurement of bed load in rivers, 3-15. In Erosion and Sediment Transport Measurement, Florence, June 1981, IAHS Publ. 133.
- ENDE, Empresa Nacional de Electricidad S.A. 1980. Proyecto hidroelectrico Sakhahuaya, Hidrologia y sedimentologia. Publ. Ende, Cochabamba, 121 p.
- ENDE, Empresa Nacional de Electricidad S.A. 1985. Proyecto hidroelectrico Cachuela Esperanza. Estudio de factibilidad. Publ. Ende, Cochabamba, 62 p.
- Ertel J.R., Hedges J.I., Devol A.H., Richey J.E., Nazaré Góes Ribeiro M. 1986. Dissolved humic substances of the Amazon River System. Limnology and Oceanography 31(4) : 739-754.
- Espinoza Torrico O. 1985. Balance hidrico superficial de la cuenca del Río Beni, Amazonia, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 181 p.
- Esser G., Kohlmaier G.H. Modelling terrestrial sources of Nitrogen, Phosphorus, Sulfur and Organic Carbon to rivers, 297-322. In Biogeochemistry of Major World Rivers, Scope 42, Degens E.T., Kempe S., Richey J.E. (eds.), J. Wiley, Chichester.
- Fabre G., Guyot J.L. 1984. Première série continue de jaugeages sur la fontaine de Nimes (Gard). Données et interprétations des principaux résultats. Travaux ERA 282 du CNRS, 13 : 65-78.
- Fawcett, P.H. 1953. A Traves de la Selva Amazonica, Exploración Fawcett. Trad. E. Mützel & L. Larrain del Campo. Ed. Rodas, 1974, Madrid, 459 p.
- Ferguson R., Stott T., Johnson D. 1987. Forestry and sediment yields in upland Scotland, 499-500. In Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, Beschta R.L. & al. (eds.). IAHS Publ. 165.
- Fernandes D. 1987. Inventário das estações fluviométricas, Publ. Dnaee, Brasília.
- Fernandez Jauregui C.A., Roche M.A., Aliaga A., Peña J. 1987. Los recursos hídricos en Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 20 p.
- Ferreira J.R., Devol A.H., Martinelli L.A., Forsberg B.R., Victoria R.L., Richey J.E., Mortatti J. 1988. Chemical composition of the Madeira river: seasonal trends and total transport. Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg, Scope/Unep Sonderband 66 : 63-75.
- Fittkau E.J. 1964. Remarks on limnology of central Amazon rain forest streams. Verh. Internat. Verein. Limnol. 15 : 1092-1096.

- Fittkau E.J. 1974. Zur ökologischen Gliederung Amazoniens. I. Die erdgeschichtliche Entwicklung Amazoniens. Amazoniana 5(1) : 77-134.
- Fontes J.C., Boulangé B., Carmouze J.P., Florkowski T. 1979. Preliminary Oxygen 18 and Deuterium study of the dynamics of Lake Titicaca. Isotopes in Lake studies : 145-150.
- Fornari M., Hérail G., Viscarra G., Laubacher G., Argollo J. 1987. Sédimentation et structure du bassin de Tipuani-Mapiri : un témoin de l'évolution du front amazonien des Andes du Nord de la Bolivie. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 305 : 1303-1308.
- Forsberg B.R., Devol A.H., Richey J.E., Martinelli L.A., Dos Santos H. 1988. Factors controlling nutrient concentrations in Amazon floodplain lakes. Limnology and Oceanography 33(1) : 41-56.
- Forti C., Moreira Nordemann L.M. 1991. An ion budget for a "Terra Firme" rainforest in central amazonia, 13-17. In Water Management of the Amazon Basin, Braga B.P.F. & Fernandez-Jauregui C. (eds.), Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo.
- Fournier F. 1960. Débit solide des cours d'eau. Essai d'estimation de la perte en terre subie par l'ensemble du globe terrestre, 19-22. In Commission of Land Erosion, Helsinki, IAHS Publ. 53.
- Fox L.E., Sager S.L., Wofsy S.C. 1986. The chemical control of soluble phosphorus in the Amazon estuary. Geochimica et Cosmochimica Acta 50 : 783-794.
- Franco B., Pizarro L. 1985. El Niño y la sequía en los altos Andes centrales (Perú y Bolivia). Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines 14(1/2) : 1-18.
- Franken W., Leopoldo P.R. 1984. Hydrology of catchment areas of Central Amazonian forest Streams, 501-519. In The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Franzinelli E., Potter P.E. 1983. Petrology, chemistry and texture of modern river sands, Amazon river system. Journ. Geol., 91 : 23-39.
- Franzinelli E., Potter P.E. 1985. Areias recentes dos rios da bacia amazônica : composições petrográfica, textural e química. Revista Brasileira de Geociências, 15 : 213-220.
- Fränzle O. 1979. The Water Balance of the Tropical Rain Forest of Amazonia and the Effects of Human Impact. Applied Sciences : 88-117.
- Frécaut R., Pagny P. 1983. Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial. Ed. Masson, 239 p.
- Frias Cornejo R. 1989. Balance hidrico superficial de la cuenca de los rios Bermejo y Grande de Tarija, Rio de La Plata, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 263 p.
- Fritsch J.M. 1983. Evolution des écoulements, des transports solides à l'exutoire et de l'érosion sur les versants d'un petit bassin après défrichement mécanisé de la forêt tropicale humide, 197-214. In Hydrology of Humid Tropical Regions with Particular Reference to the Hydrological Effects of Agriculture and Forestry Practice, Keller R. (Ed.), IAHS Publ. 140.
- Fritsch J.M. 1987. Ecoulements et érosion sous prairies artificielles après défrichement de la forêt tropicale humide, 123-129. In Forest Hydrology and Watershed Management, Swanson R.H., Bernier P.Y. & Woodard P.D. (eds.), IAHS Publ. 167.
- Fritsch J.M. 1990. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Thèse de Doctorat, Montpellier, 392 p.
- Fritsch J.M., Sarrailh J.M. 1986. Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement de pâturages. Cahiers Orstom Série Pédologie 22(2) : 209-222.
- Frontaura Argandoña M. 1971. Descubridores y exploradores de Bolivia. Ed. Los Amigos del libro, La Paz, 316 p.
- Furch K. 1976. Haupt und Spurenmetallgehalte Zentralamazonischer Gewässertypen (Erste Ergebnisse). Biogeographica 7 : 27-43.
- Furch K. 1982. Jahreszeitliche chemische Veränderungen in einem Várzea-See des mittleren Amazonas (Lago Calado, Brasilien). Arch. Hydrobiol. 95(1/4) : 47-67.
- Furch K. 1984. Seasonal variation of the major cation content of the várzea-lake Lago Camaleao, middle Amazon, Brazil, in 1981 and 1982. Verh. Internat. Verein. Limnol. 22 : 1288-1293.
- Furch K. 1984. Water chemistry of the Amazon basin : The distribution of chemical elements among freshwaters, 167-199. In The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Furch K. 1986. Hydrogeochemistry of Amazonian Freshwaters along the Transamazônica in Brazil. Zbl. Geol. Paläont. Teil I (9/10) : 1485-1493.
- Furch K., Klinge H. 1978. Towards a regional characterization of the biogeochemistry of Alkali and Alkali-Earth metals in Northern South America. Acta Cientifica Venezolana 29 : 434-444.
- Furch K., Junk W.J. 1980. Water Chemistry and Macrophytes of Creeks and Rivers in Southern Amazonia and the central Brazilian Shield. Tropical Ecology and Development : 771-796.
- Furch K., Junk W.J. 1985. Dissolved Carbon in a floodplain lake of the Amazon and in the River Channel. Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg 58 : 285-298.
- Furch K., Klinge H. 1989. Chemical relationships between vegetation, soil and water in contrasting inundation areas of Amazonia, 189-204. In Mineral Nutrients in Tropical Forest and Savanna Ecosystems, Proctor J. (ed.), Blackwell, Oxford.

Références bibliographiques.

- Furch K., Junk W.J., Klinge H. 1982. Unusual chemistry of natural waters from the Amazon region. Acta Cientifica Venezolana 33 : 269-273.
- Furch K., Junk W.J., Dieterich J., Kochert N. 1983. Seasonal variation in the major cation (Na, K, Mg, and Ca) content of the water of Lago Camaleao, an Amazonian floodplain lake near Manaus, Brazil. Amazoniana 8(1) : 75-89.
- Gac J.Y. 1980. Géochimie du bassin du Lac Tchad. Travaux et documents de l'Orstom 123 : 251 p.
- Gac J.Y., Kane A. 1986. Le fleuve Sénégal: I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulières à l'embouchure. Bulletin des Sciences Géologiques 39(1) : 99-130.
- Galeano E. 1971. Les veines ouvertes de l'Amérique latine, une contre-histoire. Trad. C. Couffon, Ed. Plon, 1981, Paris, 468 p.
- García Hühn W. 1985. Balance hídrica superficial de la cuenca del Río Mamoré, Amazonia, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 110 p.
- García Sánchez J. 1987. El Río que se aleja, Cambio del curso del Amazonas. Publ. Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía, Iquitos, 57 p.
- Garner H.F. 1959. Stratigraphic Sedimentary significance of contemporary climate and relief in four regions of the Andes mountains. Bulletin of the Geological Society of America 70 : 1327-1368.
- Garrels R.M., Mackenzie F.T. 1971. Gregor's denudation of the continents. Nature 231 : 382-383.
- Geisler R. 1969. Untersuchungen über den Sauerstoffgehalt, den biochemischen Sauerstoffbedarf und den Sauerstoffverbrauch von Fischen in einem tropischen Schwarzwasser (Rio Negro, Amazonien, Brasilien). Arch. Hydrobiol. 66(3) : 307-325.
- Gentry A.H., López Parodi J. 1980. Deforestation and increased flooding of the upper Amazon. Science 210 : 1354-1356.
- Gessner F. 1960. Limnologische Untersuchungen am Zusammenfluss des Rio Negro und des Amazonas (Solimoes). Int. Revue ges. Hydrobiol. 45(1) : 55-79.
- Gessner F. 1960. Ensayo de una comparación química entre el Rio Amazonas, el Rio Negro y el Rio Orinoco. Acta Cientifica Venezolana 11(2) : 63-64.
- Gheerbrant A. 1988. L'Amazonie, un géant blessé. Ed. Gallimard, Paris, 192 p.
- 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. 1970. Mechanisms controlling World Water Chemistry. Science 170 : 1088-1090.
- 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.
- Gilson H.C. 1964. Lake Titicaca. Verh. Internat. Verein. Limnol. 15 : 112-127.
- Godot J.M., Hieronymus B., Kotschoubey B., Boulègue J. 1990. Influência do substrato geológico e dos processos de alteração na composição das águas de alguns rios e ribeirões entre Belém e Imperatriz (estados do Pará e do Maranhão), 889-895. In Congresso Brasileiro de Geologia, Anais 36, Vol. 2.
- Gordeev V.V., Miklishansky A.Z., Migdisov A.A., Artemyev V.E. 1985. Rare Element Distribution in the Surface Suspended Material of the Amazon River, some of its Tributaries and Estuary. Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg 58 : 225-243.
- Gordeev V.V., Oreshkin V.N. 1990. Silver, Cadmium and Lead in Waters of the Amazon Basin and the Estuary (en russe). Geochimica 2 : 244-256.
- Goswami D.C. 1985. Brahmaputra River, Assam, India: Physiography, Basin Denudation, and Channel Aggradation. Water Resources Research 21(7) : 959-978.
- Goulding M. 1979. Ecologia da pesca do Rio Madeira. Publ. Inpa, Manaus, 172 p.
- Gouze P., Argollo J., Saliège J.F., Servant M. 1986. Interprétation paléoclimatique des oscillations des glaciers au cours des 20 derniers millénaires dans les régions tropicales; exemple des Andes boliviennes. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris 303(3) : 219-224.
- Grabert H. 1967. Sobre o desaguamento natural do sistema fluvial do Rio Madeira desde a construção dos Andes, 209-214. In Biotá Amazônica, Belem, 1966.
- Grabert H. 1971. Die Wasserfallstrecke des Rio Madeira (Territorium Rondônia, Brasilien) als Rest einer vortertiären Wasserscheide zwischen dem Atlantik und dem Pazifik. Erde, Z. Ges. Erdkunde 102 : 53-62.
- Graf K. 1981. Palynological investigations of two post-glacial peat bogs near the boundary of Bolivia and Peru. Journal of Biogeography 8 : 353-368.
- Graf K. 1984. Karstphänomene in den bolivianischen Anden. Geographica Helvetica 1 : 17-25.
- Green J. 1970. Freshwater ecology in the Mato Grosso, Central Brazil. 1. The conductivity of some natural waters. J. Nat. Hist. 4 : 289-299.
- Grobler D.C., Weaver A.V.B. 1981. Continuous measurement of suspended sediment in rivers by means of a double beam turbidity meter, 97-103.

- In Erosion and Sediment Transport Measurement, Florence, June 1981. IAHS Publ. 133.
- Grove A.T. 1972. The dissolved and solid load carried by some west african rivers : Senegal, Niger, Benue, and Shari. Journal of Hydrology, 16 : 277-300.
- GTZ, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. 1981. Programa de Irrigación Altiplano-Valles. Publ. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios, La Paz, 45 p.
- GTZ, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. 1985. La erosión y su control en la cuenca alta del Rio Pirai. Publ. Gtz, Santa Cruz, 73 p.
- Guimarães V.S., Jacon G. 1983. Calibragem em estações fluviométricas da bacia amazônica. Aplicação do método do gradiente linimétrico, 233-241. In 5to Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Blumenau, Nov. 1983.
- Gumiel D. 1988. Prospección hidrogeológica del area altiplanica del PMPR II. Publ. CEE/CordePaz, La Paz, 92 p.
- Gurnell A.M., Warburton J., Clark M.J. 1988. A comparison of the sediment transport and yield characteristics of two adjacent glacier basins, Val d'Hérens, Switzerland, 431-441. In Sediment Budgets, M.P. Bordas & D.E. Walling (eds.), IAHS Publ. 174.
- Guyot J.L. 1983. La zone non saturée dans l'aquifère karstique. Analyse des écoulements hypodermiques sur périmètre expérimental. Rôle de la zone non saturée dans la différenciation des régimes de deux sources karstiques (Monts de Pardailhan, Montagne Noire). Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, USTL, Montpellier, 229 p.
- Guyot J.L. 1986. Les monts de Pardailhan. Etude hydrodynamique et hydrochimique des sources karstiques de Poussarou et Malibert, Montagne Noire, Hérault. Karstologia, 7 : 25-30.
- Guyot J.L. 1986. Evolución en el espacio y el tiempo de las concentraciones de materia en solución y en suspensión de las aguas de la cuenca amazónica de Bolivia, 48-53. In 1<sup>er</sup> Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia, La Paz, Sept. 1986. Publ. Orstom, La Paz.
- Guyot J.L. 1992. Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux, 362 p.
- Guyot J.L., Héral G. 1989. Placer mining operations and modifications of the physical chemical nature of the waters of the Rio Kaka drainage basin (Andes, Bolivia), 115-121. In Sediment and the Environment, Hadley R.F. & Ongley E.D. (Eds.). IAHS Publ. 184.
- 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., Gumiel D. 1990. Premières données sur l'hydrogéologie et l'hydrogéochimie du Nord de l'Altiplano bolivien. Hydrogéologie, 3 : 159-164.
- Guyot J.L., Calle H., Quintanilla J., Calliconde M. 1987. Resultados de una campaña de muestreo en periodo de aguas bajas en la Amazonia boliviana. Revista Boliviana de Quimica 7(1) : 36-50.
- Guyot J.L., Bourges J., Hoorelbecke R., Roche M.A., Calle H., Cortes J., Barragan M.C. 1988. Exportation de matières en suspension des Andes vers l'Amazonie par le Rio Beni, Bolivie, 443-451. In Sediment Budgets, M.P. Bordas & D.E. Walling (eds.), IAHS Publ. 174.
- Guyot J.L., Calle H., Cortes J., Barragan M.C. 1988. Aportaciones de sedimentos por el Rio Beni a los sitios potenciales de presas, 107-113. In 2<sup>do</sup> Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Guyot J.L., Corbin D., Quintanilla J., Calliconde M., Calle H. 1988. Caracterización físico-química de los rios y lagunas de la cuenca amazónica de Bolivia, 98-106. In 2<sup>do</sup> Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Guyot J.L., Bourges J., Calle H., Cortes J., Hoorelbecke R., Roche M.A. 1989. Transport of suspended sediments to the Amazon by an andean river : the River Mamore, Bolivia, 106-113. In River Sedimentation, IRTCES, Beijing, November 1989.
- Guyot J.L., Bourges J., Roche M.A. 1989. Transporte de sedimentos y materias disueltas en la cuenca amazónica de Bolivia, 1-8. In 3<sup>er</sup> Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, Publ. Phicab, La Paz.
- Guyot J.L., Roche M.A., Bourges J. 1989. Etude de la physico-chimie des eaux et des suspensions des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne : l'exemple du Rio Beni, 13-41. In 4<sup>èmes</sup> Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Septembre 1988.
- Guyot J.L., Wasson J.G., Sanejouand H., Quintanilla J., Calle H. 1989. Primera evaluación del impacto de la ciudad de La Paz sobre el medio amazónico. Evaluación de la físico-química y del carbono organico total (COT) a lo largo del Río La Paz-Boopi, 31-38. In Simposio sobre la preservación del medio ambiente, La Paz, Octubre 1989.
- Guyot J.L., Baby P., Kaiser C., Marcantoni O., Perret J.F. 1990. Les principales cavités du massif de Torotoro, Andes tropicales de Bolivie. Spelunca 37 : 25-28.
- Guyot J.L., Bourges J., Jouanneau J.M., Quintanilla J., Calle H., Gallardo H., Barragan M.C., Wasson J.G. 1990. Evolution of dissolved and sediment loads, during the flood of an andean tributary of the Amazon (March 1988) : the Beni river at Rurrenabaque, Bolivia. In Hydrology and Water management of the Amazon basin, Manaus.

Références bibliographiques.

- 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., Roche M.A., Noriega L., Calle H., Quintanilla J. 1990. Salinities and Sediment Transport in the Bolivian Highlands. Journal of Hydrology 113 : 147-162.
- Guyot J.L., Bourges J., Corfés J., Jouanneau J.M., Quintanilla J., Roche M.A. 1991. Regimes hidroquímicos e dos sedimentos dos rios da bacia amazônica da Bolívia, 149-158. In IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, Novembro 1991, Publ. ABRH.
- Guyot J.L., Corbin D., Quintanilla J., Calle H. 1991. Hydrochimie des lacs dans la région de Trinidad (Amazonie bolivienne). Influence d'un fleuve andin : le Rio Mamoré. Revue d'Hydrobiologie Tropicale 24(1) : 3-12.
- Guyot J.L., Wasson J.G., Quintanilla J., Calle H. 1992. Dissolved matter and suspended sediment loads in some inflow rivers and in the Rio Desaguadero, 113-119. In Lake Titicaca, Dejoux C. & Itis A. (eds.), Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- Hach Company. 1982. Manuel de l'analyse de l'eau. Trad. I. & A. Dugas, Cofradis, 379 p.
- Haenke T. 1799. Introducción a la historia natural de la provincia de Cochabamba y circunvecinas, 15-113. In Tadeo Haenke, su obra en los Andes y la selva boliviana, G. Ovendo-Sanz (ed.), Los Amigos del libro, 1974, La Paz.
- Haenke T. 1799. Memoria sobre los rios navegables que fluyen al Marañon, 117-140. In Tadeo Haenke, su obra en los Andes y la selva boliviana, G. Ovendo-Sanz (ed.), Los Amigos del libro, 1974, La Paz.
- Hastenrath S. 1971. Beobachtungen zur Klima-Morphologischen Höhenstufung der Cordillera Real (Bolivien). Erkunde 25(2) : 102-108.
- Hastenrath S. 1985. A review of Pleistocene to Holocene glacier variations in the tropics. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 21 : 183-194.
- Hastenrath S., Kutzbach J. 1985. Late Pleistocene Climate and Water Budget of the South American Altiplano. Quaternary Research 24 : 249-256.
- Heath E.R. 1882. La exploración del Rio Beni. Trad. M.V. Ballivian, Imp. de la Revolución, 1896, La Paz, 89 p.
- Hedges J.I., Clark W.A., Quay P.D., Richey J.E., Devol A.H., Dos Santos U. 1986. Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. Limnology and Oceanography 31(4) : 717-738.
- Hedges J.I., Ertel J.R., Quay P.D., Grootes P.M., Richey J.E., Devol A.H., Farwell G.W., Schmidt F.W., Salati E. 1986. Organic Carbon 14 in the Amazon River System. Science 231 : 1129-1131.
- Hegewald E., Runkel K.H. 1981. Investigations on the lakes of Peru and their phytoplankton. 6. Additional chemical analyses. Arch. Hydrobiol., 92(1) : 31-43.
- Hegewald E., Aldave A., Hakuli T. 1976. Investigations on the lakes of Peru and their phytoplankton. 1. Review of literature, description of the investigated waters and chemical data. Arch. Hydrobiol., 78(4) : 494-506.
- Hérail G. 1986. Geodinamica de las cuencas andinas y substancias minerales de interes economico asociadas : los yacimientos aluviales de oro del Norte de Bolivia, 58-62. In 1<sup>er</sup> Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia, La Paz, Sept. 1986. Publ. Orstom, La Paz.
- Hérail G., Viscarra G. 1988. El cauce antiguo del Rio Tipuani : analisis sedimentologico y tectonico e implicaciones para la prospección minera. Publ. Orstom, La Paz, 14 p.
- Hérail G., Argollo J., Fornari M., Laubacher G., Viscarra G. 1986. El distrito de Tipuani. Geologia e historia, parte 1. Khrysos, 1(2) : 9-15.
- Hérail G., Ruiz E., Argollo J., Fornari M., Laubacher G., Viscarra G. 1986. El distrito de Tipuani. Geologia e historia, parte 2. Khrysos, 1(3) : 7-14.
- Hérail G., Fornari M., Miranda V., Viscarra G. 1988. Découverte de nouvelles minéralisations primaires d'or dans la cordillère Royale de Bolivie à partir de l'analyse morphoscopique de paillettes d'or prélevées en alluvion. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 307 : 63-69.
- Hérail G., Miranda V., Fornari M. 1988. Los placeres de Oro de la región de Mapiri y sus fuentes primarias. Publ. Orstom, La Paz, 30 p.
- Herbas C.H. 1987. Climatología de la cuenca andina y amazonica del Rio Grande, Bolivia. Tesis Umsa. Publ. Phicab, La Paz, 237 p.
- Hiez G. 1987. Bases théoriques du vecteur régional, les premières applications et leur mise en oeuvre informatique, 1-36. In 2<sup>èmes</sup> Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Septembre 1986.
- Hiez G., Dubreuil P. 1964. Les régimes hydrologiques en Guyane française. Orstom, Paris, 119 p.
- Hiez G., Cochonneau G., Séchet P., Fernandes U.M. 1991. Aplicação do método do vetor regional à análise da pluviometria anual da bacia amazônica. Metodologia e primeiros resultados, 158-167. In 9<sup>no</sup> Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Rio de Janeiro, Anais 1.
- 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.
- Holeman J.N. 1968. The sediment Yield of Major Rivers of the World. Water Resources Research 4(4) : 737-747.

- Holtz R.K., Baker V.R. 1979. An examination of fluvial morphological characteristics of western Amazon streams from Apollo-Soyuz photographs. Satellite Hydrology, 6 : 252-259.
- Holtzapffel T. 1985. Les minéraux argileux, préparation, analyses diffractométriques et détermination. Publ. N° 12, Société Géologique du Nord, Villeneuve d'Ascq, 136 p.
- Humboldt A. (de). 1814-1825. Voyages dans l'Amérique équinoxiale. I. Itinéraire. Trad. C. Minguet. Ed. F. Maspero, 1980, Paris, 295 p.
- Hurlbert S.H., Chang C.C.Y. 1988. The distribution, structure, and composition of freshwater ice deposits in Bolivian salt lakes. Hydrobiologia, 158 : 271-299.
- Ittis A. 1987. Datos sobre la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y la transparencia de las aguas de superficie del Lago Titicaca boliviano (1985-1986). Publ. Orstom, La Paz, N°3, 19 p.
- Ittis A. 1988. Datos sobre las lagunas de altura de la región de La Paz (Bolivia). Publ. Orstom, La Paz, N°14, 50 p.
- Ittis A., Risacher F., Servant-Vildary S. 1984. Contribution à l'étude hydrobiologique des lacs salés du Sud de l'Altiplano bolivien. Revue d'Hydrobiologie Tropicale, 17(3) : 259-273.
- Inca Garcilaso de la Vega. 1609. Commentaires royaux sur le Pérou des Incas. Trad. L.F. Durand. Ed. F. Maspero, 1982, Paris, 912 p.
- Irion G. 1976. Die Entwicklung des zentral und oberamazonischen Tieflands im Spät-Pleistozän und im Holozän. Amazoniana 6(1) : 67-79.
- Irion G. 1976. Quaternary sediments of the upper Amazon lowlands of Brazil. Biogeographica 7 : 163-167.
- Irion G. 1983. Clay mineralogy of the suspended load of the Amazon and of rivers in the Papua New Guinea mainland. Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg, Scope/Unep Sonderband 55 : 483-504.
- Irion G. 1984. Sedimentation and sediments of Amazonian rivers and evolution of the Amazonian landscape since Pliocene Times, 201-214. *In* The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Irion G. 1984. Clay minerals of Amazonian soils, 537-579. *In* The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Irion G. 1989. Quaternary geological history of the Amazon lowlands. Tropical Forests : 23-34.
- Irion G. 1991. Minerals in rivers, 265-281. *In* Biogeochemistry of Major World Rivers, Scope 42, Degens E.T., Kempe S. & Richey J.E. (eds.), J. Wiley, Chichester.
- Irion G., Zöllmer V. 1990. Pathways of Fine-grained clastic sediments - Examples from the Amazon, the Weser estuary and the North Sea, 351-366. *In* Sediments and Environmental Geochemistry, Helling D., Rothe P., Förstner U., Stoffers P. (eds.). Springer, New-York.
- Irion G., Adis G., Junk W.J., Wunderlich F. 1983. Sedimentological studies of the "Ilha de Marchantaria" in the Solimoes/Amazon River near Manaus. Amazoniana 8(1) : 1-18.
- Isacks B.L. 1988. Uplift of the Central Andean Plateau and Bending of the Bolivian Orocline. Journal of Geophysical Research 93(4) : 3211-3231.
- Ittekkot V. 1988. Global trends in the nature of organic matter in river suspensions. Nature 332 : 436-438.
- Ittekkot V., Arain R. 1986. Nature of particulate organic matter in the river Indus, Pakistan. Geochimica Cosmochimica Acta 50 : 1643-1653.
- Ittekkot V., Laane R.W.P.M. 1991. Fate of riverine particulate organic matter, 233-243. *In* Biogeochemistry of Major World Rivers, Degens E.T., Kempe S., Richey J.E. (eds.), Scope 42, J. Wiley.
- Jaccon G. 1983. Calibragem dos postos fluviométricos da bacia amazônica. Publ. Dnaee, Brasília, 54 p.
- Jaccon G. 1986. Estudo da curva chave do posto de Manacapuru no Rio Solimões. Publ. Dnaee, Brasília, 45 p.
- Jaccon G. 1987. Jaugeage de l'Amazonie à Obidos par les méthodes du bateau mobile et des grands fleuves. Hydrologie Continentale 2(2) : 117-126.
- Jaccon G., Cudo K.J. 1984. Curso sobre técnicas de medição de descarga líquida em grandes rios, Manaus, Junho de 1984. Publ. DNAEE, Brasília, 48 p.
- Jaccon G., Cudo K.J. 1985. Curso sobre técnicas de medição de descarga líquida em grandes rios, Manaus, Maio de 1985. Publ. DNAEE, Brasília, 86 p.
- Jaccon G., Cudo K.J. 1987. Medição de descarga líquida no Rio Amazonas em Obidos. Publ. Dnaee, Brasília, 45 p.
- Jaccon G., Cudo K.J. 1987. Calibragem de posto fluviométrico, 279-288. *In* 7<sup>mo</sup> Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Salvador, Nov. 1987.
- Jaccon G., Cudo K.J. 1987. Medições de descarga líquida dos rios Solimões e Amazonas pelo método do barco em movimento, 358-368. *In* 7<sup>mo</sup> Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Salvador, Nov. 1987.
- Jaccon G., Cudo K.J., Ceotto F. 1986. Curso sobre técnicas de medição de descarga líquida em grandes rios, Manaus, Agosto de 1986. Publ. DNAEE, Brasília, 88 p.
- Jaccon G., Cudo K.J., Ceotto F. 1987. Curso sobre técnicas de medição de descarga líquida em grandes rios, Manaus, Junho de 1987. Publ. DNAEE, Brasília, 91 p.
- Jaccon G., Cudo K.J., Ceotto F. 1988. Curso sobre técnicas de medição de descarga líquida em grandes rios, Manaus, Agosto de 1988. Publ. Dnaee, Brasília, 90 p.

Références bibliographiques.

- Jansen J.M.L., Painter R.B. 1974. Predicting sediment yield from climate and topography. Journal of Hydrology, 21 : 371-380.
- Johnson A.M. 1976. The climate of Peru, Bolivia and Ecuador, 147-218. In World Survey of Climatology, vol. 12, H.E. Landsberg (ed.), Elsevier, Amsterdam.
- Johnson R.C. 1988. Changes in the sediment output of two upland drainage basins during forestry land use changes, 463-471. In Sediment Budgets, M.P. Bordas & D.E. Walling (eds.), IAHS Publ. 174.
- Johnsson M.J., Meade R.H. 1990. Chemical weathering of fluvial sediments during alluvial storage: the Macuapanim island point bar, Solimões river, Brazil. Journal of Sedimentary Petrology, 60(6) : 827-842.
- Jordan E. 1979. Grundsätzliches zum Unterschied zwischen Tropischem und Assertropischem Gletscherhaushalt unter Besonderer Berücksichtigung der Gletscher Boliviens. Erdkunde 33(4) : 296-309.
- Jordan C.F. 1982. The nutrient balance of an amazonian rain forest. Ecology 63(3) : 647-654.
- Jordan C.F., Heuvelop J. 1981. The water budget of an amazonian rain forest. Acta Amazônica 11(1) : 87-92.
- Jouanneau J.M., Pujos M. 1987. Suspended matter and bottom deposits in the Mahury estuarine system (French Guiana) : environmental consequences. Netherlands Journal of Sea Research 21(3) : 191-202.
- Jouanneau J.M., Pujos M. 1988. Suspended matter and bottom deposits in the Maroni estuarine system (French Guiana). Netherlands Journal of Sea Research 22(2) : 99-108.
- Jouanneau J.M., Lapaquellerie Y., Latouche C., Tastet J.P. 1990. Résultats préliminaires de la campagne Oubangui-Congo de Novembre 1988, 33-43. Bulletin des Sciences Géologiques, 43(1) : 3-14.
- Junk W.J. 1982. Amazonian floodplains : their ecology, present and potential use. Revue d'Hydrobiologie Tropicale 15(4) : 285-301.
- Junk W.J. 1984. Ecology of the várzea, floodplain of Amazonian white-water rivers, 215-243. In The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Junk W.J., Furch K. 1980. Química da água e macrófitas aquáticas de rios e igarapés na Bacia Amazônica e nas áreas adjacentes. Acta Amazônica 10(3) : 611-633.
- Junk W.J., Furch K. 1985. The Physical and Chemical Properties of Amazonian Waters and their Relationships with the Biota, 3-17. In Key Environments Amazonia, Prance G.T. & Lovejoy T.E. (eds.), Pergamon.
- Katzer F. 1897. Das Wasser des unteren Amazonas. Sitz. Böhm. Ges. Wiss. Math. Naturw. cl. 17 : 1-38.
- Keller Leuzinger F. 1874. Voyage d'exploration sur l'Amazone et le Madeira. Le Tour du Monde : 369-416.
- Kessler A. 1963. Über Klima und Wasserhaushalt des Altiplano (Bolivien, Peru) während des Hochstandes der Letzten Vereisung. Erdkunde 17 : 165-173.
- Kessler A. 1966. Junge Laufänderungen des Desaguadero und die Entstehung des Uru-Uru-Sees (Bolivianischer Altiplano). Erdkunde 20 : 194-204.
- Kessler A. 1970. Über den Jahresgang der potentiellen Verdunstung im Titicaca-Becken. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B 18 : 239-252.
- Kessler A., Monheim F. 1968. Der Wasserhaushalt des Titicacasees nach neueren Messergebnissen. Erdkunde 22(4) : 275-283.
- Key R.M., Stallard R.F., Moore W.S., Sarmiento J.L. 1985. Distribution and flux of <sup>226</sup>Ra and <sup>228</sup>Ra in the Amazon River estuary. Journal of Geophysical Research 90(4) : 6995-7004.
- Kiladis G.N., Diaz H.F. 1989. Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation. Journal of Climate 2(9) : 1069-1090.
- Kirkpatrick F.A. 1935. Les conquistadors espagnols. Trad. A. & H. Collin Delavaud, Ed. Payot, 1980, Paris, 316 p.
- Kittel T., Richerson P.J. 1978. The heat budget of a large tropical lake, Lake Titicaca (Peru-Bolivia). Verh. Internat. Verein. Limnol. 20 : 1203-1209.
- Klammer G. 1976. Zur jungquartären Reliefgeschichte des Amazonastales. Z. Geomorph. N.F. 20(2) : 149-170.
- Klammer G. 1984. The relief of the extra-Andean Amazon basin, 47-83. In The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Kleeberg H.B. 1979. Proyecto Río Piray, Estudios Hidrológicos. Publ. Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ), München, 72 p.
- Kleeberg H.B. 1986. Einfluß der Landnutzung auf hydrologische Erscheinungen in Einzugsgebieten der östlichen Anden, dargestellt am Flußgebiet des Río Piray, Bolivien. Publ. Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ), München.
- Klinge H. 1965. Podzol soils in the Amazon basin. Journal of Soil Science 16(1) : 95-103.
- Klinge H. 1967. Podzol soils : a source of blackwater rivers in Amazonia, 117-125. In Biota Amazônica. Belem, 1966.
- Klinge H., Ohle W. 1964. Chemical properties of rivers in the Amazonian area in relation to soil conditions. Verh. Internat. Verein. Limnol. 15 : 1067-1076.

- Kohlepp G. 1978. Erschließung und wirtschaftliche Inwertsetzung Amazoniens. Geogr. Rundschau 30 : 2-13.
- Krook L. 1992. Evidence of Amazon provenance of a part of the sandy sediments in the coastal and shelf areas of the Guianas, 307-325. In Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le Quaternaire, M.T. Prost (ed.), Orstom, Paris.
- Kuehl S.A., Nittrouer C.A., DeMaster D.J. 1982. Modern sediment accumulation and strata formation on the Amazon continental shelf. Marine Geology 49 : 279-300.
- Künzel F., Kessler A. 1986. Investigation of the level changes of Lake Titicaca by maximum entropy spectral analysis. Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. B 36 : 219-227.
- La Combe E., Von Hassel J.M., Pesce L. 1904. Informe de la comisión exploradora del istmo de Fitzcarrald. Ed. Junta de vías fluviales, Lima, 232 p.
- La Condamine C.M. (de). 1745. Relation abrégée d'un voyage fait dans l'intérieur de l'Amérique méridionale, depuis la côte de la mer du Sud jusqu'aux côtes du Brésil et de la Guyane, en descendant la rivière des Amazones. Ed. F. Maspero, 1981, Paris, 163 p.
- Lachance G.R., Trail R.J. 1966. A practical solution to the matrix problem in X-Ray analysis. J. Meth. Can. Spectrosc. 11 : 43.
- Lal V.B., Banerji S., Narayanan J. 1977. Sediment yield in relation to drainage basin characteristics in some Indian river valley projects, 93-97. In Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters, Paris, July 1977. IAHS Publ. 122.
- Langbein W.B., Schumm S.A. 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. Trans. American Geophysical Union, 39(6) : 1076-1084.
- Lara J. 1990. El Tawantinsuyu. Ed. Los Amigos del libro, La Paz, 404 p.
- Larras J. 1972. Hydraulique et granulats. Ed. Eyrolles, Paris, 254 p.
- Larras J. 1977. Fleuves et rivières non aménagées. Ed. Eyrolles, Paris, 187 p.
- Laubacher G., Héral G., Fornari M., Sébrier M. 1984. Le piémont amazonien des Andes sud-orientales du Pérou (Marcapata-Inambari). Revue de Géologie des Pyrénées et du Sud-Ouest : 71-84.
- Lauzanne L., Franc J. 1979. Las truchas de los lagos del valle de Hichu-Kkota, 27-30. In Limnologia de los lagos Khara-Kkota y Khotia, Publ. Orstom, La Paz.
- Lavenu A. 1986. Etude tectonique et néotectonique de l'Altiplano et de la cordillère orientale des Andes boliviennes. Résumé de thèse de Doctorat es Sciences, Université de Paris Sud. Géodynamique 1(2) : 147-152.
- Lavenu A., Fornari M., Sébrier M. 1984. Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano péruvo-bolivien. Cahiers Orstom Série Géologie 14(1) : 103-114.
- LeBaron A., Bond L.K., Aitken P.S., Michaelsen L. 1979. An explanation of the Bolivian highlands grazing erosion syndrome. Journal of Range Management, 32(3) : 201-208.
- Lebreton J.C. 1974. Dynamique fluviale. Ed. Eyrolles, Paris, 209 p.
- LeCointe P. 1935. Les crues annuelles de l'Amazonie et les récentes modifications de leur régime. Annales de Géographie, 44 : 614-619.
- Leenheer J.A. 1980. Origin and nature of humic substances in the waters of the Amazon River Basin. Acta Amazônica 10(3) : 513-526.
- Lesack F.F.W., Hecky R.E., Melack J.M. 1984. Transport of carbon, nitrogen, phosphorus, and major solutes in the Gambia River, West Africa. Limnology and Oceanography, 29(4) : 816-830.
- Lewis W.M., Weibezahn F.H. 1981. The chemistry of the Orinoco and Caroni Rivers. Arch. Hydrobiol., 91(4) : 521-528.
- Lewis W.M., Saunders J.F., Levine S.N., Weibezahn F.H. 1986. Organic carbon in the Caura River, Venezuela. Limnology and Oceanography, 31(3) : 653-656.
- Litherland M., Annells R.N., Appleton J.D., Berrangé J.P., Bloomfield K., Burton C.C.J., Darbyshire D.P.F., Fletcher C.J.N., Hawkins M.P., Klinck B.A., Llanos A., Mitchell W.I., O'Connor E.A., Pitfield P.E.J., Power G., Webb B.C. 1986. The geology and mineral resources of the Bolivian Precambrian shield. British Geological Survey, Overseas Memoir 9, 153 p.
- Livingstone D.A. 1963. Chemical composition of Rivers and Lakes. U.S. Geological Survey Prof. Paper 440-G, 64 p.
- Lizarazu J., Aranyossy J.F., Orsag V., Salazar J.C. 1987. Estudio isotópico de la cuenca de Oruro-Caracollo, Bolivia, 301-315. In Isotope Techniques in Water Resources Development, IAEA, Vienne, April 1987.
- Llerena C.A. 1987. Erosion and sedimentation issues in Peru, 3-14. In Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, Beschta R.L., Blinn T., Grant G.E., Ice G.G. & Swanson F.J. (eds.), IAHS Publ. 165.
- Löffler H. 1968. Tropical high mountain lakes, their distribution, ecology and zoogeographical importance. Coll. Geogr. 9 : 57-76.
- Lointier M. 1986. Hydrodynamique et morphologie de l'estuaire du fleuve Sinnamary (Guyane Française). Le Littoral Guyanais : 37-44.
- Lointier M., Roche M.A. 1989. Salinités et suspensions des estuaires de Guyane. Méthodes et résultats, 81-124. In 4èmes Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Septembre 1988.

Références bibliographiques.

- Long Yuqian. 1989. Manual on operational methods for the measurement of sediment transport. Operational Hydrology Report 29, W.M.O., Geneve, 170 p.
- Long Yuqian, Xiong Guishu. 1981. Sediment measurement in the Yellow River, 275-285. In Erosion and Sediment Transport Measurement, Florence, June 1981. IAHS Publ. 133.
- Lopez Antezana P.F. 1984. Deelontwerp reservoirbeheer. Het Misicuni projekt in Cochabamba, Bolivia. Technische Hogeschool, Delft, 37 p.
- Loubens G., Lauzanne L., Le Guennec B. 1992. Les milieux aquatiques de la région de Trinidad (Béni, Amazonie bolivienne). Revue d'hydrobiologie tropicale, 25(1) : 3-21.
- Loup J. 1974. Les eaux terrestres. Ed. Masson, Paris, 171 p
- Low F. 1967. Estimating potential erosion in developing countries. Journal of Soil Water Conservation 22 : 147-148.
- Lozada Encinas G.A. 1985. Balance hidrico de la cuenca del Lago Titicaca. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 158 p.
- Lyon-Caen H., Molnar P., Suárez G. 1985. Gravity anomalies and flexure of the Brazilian Shield beneath the Bolivian Andes. Earth and Planetary Science Letters 75 : 81-92.
- Mackenzie F.T., Garrels R.M. 1966. Chemical mass balance between rivers and oceans. American Journal of Science 264 : 507-525.
- MacPherson H.J. 1975. Sediments yields from intermediate-sized stream basins in Southern Alberta. Journal of Hydrology, 25 : 243-257.
- Magat P. 1981. Première évaluation de la géochimie des eaux dans les vallées de la Cordillère orientale de Bolivie. Publ. Orstom/Umsa, Cochabamba, 35 p.
- Malatrait A.M. 1977. Plan de desarrollo urbano de la ciudad de La Paz. Informe geologico N°6 : Características geomorfológicas de la cuenca de La Paz y alrededores. Publ. Brgm/Bceom, La Paz, 73 p
- Malavoi J.R. 1986. Le substrat des rivières à fond graveleux. Approche descriptive. Mémoire de DEA, Univ. Lyon III, 50 p.
- Malcom R.L., Durum W.H. 1976. Organic carbon and Nitrogen concentrations and annual carbon load of six selected rivers of the United States. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1817F.
- Mangin A. 1981. Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris, 293 : 401-404.
- Mangin A. 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. Journal of Hydrology 67 : 25-43.
- Manley P.L., Flood R.D. 1988. Cyclic Sediment Deposition Within Amazon Deep-Sea Fan. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 72(8) : 912-925.
- Mariaca Carrasco J.J. 1985. Balance hidrico superficial de la cuenca del Lago Poopo y los salares de Uyuni y Coipasa, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 203 p.
- Marlier G. 1965. Etude sur les lacs de l'Amazonie centrale. Cadernos da Amazônia 5 : 51 p.
- Marlier G. 1967. Ecological Studies on some Lakes of the Amazon Valley. Amazoniana 1(2) : 91-115.
- Marques J., Salati E., Santos J.M. 1980. A divergência do campo do fluxo de vapor d'água e as chuvas na regio Amazônica. Acta Amazônica 10 : 133-140.
- Marques J., Salati E., Santos J.M. 1980. Cálculo da evapotranspiração real na bacia Amazônica através do método aerológico. Acta Amazônica 10 : 357-361.
- Martin J. 1977. Plan de desarrollo urbano de la ciudad de La Paz. Informe geologico N°8 : Características climatológicas de la cuenca de La Paz. Publ. Brgm/Bceom, La Paz, 33 p.
- Martin J. 1977. Plan de desarrollo urbano de la ciudad de La Paz. Informe geologico N°9 : Condiciones hidrologicas de la cuenca de La Paz. Publ. Brgm/Bceom, La Paz, 71 p.
- Martin J.M., Meybeck M. 1979. Elemental mass balance of material carried by major world rivers. Marine Chemistry 7 : 173-206.
- Martins O., Probst J.L. 1991. Biogeochemistry of major african rivers, 127-155. In Biogeochemistry of Major World Rivers, Degens E.T., Kempe S., Richey J.E. (eds.), Scope 42, J. Wiley.
- Martinez C. 1980. Structure et évolution de la chaîne hercynienne et de la chaîne andine dans le nord de la Cordillère des Andes de Bolivie. Thèse Doctorat d'Etat en Sciences, Montpellier. Travaux et Documents de l'Orstom 119, 352 p.
- Martinez C., Tomasi P. 1978. Carte structurale des Andes septentrionales de Bolivie à 1/1,000,000. Notice explicative n° 77, Orstom, Paris, 48 p.
- Matsui E., Salati E., Brinkmann W.L.F., Friedman I. 1972. Vazoes relativas dos rios Negro e Solimoes através das concentrações de <sup>18</sup>O. Acta Amazônica 2(3) : 31-46.
- Matsui E., Salati E., Friedman I., Brinkmann W.L.F. 1976. Isotopic Hydrology in the Amazonia. 2. Relative Discharges of the Negro and Solimoes Rivers Through <sup>18</sup>O Concentrations. Water Resources Research 12(4) : 781-785.
- Maurtua V.M. 1907. Contestación de la República del Perú á la demanda de la República de Bolivia. Ed. Compañia Sud Americana de Billetes de Banco, Buenos Aires.
- Meade R.H. 1982. Sources, Sinks, and Storage of River Sediment in the Atlantic Drainage of the United States. Journal of Geology 90(3) : 235-252.

- Meade R.H. 1985. Suspended Sediment in the Amazon River and its Tributaries in Brazil during 1982-1984. U.S. Geological Survey Open File Report 85-492, Denver, 39 p.
- Meade R.H. 1988. Movement and storage of sediment in river systems, 165-179. *In* Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles, Lerman A. & Meybeck M. (eds.), Kluwer, Dordrecht.
- Meade R.H., Stevens H.H. 1990. Strategies and equipment for sampling suspended sediment and associated toxic chemicals in large rivers with emphasis on the Mississippi River. Science of the Total Environment, 97/98 : 125-135.
- Meade R.H., Nordin C.F., Curtis W.F. 1979. Sediment in Rio Amazonas and some of its principal tributaries during the high water seasons of 1976 and 1977, 472-485. *In* III Simpósio Brasileiro de Hidrologia.
- 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., Nordin C.F., Hernandez D.P., Mejia A., Perez Godoy J.M. 1983. Sediment and water discharge in Rio Orinoco, Venezuela and Colombia, 1134-1144. *In* River Sedimentation, Nanjing, October 1983.
- 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., Yuzyk T.R., Day T.J. 1990. Movement and storage of sediments in rivers of the United States and Canada, 255-280. *In* The geology of North America, Surface water hydrology, Wolman M.G. & Riggs H.C. (eds.), Boulder.
- Meade R.H., Weibezahn F.H., Lewis W.M., Pérez Hernández D. 1990. Suspended-sediment budget for the Orinoco River, 55-79. *In* The Orinoco River as an Ecosystem, Weibezahn F.H., Alvarezé H. & Lewis W.M. (Eds.), Caracas.
- Meade R.H., Rayol J.M., da 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.
- Mégarid F., Dalmayrac B., Laubacher G., Marocco R., Martinez C., Paredes J., Tomasi P. 1971. La chaîne hercynienne au Pérou et en Bolivie, premiers résultats. Cahiers Orstom Série Géologie 3(1) : 5-44.
- Melack J.M. 1984. Amazon floodplain lakes : Shape, fetch, and stratification. Verh. Internat. Verein. Limnol., 22 : 1278-1282.
- Melbourne W.H. 1960. Exploration and survey on the Bolivia-Peru border. The Geographical Journal : 455-459.
- Mendizabal S. 1932. Vicariato apostólico del Beni, descripción de su territorio y sus misiones. Imp. Renacimiento, La Paz, 349 p.
- Mertes L.A.K. 1985. Floodplain development and sediment transport in the Solimoes-Amazon River, Brazil. Master of Science, Univ. Washington, 108 p.
- Mertes L.A.K., Meade R.H. 1985. Particle sizes of sands collected from the bed of the Amazon River and its tributaries in Brazil during 1982-84. U.S. Geological Survey Open-File Report 85-333, Denver, 16 p.
- Meybeck M. 1970. Bilan hydrochimique et géochimique du Lac Léman. Thèse, Univ. Paris, 245 p.
- Meybeck M. 1976. Total mineral dissolved transport by world major rivers. Hydrological Sciences Bulletin 21(2) : 265-284.
- Meybeck M. 1977. Dissolved and suspended matter carried by rivers : composition, time and space variations and world balance, 25-32. *In* Interactions between sediments and fresh waters, Golterman H.L. (ed.), Junk, Amsterdam.
- Meybeck M. 1979. Concentrations des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique 21(3) : 215-246.
- Meybeck M. 1981. Pathways of major elements from land to oceans through rivers, 18-30. *In* River Input to the Ocean System, Martin J.M., Burton J.D., Elisma D. (eds.). Unesco Publ., Roma.
- Meybeck M. 1982. Carbon, Nitrogen, and Phosphorus transport by world rivers. American Journal of Science 282 : 401-450.
- Meybeck M. 1983. Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances, 173-192. *In* Dissolved loads of Rivers and Surface Water Quantity/Quality Relationships, Webb W.B. (ed.), Hamburg, August 1983. IAHS Publ. 141.
- Meybeck M. 1984. Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences, Univ. Paris VI, 558 p.
- Meybeck M. 1985. Variabilité dans le temps de la composition chimique des rivières et de leurs transports en solution et en suspension. Revue française des Sciences de l'eau, 4 : 93-121.
- Meybeck M. 1986. Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. Bulletin des Sciences Géologiques, 39(1) : 3-77.
- Meybeck M. (in press). C, N, P and S in rivers : from sources to global inputs. *In* Coupling of C, N, P, S in geochemical cycles. NATO Adv. Studies Symp., March 1991, Kluwer.
- Michel J.P., Fairbridge R.W. 1980. Dictionnaire des sciences de la terre. Publ. Masson, Paris, 411 p.
- Milliman J.D., Boyle E. 1975. Biological uptake of dissolved silica in the Amazon River estuary. Science 189 : 995-997
- Milliman J.D., Meade R.H. 1983. World wide delivery of river sediment to the oceans. Journal of Geology 91 : 1-21.

Références bibliographiques.

- Milliman J.D., Quinchun X., Zuosheng Y. 1984. Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the YangTse river to the ocean. American Journal of Science : 824-834.
- Molina J. 1986. Estudio de erosión, cuenca del Rio Pirai. Tesis Umsa, La Paz, 147 p.
- Molinier M. 1979. Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazzaville. Cahiers Orstom Série Hydrologie 16(1) : 55-66.
- Molinier M. 1992. Régionalisation des débits du bassin amazonien. In Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Sept. 1992.
- Molinier M., Da Silva Maia A.C., Dos Santos D.F. 1991. Balanço hídrico da bacia amazônica. Metodologia e primeiros resultados. In IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, Novembro 1991.
- Molinier M., Cudo K.J., Guimaraes V. 1992. Disponibilidade de água na bacia amazônica. In Estudos ambientais em florestas tropicais umidas, Forest 92, Rio de Janeiro.
- Molion L.C.B. 1991. Climate variability and its effects on Amazonian hydrology, 261-274. In Water Management of the Amazon Basin, Braga B.P.F. & Fernandez-Jauregui C. (eds.), Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo.
- Molion L.C.B., Moraes J.C. 1987. Oscilação Sul e descarga de rios na America do Sul tropical. Rev. Bras. Eng., Caderno Hidrol., 5 : 53-62.
- Monge Roca R. 1977. El Río Mamoré. Publ. Instituto Boliviano de Cultura, La Paz.
- Monheim F. 1956. Beitrage zur Klimatologie und Hidrologie des Titicacabeckens. Univ. Heidelberg, 152 p.
- Montes de Oca I. 1982. Geografia y recursos naturales de Bolivia. Imp. Superel, La Paz, 628 p.
- Mortatti J. 1988. Estudo das alterações ecológicas na região Noroeste do Brasil em função da colonização intensiva. Programa Polonoeste, Relatório de Pesquisa N° 3, MCT CNPq, 87 p.
- Mortatti J., Manfrinato E.S. Oliveira E., Ferreira J.R. 1987. Estimativa da evapotranspiração potencial para o estado de Rondônia. Energ. Nucl. Agric. Piracicaba, 8(1/2) : 24-47.
- Mortatti J., Ferreira J.R., Martinelli L.A., Victoria R.L., Tancredi A.C.F. 1989. Biogeochemistry of the Madeira river basin. GeoJournal, 19(4) : 391-397.
- Mortatti J., Probst J.L., Ferreira J.R. 1992. Hydrological and geochemical characteristics of the Jamari and Jiparana river basins (Rondonia, Brazil). GeoJournal, 26(3) : 287-296.
- Mossa J. 1989. Hysteresis and nonlinearity of discharge-sediment relationships in the Atchafalaya and lower Mississippi rivers, 105-112. In Sediment and the environment, Hadley R.F. & Ongley E.D. (eds.), IAHS Publ. 184.
- Moukolo N., Bricquet J.P., Biyedi J. 1990. Bilans et variations des exportations de matières sur le Congo à Brazzaville. Hydrologie Continentale 5(1) : 41-52.
- Mousinho de Meis M.R. 1971. Upper Quaternary process changes of the middle Amazon area. Geological Society of America Bulletin 82 : 1073-1087.
- Mourguiart P., Carbonel P., Peypouquet J.P., Wirrmann D., Vargas C. 1986. Late quaternary paleohydrology of lake Huinaymarca (Bolivia). Scenarios based on Ostracods fauna. Hydrobiologia 143 : 191-197.
- Mudry J. 1987. Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse de doctorat d'état es Sciences, Univ. Besançon, 382 p.
- Neal C., Forti M.C., Jenkins A. 1992. Towards modelling the impact of climate change and deforestation on stream water quality based on the MAGIC model. The Science of the Total Environment, 127 : 225-241.
- Nemeth A., Paolini J., Herrera R. 1982. Carbon transport in the Orinoco River : preliminary results, 357-364. In Transport of carbon and minerals in major world rivers, Scope, Degens E.T. (ed.), Mitt. Geol. Palaont. Inst. Univ. Hamburg, 52.
- Neveu-Lemaire M. 1904. Le Titicaca et le Poopo, contribution à l'étude des lacs des hauts plateaux boliviens. La géographie 9(6) : 409-430.
- Nimer E. 1979. Climatologia do Brasil. Publ. IBGE, Rio de Janeiro, 422 p.
- Nittrouer C.A., Kuehl S.A., DeMaster D.J., Kowsmann R.O. 1986. The deltaic nature of Amazon shelf sedimentation. Geological Society of America Bulletin 97 : 444-458.
- Nobre C.A. 1991. Possible climatic impacts of Amazonia deforestation, 245-260. In Water Management of the Amazon Basin, Braga B.P.F. & Fernandez-Jauregui C. (eds.), Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo.
- Nordin C.F., Meade R.H., Curtis W.F., Bósio N.J., Landim P.M.B. 1980. Size distribution of Amazon River bed sediment. Nature 286(5768) : 52-53.
- Nordin C.F., Meade R.H. 1982. Deforestation and increased flooding of the upper Amazon. Science 215 : 426-427.
- Nordin C.F., Meade R.H. 1985. The Amazon and the Orinoco. River : 385-390.
- Nouvelot J.F. 1969. Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. Cahiers Orstom Série Hydrologie 6(4) : 43-85.
- Nouvelot J.F. 1972. Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés. Cahiers Orstom Série Hydrologie 9(1) : 3-18.
- Nouvelot J.F. 1972. Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. Cahiers Orstom Série Hydrologie 9(1) : 47-74.

- Olive L.J., Rieger W.A. 1988. An examination of the role of sampling strategies in the study of suspended sediment transport, 259-267. *In* Sediment Budgets, Bordas M.P. & Walling D.E. (Eds.). IAHS Publ. 174.
- Oliveira E. de, Flores Machado A., Praciano Garcia L.M., Melo Souto L., Costa Barros M., et al. 1985. Diagnóstico dos recursos hídricos; avaliação do regime hidrometeorológico do Noroeste do Brasil. Programa Polonoeste. Publ. DNAEE, Brasília, 204 p.
- Olivry J.C. 1977. Transports solides en suspension au Cameroun, 134-141. *In* Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters, Paris, July 1977. IAHS Publ. 122.
- Olivry J.C. 1986. Possibilités d'allégement des réseaux hydrométriques dans les pays en voie de développement après réalisation de synthèses hydrologiques régionales, 329-342. *In* Integrated Design of Hydrological Network, Budapest, July 1986. IAHS Publ. 158.
- Olivry J.C. 1989. Présentation du programme de mesure de flux particulaires et dissous sur les grands bassins fluviaux équatoriaux péri-atlantiques, 125-130. *In* Quatrième Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Sept. 1988.
- Olivry J.C. 1989. Transports solides sur l'Oubangui, 147-154. *In* Quatrième Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Sept. 1988.
- Olivry J.C., Naah E. 1989. Transports solides et qualité des eaux au Cameroun, 163-173. *In* Quatrième Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Sept. 1988.
- Olivry J.C., Bricquet J.P., Thiebaut J.P., Sigha N. 1988. Transport de matière 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.
- Olivry J.C., Bricquet J.P., Thiebaut J.P. 1989. Bilan annuel et variations saisonnières des flux particulaires du Congo à Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui. La Houille Blanche 3/4 : 311-315.
- Oltman R.E. 1967. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon, 163-185. *In* Biota Amazônica, Belem, 1966.
- 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.
- Ongley E.D. 1982. Influence of season, source and distance on physical and chemical properties of suspended sediment, 371-383. *In* Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield, Walling D.E. (eds.). IAHS Publ. 137.
- Orange D. 1990. Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse, Univ. Strasbourg, 220 p.
- Orange D., Gac J.Y. 1990. Reconnaissance géochimique des eaux du Fouta Djallon (Guinée). Flux de matières dissoutes et en suspension en Haute Gambie. Géodynamique 5(1) : 35-49.
- Orbigny A. (d'). 1835-1847. Viaje a la America meridional realizado de 1826 a 1833. Trad. A. Cepeda. Ed. Futuro, 1945, Buenos Aires, 1232 p.
- Orbigny A. (d'). 1845. Descripción geográfica, histórica y estadística de Bolivia. Tomo primero (y único). Ed. Gide, Paris, 402 p.
- Palacios J.A. 1844-1847. Exploraciones realizadas en los ríos Beni, Mamoré y Madera y en el lago Rogo-aguado. Ed. del Estado, 1944, La Paz, 77 p.
- Palenque Espada G. 1981. Analisis de las ecuaciones para el transporte de la carga de fondo. Tesis UMSA, La Paz.
- Palenque Espada G. 1987. Medición del caudal solido en suspensión en el Río Pirai. Publ. Univ. Mayor de San Andres, La Paz, 41 p.
- Paolini J. 1990. Carbono organico disuelto y particulado en grandes rios de la America del Sur. Interciencia, 15(6) : 358-366.
- Pardé M. 1936. Les variations saisonnières de l'Amazone. Annales de Géographie 45 : 502-511.
- Pardé M. 1955. Quelques aperçus relatifs à l'hydrologie brésilienne. La Houille Blanche.
- Pardé M. 1965. Sur les débits monstrueux de l'Amazone. Annales de Géographie 401 : 113-114.
- Pardé M. 1966. Nouveautés sur les débits monstrueux de l'Amazone. Annales de Géographie : 202-208.
- Pardé M. 1968. Fleuves et rivières. Ed. Armand Colin, Paris, 241 p.
- Pareja J., Vargas C., Suárez R., Ballón R., Carrasco R., Villarroel C. 1978. Mapa geológico de Bolivia, memoria explicativa. Ed. Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos y Servicio Geológico de Bolivia, La Paz, 27 p.
- Pedro G. 1968. Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique 10(5) : 457-470.
- Pickup G. 1984. Geomorphology of tropical rivers. 1. Landforms, hydrology and sedimentation in the Fly and lower Purari, Papua New Guinea, 1-17. *In* Channel Processes, Water, Sediment, Catchment controls, Schick A.P. (Ed.). Catena Suppl. 5.
- Pierre J.F., Wirrmann D. 1986. Diatomées et sédiments holocènes du lac Khara Kkota (Bolivie). Géodynamique 1(2) : 135-145.

Références bibliographiques.

- Pillari G., Gühr M. 1977. Observations on the Bolivian and the Amazonian Bufo with a description of a new subspecies, 11-76. *In Investigations on Cetacea*, Pillari G. (ed.), Vol. VII.
- Pinet P., Souriau M. 1988. Continental erosion and large scale relief. *Tectonics*, 7(3) : 563-582.
- Plafker G. 1964. Oriented lakes and lineaments of northeastern Bolivia. *Geological Society of America Bulletin* 75 : 503-522.
- Probst J.L. 1983. Hydrologie du bassin de la Garonne. Thèse de doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. Toulouse, 148 p.
- Probst J.L. 1986. Dissolved and suspended matter transported by the Girou River (France): mechanical and chemical erosion rates in a calcareous molasse basin. *Hydrological Sciences Journal* 31(1) : 61-79.
- Probst J.L. 1990. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. Thèse de Docteur es Sciences Naturelles, Institut de Géologie, Strasbourg, 185 p.
- Probst J.L., Bazerbachi A. 1986. Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Bulletin des Sciences Géologiques* 39(1) : 79-98.
- Probst J.L., Amiotte-Suchet P. 1992. River suspended sediment transports and mechanical erosion in the Maghreb regions. *Hydrological Sciences Journal*, 37(6) : 621-637.
- Probst J.L., Nkounkou R.R., Kremp G., Bricquet J.P., Thiébaux J.P., Olivry J.C. 1992. Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangi rivers during the period 1987-1989. *Journal of Hydrology*, 135 : 237-257.
- Pujos M., Jouanneau J.M., Pawilowski C. 1988. Premiers résultats d'analyses des échantillons d'eau et de sédiments prélevés dans l'Oyapock (Guyane). *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine* 44 : 71-79.
- Putzer H. 1984. The geological evolution of the Amazon basin and its mineral resources, 15-46. *In The Amazon*, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Quintanilla J. 1988. La hidroquímica del Lago Titicaca y su relación con el plancton, 114-125. *In 2<sup>do</sup> Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia*, Dejoux C. (ed.), Publ. Orstom, La Paz.
- Quintanilla J., Calliconde M., Guyot J.L., Roche M.A., Noriega L., Calle H., Cortes J. 1989. Cargas en suspensión, salinidades y transportes de materia sobre el Altiplano boliviano. *Revista de Ingeniería Sanitaria* 4(5) : 54-59.
- Quintanilla J., Gemio R., Calliconde M., Martinez J., Wirmann D. 1989. Estudio preliminar de la hidrogeología e hidroquímica de la laguna Santa Rosa. *Revista Boliviana de Química*, 8(1) : 49-56.
- Quintanilla J., Gumiel D; Guyot J.L. 1990. Evaluación preliminar de la hidrogeología e hidroquímica del Norte del Altiplano boliviano. *In 3<sup>ro</sup> Congreso Boliviano de Química*, La Paz, Octubre 1990.
- Rai H. 1978. Distribution of carbon, chlorophyll-a and pheo-pigments in the black water lake ecosystem of Central Amazon region. *Arch. Hydrobiol.* 82(1/4) : 74-87.
- Rai H., Hill G. 1980. Classification of central Amazon lakes on the basis of their microbiological and physico-chemical characteristics. *Hydrobiologia* 72 : 85-99.
- Rai H., Hill G. 1981. Physical and Chemical Studies of Lago Tupé; a Central Amazonian Black Water Ria-Lake. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 66(1) : 37-82.
- Ramirez A.J., Mogollon J.L., Bifano C., Yanes C.E. 1992. Water, Dissolved Solids and Suspended Sediment Discharge to Venezuelan Coastline, 437-456. *In Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le Quaternaire*, M.T. Prost (ed.), Orstom, Paris.
- Raous P. 1988. La gestion des données hydrologiques à l'Orstom. Présentation de Hydrom et Pluviom, 105-129. *In 3<sup>èmes</sup> Journées Hydrologiques de l'Orstom*, Montpellier, Septembre 1986.
- Räsänen M.E. 1991. History of the fluvial and alluvial landscapes of the Western Amazon Andean forelands. *Annales Universitatis Turkuensis*, Ser.A, II, 75. Turku.
- Räsänen M.E., Salo J.S., Kalliola R.J. 1987. Fluvial Perturbance in the Western Amazon Basin : Regulation by Long-Term Sub-Andean Tectonics. *Science* 238 : 1398-1401.
- Räsänen M.E., Salo J.S., Junghert H., Pittman L.R. 1990. Evolution of the Western Amazon Lowland Relief : impact of Andean foreland dynamics. *Terra Nova* 2 : 320-332.
- Ratisbona L.R. 1976. The climate of Brazil, 219-293. *In World Survey of Climatology*, vol. 12, H.E. Landsberg (ed.), Elsevier, Amsterdam.
- Reis C.M., Tancredi A.C., Matsui E., Salati E. 1977. Caracterização das águas da região de Marajó através de concentrações de O<sup>18</sup> e D. *Acta Amazônica* 7(2) : 209-222.
- Rettig S.L., Jones B.F., Risacher F. 1980. Geochemical evolution of brines in the salar of Uyuni, Bolivia. *Chemical Geology*, 30 : 57-79.
- Richerson P.J., Widmer C., Kittel T., Landa A. 1975. A survey of the physical and chemical limnology of Lake Titicaca. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 19 : 1498-1503.
- Richerson P.J., Neale P.J., Wurtsbaugh W., Alfaro R., Vincent W. 1986. Patterns of temporal variation in Lake Titicaca. A high altitude tropical lake. *Hydrobiologia* 138 : 205-220.
- Richey J.E. 1981. Particulate and dissolved carbon in the Amazon River : a preliminary annual budget. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 21 : 914-917.

- Richey J.E. 1982. The Amazon River System : a Biogeochemical Model. Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg 52 : 365-378.
- Richey J.E., Brock J.T., Naiman R.J., Wissmar R.C., Stallard R.F. 1980. Organic Carbon : Oxidation and Transport in the Amazon River. Science 207 : 1348-1351.
- 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., Devol A.H., Wofsy S.C., Victoria R., Ribeiro M.N.G. 1988. Biogenic gases and the oxidation and reduction of carbon in Amazon River and floodplain waters. Limnology and Oceanography 33(4) : 551-561.
- Richey J.E., Mertes L.A.K., Dunne T., Victoria R.L., Forsberg B.R., Tancredi A.C.N.S., Oliveira E. 1989. Sources and Routing of the Amazon River Flood Wave. Global Biogeochemical Cycles 3(3) : 191-204.
- Richey J.E., Nobre C., Deser C. 1989. Amazon River Discharge and Climate Variability : 1903 to 1985. Science 246 : 101-103.
- Richey J.E., Hedges J.I., Devol A.H., Quay P.D., Victoria R., Martinelli L., Forsberg B.R. 1990. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. Limnology and Oceanography 35(2) : 352-371.
- Richey J.E., Victoria R.L., Salati E., Forsberg B.R. 1991. The biogeochemistry of a Major River System : The Amazon Case Study, 57-74. In Biogeochemistry of Major World Rivers, Scope 42, Degens E.T., Kempe S. & Richey J.E. (eds.), J. Wiley, Chichester.
- Riou C. 1975. La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. Mémoires Orstom 80. Publ. Orstom, Paris, 236 p.
- Risacher F. 1978. Le cadre géochimique des bassins à évaporites des Andes boliviennes. Cahiers Orstom Série Géologie, 10 : 37-48.
- Risacher F. 1978. Génèse d'une croûte de gypse dans un bassin de l'Altiplano bolivien. Cahiers Orstom Série Géologie, 10 : 91-100.
- Risacher F. 1984. Origine des concentrations extrêmes en Bore et en Lithium dans les saumures de l'Altiplano bolivien. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 299(1) : 701-706.
- Risacher F. 1989. Estudio economico del Salar de Uyuni. Publ. Orstom, La Paz, 67 p.
- Risacher F., Eugster H.P. 1979. Holocene pisoliths and encrustations associated with spring-fed surface pools, Pastos Grandes, Bolivia. Sedimentology, 26 : 253-270.
- Risacher F., Samuel J., Krempp G. 1984. Concentrations extrêmes en Molybdène, Tungstène et Arsenic dans les saumures d'un lac de l'Altiplano de Bolivie. Indication métallogénique. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 299(19) : 1325-1328.
- Ritter J.R. 1976. Reconnaissance of sediment transport and channel morphology in the lower Rio Bermejo basin, Argentina. U.S. Geological Survey Open-File Report 76-564, 41 p.
- Ritter J.R. 1977. Reconnaissance of sedimentation in the Rio Pilcomayo basin, May 1975, Argentina, Bolivia, and Paraguay. U.S. Geological Survey Open-File Report 77-327, 35 p.
- Rivas S. 1968. Geología de la región Norte del Lago Titicaca. Boletín del Servicio Geológico de Bolivia, 2, 88 p.
- Rivera G., Paz O. 1989. Cuantificación y evaluación del contenido de Fe y Mn en las aguas de consumo de las redes de distribución de la ciudad de La Paz. In IV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, La Paz, Oct. 1989.
- Roche M. 1963. Hydrologie de surface. Gauthier Villars Ed., Paris, 430 p.
- Roche M. 1975. Geochemistry and natural ionic and isotopic tracing; two complementary ways to study the natural salinity regime of the hydrological system of Lake Chad. Journal of Hydrology, 26 : 153-171.
- Roche M.A. 1980. Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du Lac Tchad. Travaux et documents de l'Orstom, 117, 383 p.
- Roche M.A. 1981. Watershed Investigations for Development of Forest Resources of the Amazon Region in French Guyana, 75-82. In Tropical Agricultural Hydrology, Lal R. & Russell E.W. (eds.). Wiley.
- Roche M.A. 1982. Evapotranspiration réelle de la forêt amazonienne en Guyane. Cahiers Orstom Série Hydrologie 19(1) : 37-44.
- Roche M.A. 1982. Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à Ecérex, en Guyane. Cahiers Orstom Série Hydrologie 19(2) : 81-114.
- Roche M.A. 1986. Presentación general del PHICAB, 26-28. In 1<sup>er</sup> Symposium de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Roche M.A. 1986. Distribuciones espacio-temporales de los parametros climatológicos sobre Bolivia, 29-32. In 1<sup>er</sup> Symposium de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Roche M.A. 1988. Las aplicaciones del proyecto Phicab al desarrollo de Bolivia, 77-89. In 2<sup>do</sup> Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Roche M.A., Canedo M., 1984. Programa Hidrológico y Climatológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia. Plaquette Orstom-Senamhi, La Paz, 4 p.

Références bibliographiques.

- Roche M.A., Fernandez C. 1986. Los balances hídricos de Bolivia, 44-47. In 1<sup>er</sup> Symposium de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- 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., Apoteker A., Abasto N., Calle H., Tolède M., Cordier J.P., Pointillart C. 1986. Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Publ. Phicab, La Paz, 257 p.
- 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., Guyot J.L., Bourges J. 1991. Bilan hydrique et de matière dissoute et en suspension du haut-bassin du Rio Madeira. Journée scientifique du programme Pirat, Strasbourg, 19 p.
- Roche M.A., Fernandez-Jauregui 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-Jauregui C. (eds.), Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo.
- Roche M.A., Bourges J., Cortes J., Mattos J. 1992. Climatology and hydrology of the Lake Titicaca basin, 63-88. In Lake Titicaca, C. Dejoux & A. Iltis (eds), Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- Roche M.A., Fernandez C., Aliaga A., Peña J., Salas E., Montaño J.L. 1992. Balance hídrico superficial de Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 16 p., 7 cartes.
- Roche M.F. 1986. Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Publ. Masson, Paris, 288 p.
- Rodier J. 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. Mémoires Orstom 6. Orstom, Paris, 137 p.
- Rodier J. 1975. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Tome 1. Ed. Dunod, Paris, 629 p.
- Ronchail J. 1985. Situations météorologiques et variations climatologiques en Bolivie. Publ. Phicab, La Paz, 64 p.
- Ronchail J. 1985. Relations de saisons remarquables avec la structure de l'atmosphère et les situations météorologiques sur l'Altiplano Boliviano-Peruvien. Publ. Phicab, La Paz, 38 p.
- Ronchail J. 1986. Situations atmosphériques et précipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie, Bolivie. Publ. Phicab, La Paz, 43 p.
- Ronchail J. 1986. Situations atmosphériques et températures comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie, Bolivie. Publ. Phicab, La Paz, 37 p.
- Ronchail J. 1986. Variations climatiques hivernales à Santa Cruz de la Sierra, Amazonie bolivienne. In Impacto del desarrollo en la ecología del tropico boliviano, Santa Cruz, Avril 1986. Publ. Phicab, La Paz, 15 p.
- Ronchail J. 1988. Variabilidad del tiempo en Bolivia, la anomalía climática del invierno 1988. Conferencia en la academia de Ciencias. Publ. Phicab, La Paz, 15 p.
- Ronchail J. 1989. Advections polaires en Bolivie : mise en évidence et caractérisation des effets climatiques. Hydrologie continentale 4(1) : 49-56.
- Roose E. 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Travaux et documents de l'Orstom, N° 130, 569 p.
- Ropelewski C.F., Halpert M.S. 1989. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. Journal of Climate 2(3) : 268-284.
- Roux M., Servant-Vildary S. 1984. Comparaisons statistiques de peuplement de diatomées fossiles et actuelles provenant des montagnes de Bolivie. Cahiers Orstom Série Géologie 14(1) : 3-13.
- Salati E., Matsui E. 1981. Isotopic Hydrology in the Brazilian Amazon Basin, 111-120. In Isotope Hydrology, Bogotá, August 1980.
- Salati E., Marques J. 1984. Climatology of the Amazon region, 85-126. In The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Salati E., Marques J., Molion L.C.B. 1978. Origem e distribuição das chuvas na Amazônia. Interciência 3 : 200-206.
- Salati E., Dall'Olio A., Matsui E., Gat J. 1979. Recycling of Water in the Amazon Basin : an Isotopic Study. Water Resources Research 15(5) : 1250-1258.
- Salo J., Kalliola R., Häkkinen I., Mäkinen Y., Niemelä P., Puhakka M., Coley P.D. 1986. River dynamics and the diversity of Amazon lowland forest. Nature, 322 : 254-258.
- Sayles F.L., Mangelsdorf P.C. 1979. Cation-exchange characteristics of Amazon River suspended sediment and its reaction with seawater. Geochimica et Cosmochimica Acta 43 : 767-779.
- Scanvic J.Y., Girault F. 1989. Imagerie Spot-1 et inventaire des mouvements de terrain : l'exemple de La Paz, Bolivie. Photo Interprétation 1989-2(1) : 1-20.
- Scanvic J.Y., Rouzeau O., Colleau A. 1990. Spot, outil d'aménagement. Exemple de réalisation par télédétection et analyse multicritère d'une cartographie des zones sensibles aux mouvements de terrain : le site de La Paz - Bolivie. Publ. BRGM, R31532, Orléans, 68 p.
- Schlesinger W.H., Melack J.M. 1981. Transport of organic carbon in the world's rivers. Tellus, 33 : 172-187.

- Schmidt G.W. 1972. Chemical properties of some waters in the tropical rain-forest region of Central Amazonia along the new road Manaus-Caracará. Amazoniana 3(2) : 199-207.
- Schmidt G.W. 1972. Amonts of suspended solids and dissolved substances in the middle reaches of the Amazon over the course of one year (August, 1969 - July 1970). Amazoniana 3(2) : 208-223.
- Schmidt G.W. 1972. Seasonal changes in water chemistry of a tropical lake (Lago do Castanho, Amazonia, South America). Verh. Internat. Verein. Limnol. 18 : 613-621.
- Schmidt G.W. 1973. The limnology of a tropical floodplain lake in central Amazonia (Lago Castanho). Amazoniana 4(2) : 139-203.
- Schumm S.A. 1954. The relation of drainage basin relief to sediment loss, 216-219. In Comptes-rendus et rapports de la commission d'érosion continentale, Rome, IAHS Publ. 36.
- Schumm S.A. 1963. The disparity between present rates of denudation and orogeny. U.S. Geological Survey Prof. Paper : 454H, 13 p.
- Schumm S.A. 1977. The fluvial System. Ed. J. Wiley, New York, 338 p.
- Sébrier M., Lavenu A., Fornari M., Soulas J.P. 1988. Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present. Géodynamique 3(1/2) : 85-106.
- SEMENA, Servicio de Mejoramiento de la Navegación Amazónica. 1988. Rios de la Amazonia Boliviana. Explotación de las vías navegables. Publ. Semena, Trinidad, 59 p.
- Sempere T., Hérail G., Oller J., Bonhomme M.G. 1990. Late Oligocene - early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia. Geology 18 : 946-949.
- Servant M., Fontes J.C. 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. Cahiers Orstom Série Géologie 10(1) : 9-23.
- Servant M., Villarroel R. 1979. Le problème paléoclimatique des Andes boliviennes et de leurs piedmonts amazoniens au Quaternaire. Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris 288 : 665-668.
- Servant M., Fontes J.C. 1984. Les basses terrasses fluviales du Quaternaire récent des Andes boliviennes. Datation par le  $^{14}\text{C}$ . Interprétations paléoclimatiques. Cahiers Orstom Série Géologie 14(1) : 15-28.
- Servant M., Fontes J.C., Argollo J., Saliège J.F. 1981. Variations du régime et de la nature des précipitations au cours des 15 derniers millénaires dans les Andes de Bolivie. Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris 292 : 1209-1212.
- Servant M., Fontes J.C., Rieu M., Saliège J.F. 1981. Phases climatiques arides holocène dans le Sud-Ouest de l'Amazonie (Bolivie). Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris 292 : 1295-1297.
- Servant M., Sempere T., Argollo J., Bernat M., Feraud G., Lo Bello P. 1989. Morphogénèse et soulèvement de la Cordillère Orientale des Andes de Bolivie au Cénozoïque. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris 309 : 417-422.
- Servant-Vildary S. 1978. Les diatomées des dépôts lacustres quaternaires de l'Altiplano bolivien. Cahiers Orstom Série Géologie 10(1) : 25-35.
- Servant-Vildary S. 1984. Les diatomées des lacs sursalés boliviens. Cahiers Orstom Série Géologie 14(1) : 35-53.
- Servant-Vildary S. 1978. Les diatomées des sédiments superficiels d'un lac salé, chloruré, sulfaté sodique de l'Altiplano bolivien, le lac Poopó. Cahiers Orstom série Géologie 10 : 79-90.
- Siemens A. 1896. Cable laying on the Amazon River. Nature 139(54) : 162-164.
- 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. Sedimentation im Amazonasgebiet. Geologische Rundschau, 45 : 608-633.
- 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. 1965. Bemerkung zur Typologie amazonischer Flüsse. Amazoniana 1(1) : 74-83.
- Sioli H. 1967. Studies in Amazonian Waters, 9-50. In Biota Amazônica, Belem, 1966.
- Sioli H. 1968. Hydrochemistry and Geology in the Brazilian Amazon Region. Amazoniana 1(3) : 267-277.
- Sioli H. 1969. Ökologie im brasilianischen Amazonasgebiet. Naturwissenschaften 56(5) : 248-255.
- 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. Introduction : History of the discovery of the Amazon and of research of Amazonian waters and landscapes, 1-13. In The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Sioli H. 1984. The Amazon and its main affluents : Hydrography, morphology of the river courses, and river types, 127-165. In The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht.
- Sioli H., Klinge H. 1961. Über Gewässer und Böden des brasilianischen Amazonasgebietes. Die Erde 92(3) : 205-219.

Références bibliographiques.

- Sioli H., Klinge H. 1962. Sólitos, tipos de vegetação e águas na Amazônia. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi 1 : 27-41.
- Snow J.W. 1976. The climate of Northern South America, 295-403. *In* World Survey of Climatology, vol. 12, H.E. Landsberg (ed.), Elsevier, Amsterdam.
- SOFRELEC, Société Française d'Etudes et de Réalisation d'Equipements Electriques. 1978. Estudio de factibilidad del proyecto multiple San Jacinto. Publ. Sofrelec, Paris, 173 p.
- Sombroek W.G. 1966. Amazon soils. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Wageningen, 292 p.
- Sombroek W.G. 1984. Soils of the Amazon region, 521-535. *In* The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht
- Spitz A., Leenheer J. 1991. Dissolved organic carbon in rivers, 213-232. *In* Biogeochemistry of Major World Rivers, Scope 42, Degens E.T., Kempe S., Richey J.E. (eds.), J. Wiley, Chichester.
- Stallard R.F. 1985. River chemistry, geology, geomorphology, and soils in the Amazon and Orinoco basins, 293-316. *In* The Chemistry of Weathering, Drever J.I. (ed.), Reidel, Dordrecht.
- Stallard R.F. 1988. Weathering and erosion in the humid tropics, 225-249. *In* Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles, Lerman A. & Meybeck M. (eds.), Kluwer, Dordrecht.
- Stallard R.F., 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., 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.
- Sternberg H.O.R. 1950. Vales tectônicos na planície amazônica ? Revista Brasileira de Geografia 12(4) : 3-26.
- Sternberg H.O.R. 1975. The Amazon River of Brazil. Geographische Zeitschrift 40, 74 p.
- Sternberg H.O.R. 1987. Aggravation of floods in the Amazon River as a consequence of deforestation ? Geografiska Annaler 69A(1) : 201-219
- Sternberg H.O.R., Russel R.J. 1952. Fracture patterns in the Amazon and Mississippi valleys, 380-385. *In* 17th Internat. Congress IGU, Washington, 1952.
- Stiglich G., Von Hassel J.M., Olivera J.M., Ontaneda J.M. 1907. Últimas exploraciones ordenadas por la Junta de Vías Fluviales a los ríos Ucayali, Madre de Dios, Paucartambo y Urubamba. Tip. La Opinión Nacional, Lima, 461 p.
- Subramanian V., Ittekkot V. 1991. Carbon transport by the Himalayan rivers, 157-168. *In* Biogeochemistry of Major World Rivers, Degens E.T., Kempe S., Richey J.E. (eds.), Scope 42, J. Wiley.
- Sundborg A. 1986. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. Publ. Unesco, Paris, 161 p.
- Taborga Torrico J. 1963. El transporte fluvial en Bolivia. Tomo I : Cuenca de los ríos Ichilo y Mamore. Publ. Fuerza Naval Boliviana, La Paz, 169 p.
- Taborga Torrico J. 1964. El transporte fluvial en Bolivia. Tomo II : Cuenca de los ríos Beni, Madre de Dios y Orton. Publ. Fuerza Naval Boliviana, La Paz, 169 p.
- Taborga Torrico J. 1967. El transporte fluvial en Bolivia. Tomo III : Cuenca del Río Itenez. Publ. Fuerza Naval Boliviana, La Paz, 77 p.
- Tardy Y. 1969. Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mémoires du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, 31 : 199 p.
- Tardy Y. 1986. Le cycle de l'eau. Publ. Masson, Paris, 338 p.
- Tastet J.P., Jouanneau J.M., Latouche C. 1989. Microgranulométrie des suspensions de l'Oubangui et du Congo, 51-57. *In* Opération Grands Bassins Fluviaux, Premiers résultats, Note d'information N° 3. Publ. Pirat/Orstom, Montpellier.
- Teixeira J.F., Medeiros G.A., Burian G.P. 1990. Estudo da relação entre chuva e vazão média em bacias hidrográficas do Estado do Acre. Publ. Univ. Estadual de Campinas, 18 p.
- Thomas R.B. 1985. Estimating Total Suspended Sediment Yield with Probability Sampling. Water Resources Research 21(9) : 1381-1388.
- Thornes J.B. 1969. Variability in Specific Conductance and pH in the Casiquiare-Upper Orinoco. Nature 221 : 461-462.
- Tricart J. 1974. Existence de périodes sèches au Quaternaire en Amazonie et dans les régions voisines. Reviews in Geomorphology Dynamics 12 : 145-158.
- Tricart J. 1975. Influence des oscillations climatiques récentes sur le modelé en Amazonie Orientale (Région de Santarém) d'après les images radar latéral. Z. Geomorph. N.F. 19(2) : 140-163.
- Tricart J. 1977. Types de lits fluviaux en Amazonie brésilienne. Annales de Géographie, 473 : 1-54.
- Trimonis E.S., Stryuck V.L., Gordeev V.V. 1987. Quantitative distribution of suspended matter in the Amazon river and adjoining region of the Atlantic Sea (en russe). Oceanologia 32(6) : 971-976.

- Trystram F. 1989. Le procès des étoiles. 1735-1771, Récit de la prestigieuse expédition de trois savants français en Amérique du Sud et des mésaventures qui s'ensuivirent. Ed. Seghers, Paris, 287 p.
- UNESCO. 1981. Carte de la végétation d'Amérique du Sud, notice explicative. Publ. Unesco, Paris, 176 p.
- UNESCO. 1987. Primer taller sobre el balance hídrico de América del Sur, La Paz, Mayo 1987. Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo, 88 p.
- Ungemach H. 1967. Sôbre o balanço metabólico de íônios inorgânicos da área do sistema do Rio Negro, 221-225. *In Biotá Amazônica*, Belem, 1966.
- Ungemach H. 1972. Die Ionenfracht des Rio Negro, Staat Amazonas, Brasilien. *Amazoniana* 3(2) : 175-185.
- Ungemach H. 1972. Regenwasseranalysen aus Zentralamazonien, ausgeführt in Manaus, Amazonas, Brasilien. *Amazoniana* 3(2) : 186-198.
- Václav E., Serrano Cavalcante A.J. 1983. Recent hydrological and climatological activities in the Amazon basin, Brazil, 365-373. *In Hydrology of Humid Tropical Regions*, Keller R. (ed.), IAHS Publ. 140.
- Valdivia M. 1968. Estudio geológico regional de Toro-Toro y sus alrededores. Tesis Umsa-Geobol, La Paz, 101 p.
- Van Vuuren W.E. 1982. Prediction of sediment yield for mountainous basins in Colombia, South America, 313-325. *In Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield*, Walling D.E. (Ed.), IAHS Publ. 137.
- Vanoni V.A. 1977. Sedimentation Engineering. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*, No 54, 745 p.
- Varnoux L. 1909. Régimen hidrográfico del río Madre de Dios. *Boletim de la Sociedad Geografica de La Paz* 27,28, 29 : 14-17.
- Vásquez F. 1561. Relation du voyage et de la rébellion d'Aguirre. Trad. B. Emery. Ed. J. Millon, 1989, Grenoble, 187 p.
- Vegas Vilarrúbia T., Paolini J., Herrera R. 1988. A physico-chemical survey of blackwater rivers from the Orinoco and the Amazon basins in Venezuela. *Arch. Hydrobiol.*, 111(4) : 491-506.
- Villa Nova N.A., Salati E., Matsui E. 1976. Estimativa da evapotranspiração na bacia Amazônica. *Acta Amazônica* 6 : 215-228.
- Villalta J.S., Olivera J.M., Carbajal F., Ontaneda J.M., Rivero A.A., Málaga M.W. 1904. Nuevas exploraciones en la hoya del Madre de Dios. Ed. Junta de vías fluviales, Lima, 184 p.
- Vital H., Faria L.E. 1992. Arari, étude d'un lac tropical. Ile de Marajo, 541-558. *In Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le Quaternaire*, M.T. Prost (ed.), Ostom, Paris.
- Vollmers H.J., Palenque Espada G. 1983. Sediment measurements in the Pilcomayo River in Bolivia, 1050-1070. *In River Sedimentation*, Nanjing, October 1983.
- Vuillaume G. 1968. Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne. Bassin représentatif de Kountkougout (Niger). *Cahiers ORSTOM Série Hydrologie*, 5(2) : 33-47.
- Walling D.E. 1977. Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers, 34-48. *In Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*, Paris, July 1977. IAHS Publ. 122.
- Walling D.E. 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65 : 209-237.
- Walling D.E., Webb B.W. 1981. The reliability of suspended sediment load data, 177-194. *In Erosion and Sediment Transport Measurement*, Florence, June 1981. IAHS Publ. 133.
- Walling D.E., Kane P. 1982. Temporal variation of suspended sediment properties, 409-419. *In Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield*, Walling D.E. (eds.). IAHS Publ. 137.
- Walling D.E., Webb B.W. 1982. Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields, 327-337. *In Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield*, Walling D.E. (Ed.), IAHS Publ. 137.
- Walling D.E., Webb B.W. 1983. The dissolved loads of rivers : a global overview, 3-20. *In Dissolved Loads of Rivers and Surface Water Quantity/Quality Relationships*, Webb B.W. (ed.), IAHS Publ. 141.
- 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.
- Walling D.E., Webb B.W. 1988. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yields : somme further comments, 337-350. *In Sediment Budgets*, Bordas M.P. & Walling D.E. (Eds.). IAHS Publ. 174.
- Ward R.D. 1898. Water surface temperature of Lake Titicaca. *Science* 7(158) : 28-29.
- Wasson J.G., Marin R. 1988. Tipología y potencialidades biológicas de los ríos de altura en la región de La Paz, Bolivia. *In Congreso Ibero-Americano y del Caribe sobre la Pesca y la Acuicultura*, Margarita, Mayo 1988.
- Wasson J.G., Guyot J.L., Dejoux C., Roche M.A. 1989. Regimen termico de los ríos de Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 35 p.

Références bibliographiques.

- Wasson J.G., Guyot J.L., Sanejouand H. 1991. Premières données concernant le carbone organique transporté par le Rio Desaguadero (Altiplano bolivien). Revue des Sciences de l'Eau 4 : 363-379.
- Weddell H.A. 1853. Voyage dans le Nord de la Bolivie et dans les parties voisines du Pérou, ou Visite au district aurifère de Tipuani. Lib. Bertrand, Paris, 571 p.
- Williams P.M. 1968. Organic and Inorganic Constituents of the Amazon River. Nature 218 : 937-938.
- Wilke B.M., Zech W. 1986. Mineralogies of silt and clay fractions of twelve soil profiles in the Bolivian Andes (Callavaya Region). Geoderma 39(3) : 193-207.
- Wilson L. 1977. Sediment yield as a function of climate in United States rivers, 82-92. In Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters, Paris, July 1977. IAHS Publ. 122.
- Wirrmann D. 1987. El lago Titicaca : sedimentología y paleohidrología durante el Holoceno (10000 años B.P.- actual). Publ Orstom, La Paz, 61 p.
- Wirrmann D., Oliveira Almeida L.F. 1987. Low Holocene level (7700 to 3650 years ago) of Lake Titicaca (Bolivia). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 59 : 315-323.
- Wissmar R.C., Richey J.E., Stallard R.F., Edmond J.M. 1980. Metabolismo do plâncton e ciclo do carbono no rio Amazonas, seus tributários e águas de várzea, Peru-Brasil, maio-junho. Acta Amazônica 10(4) : 823-834.
- Wood P.A. 1977. Sediment transport in the Hope River, Jamaica : a tropical drainage basin characterized by seasonal flow, 149-156. In Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters, Paris, July 1977. IAHS Publ. 122.
- Ybert J.P. 1982. Analyse palynologique de la coupe holocène du Rio Chiarjahuira sur l'Altiplano bolivien. Cahiers Orstom Série Géologie 12(2) : 125-133.
- Ybert J.P. 1984. Diagramme sporopollinique de la coupe holocène du Rio Chuquiaguillo sur l'Altiplano bolivien. Cahiers Orstom Série Géologie 14(1) : 29-34.

## Cartes utilisées

### Cartes topographiques.

Mapa de la República de Bolivia. 1/1,000,000<sup>ème</sup>, Instituto Geográfico Militar (IGM), La Paz, 1980.

Mapa físico político de la Republica del Peru. 1/2,000,000<sup>ème</sup>, Instituto Geográfico Militar (IGM), Lima, 1970.

Bolivia, Brazil. World Travel Map. 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Bartholomew, Edinburgh, 1988.

Peru, Colombia, Venezuela, Ecuador, Guyana, Surinam, World Travel Map. 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Bartholomew, Edinburgh, 1989.

South America, World Travel Series. 1/10,000,000<sup>ème</sup>, Bartholomew, Edinburgh, 1978.

### Cartes topographiques au 1/250,000 de l'Institut Géographique Militaire.

Aiquile, 1971.

Bañados del Izozog, 1979.

Camiri, 1984.

Cerro Capitan Ustarez, 1980.

Charagua, 1980.

Cochabamba, 1980.

Concepción, 1985.

Corocoro, 1981.

Cótoca, 1975.

Fortín Suarez Arana, 1975.

Guayaramerin, 1984.

La Paz, 1980.

Puerto Gonzalo Moreno, 1986.

Punata, 1984.

Riberalta, 1986.

Rio Yata, 1984.

San Ignacio de Velasco, 1977.

San José de Chiquitos, 1976.

Santa Cruz de La Sierra, 1974.

Sucre, 1971.

Uncia, 1969.

Vallegrande, 1972.

### Cartes thématiques.

Atlas climatique de l'Amérique du Sud, 1/10,000,000<sup>ème</sup>, Unesco, Paris, 1975.

Atlas géologique du monde. Feuille 4 : Amérique du Sud, 1/10,000,000<sup>ème</sup>, Unesco, Paris, 1981.

Carte de la végétation d'Amérique du Sud, 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Unesco, Paris, 1980.

Mapa Geológico do Brasil, 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Ministério das Minas e Energia, 1971.

Mapa Ecológico de Bolivia, 1/1,000,000<sup>ème</sup>, Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios (Maca), Organización de los Estados Americanos (OEA), La Paz, 1975.

Mapa Geológico de Bolivia, 1/1,000,000<sup>ème</sup>, Yacimientos Petrolíferos Fiscales de Bolivia (YPFB) y Servicio Geológico de Bolivia (Geobol), La Paz, 1978.

Mapa de Cobertura y Uso actual de la Tierra, Bolivia, 1/1,000,000<sup>ème</sup>, Programa Erts, Servicio Geológico de Bolivia (Geobol), La Paz, 1978.

Mapa Hidrografico de Bolivia, 1/1,000,000<sup>ème</sup>, Instituto Geográfico Militar (IGM), La Paz, 1985.

Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A. & Rocha N. (eds.), Publ. Phicab, La Paz, 1985.

Mapa de las salinidades ionicas de los rios de la cuenca amazonica de Bolivia, 1/10,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Abasto N., Toleda M., Cordier J.P., Pointillart C. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1986.

Mapa de concentraciones en aniones de los rios de la cuenca amazonica de Bolivia, 1/10,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Abasto N., Toleda M., Cordier J.P., Pointillart C. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1986.

Mapa de concentraciones en cationes de los rios de la cuenca amazonica de Bolivia, 1/10,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Abasto N., Toleda M., Cordier J.P., Pointillart C. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1986.

Mapa de precipitation anual de Bolivia, 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1990.

Mapa de temperaturas anuales de Bolivia, 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1990.

Mapa de evapotranspiración real anual de Bolivia, 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1990.

#### Références bibliographiques.

Mapa de coeficiente de escurrimiento de Bolivia, 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1990.

Mapa de caudal específico de Bolivia, 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1990.

Mapa de las cuencas hidrograficas y caudales mensuales de Bolivia, 1/5,000,000<sup>ème</sup>, Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. (eds.). Publ. Phicab, La Paz, 1990.

#### Relevés divers.

Levantamiento direccional del Río Beni, 1/12,500<sup>ème</sup>, Servicio al Mejoramiento de la Navegación Amazónica (SEMENA), Trinidad, 1987, 142 hojas.

Levantamiento direccional del Río Ichilo-Mamoré, 1/50,000<sup>ème</sup>, Servicio al Mejoramiento de la Navegación Amazónica (SEMENA), Trinidad, 1989, 18 hojas.

Levantamiento direccional del Río Mamoré, 1/50,000<sup>ème</sup>, Servicio al Mejoramiento de la Navegación Amazónica (SEMENA), Trinidad, 1989, 52 hojas.

Levantamiento direccional del Río Madre de Dios, 1/50,000<sup>ème</sup>, Servicio al Mejoramiento de la Navegación Amazónica (SEMENA), Trinidad, 1989, 34 hojas.

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

1 : Les grands fleuves du bassin Atlantique Sud .....	p. 21
2 : Le bassin de l'Amazone .....	p. 23
3 : Carte géologique simplifiée du cours aval de l'Amazone .....	p. 25
4 : Les sous-bassins hydrographiques du bassin amazonien .....	p. 27
5 : Profils en long des fleuves du bassin amazonien .....	p. 28
6 : Surfaces drainées par l'Amazone .....	p. 28
7 : Pluviométrie moyenne annuelle du bassin amazonien .....	p. 29
8 : Régime des précipitations dans le bassin amazonien .....	p. 30
9 : Distribution des vitesses lors d'un jaugeage du Rio Solimões à Manacapuru .....	p. 30
10 : Débits du Rio Solimoes à Manacapuru de 1972 à 1987 .....	p. 32
11 : Hauteurs d'eau observées de janvier à décembre 1986 sur l'Amazone et de ses principaux tributaires.....	p. 32
12 : Hauteurs d'eau moyennes annuelles du Rio Negro à Manaus et débits moyens annuels du Rio Solimões à Manacapuru .....	p. 33
13 : Débit du Rio Solimões à Manacapuru vs. hauteur d'eau du Rio Negro à Manaus .....	p. 34
14 : Distribution spatiale des concentrations en MES sur le Rio Solimões à Manacapuru .....	p. 37

## CHAPITRE II

15 : Carte du bassin du Rio Madeira .....	p. 41
16 : Profil en long du Rio Madeira et de ses principaux tributaires .....	p. 41
17 : Les bassins hydrographiques de Bolivie .....	p. 42
18 : Les stations hydrométriques du réseau PHICAB en Bolivie .....	p. 44

## CHAPITRE III

19 : Les missions jésuites en territoire Moxos en 1713 .....	p. 49
20 : La pénétration des franciscains dans le bassin montagneux de l'Alto-Béni .....	p. 50
21 : Bassin du Rio Madeira à Villabella .....	p. 51
22 : Représentation 3D simplifiée du relief de la Bolivie .....	p. 52
23 : Vue 3D simplifiée du relief du bassin du Rio Madeira à Villabella .....	p. 54
24 : Courbe hypsométrique du bassin du Rio Madeira à Villabella .....	p. 52
25 : Courbes hypsométriques de six bassins andins de la région de La Paz .....	p. 55
26 : Vue partielle de l'image Landsat de la région de San Ramon, bassin du Rio Itenez .....	p. 56
27 : Les principaux tributaires du Rio Madeira à Villabella .....	p. 60
28 : Profil en long des rios Béni, Mamoré, et de leurs principaux affluents .....	p. 61
29 : Augmentation des surfaces drainées le long des rios Béni et Mamoré .....	p. 61
30 : Distribution de l'indice de sinuosité le long des rios Madre de Dios, Béni et Ichilo-Mamoré .....	p. 63
31 : Comparaison des cartes de 1987 et 1990 sur le Rio Béni à l'aval de Rurrenabaque .....	p. 62
32 : Evolution des pentes le long du Rio Béni en basses eaux .....	p. 64
33 : Distribution de fréquence des directions d'écoulement des rios Madre de Dios, Béni et Ichilo-Mamoré .....	p. 65
34 : Carte des précipitations moyennes annuelles de Bolivie .....	p. 69
35 : Distribution de la précipitation annuelle en fonction de l'altitude .....	p. 68
36 : Poids du mois de janvier sur la pluviométrie annuelle .....	p. 70
37 : Précipitation maximum en 24 heures vs. précipitation annuelle .....	p. 71
38 : Pluviométrie moyenne annuelle de trois stations andines .....	p. 72
39 : Pluviométrie moyenne annuelle de trois stations des Llanos .....	p. 72
40 : Distribution mensuelle des précipitations pour 6 stations de Bolivie .....	p. 73
41 : Température moyenne de l'air et altitude .....	p. 74
42 : Carte des températures moyennes annuelles .....	p. 76
43 : Température moyenne de l'eau et altitude .....	p. 74

44 : Précipitations et températures journalières à Trinidad .....	p. 75
45 : Rosace des vents à Trinidad .....	p. 77
46 : Débit spécifique vs. altitude et superficie du bassin versant .....	p. 79
47 : Débit moyen annuel des rios Béni et Mamoré .....	p. 82
48 : Evolution de la pluie annuelle à Trinidad, et des débits moyens annuels des rios Béni et Mamoré .....	p. 80
49 : Augmentation des débits le long des rios Béni et Mamoré .....	p. 82
50 : Représentation schématique des apports des formateurs du Rio Madeira .....	p. 83
51 : Evolution amont-aval de l'hydrogramme, le long du Rio Mamoré .....	p. 85
52 : Hydrogrammes des stations PHICAB du Béni .....	p. 84
53 : Hydrogrammes des stations PHICAB du Mamoré .....	p. 84
54 : Débit moyen mensuel du Rio Madeira à Villabella .....	p. 85
55 : Poids des mois de Janvier, Février et Mars sur l'écoulement annuel, en fonction de l'altitude et du ruissellement .....	p. 87
56 : Distribution de fréquence des débits moyens journaliers .....	p. 87
57 : Corrélogramme de la pluie journalière à Trinidad, et des débits moyens journaliers aux stations du réseau PHICAB .....	p. 88

#### CHAPITRE IV

58 : Localisation des bassins andins des rios Piray et Pilcomayo .....	p. 91
59 : Débit, matières en suspension et débit solide du Rio Piray à Angostura .....	p. 92
60 : Débit, matières en suspension, débit solide, matières dissoutes et débit dissous du Rio Pilcomayo à Villamontes .....	p. 92
61 : Corrélogrammes des débits moyens journaliers, des matières en suspension, du débit solide, des matières dissoutes et du débit dissous des rios Pilcomayo et Piray .....	p. 93
62 : Evolution des matières particulaires et dissoutes au cours d'une crue du Rio Béni à Rurrenabaque .....	p. 94
63 : Evolution de l'exportation annuelle de matières particulaires du Rio Piray à Angostura .....	p. 96
64 : Relation entre échantillon du fond et échantillon de surface, pour les rios Camata, Chimaté, Consata, Dinamarca, Korijahuira, Mariapo, Merkhe et Tipuani .....	p. 96
65 : Profils en travers, profils des vitesses, de la turbidité et de la conductivité, lors des jaugeages du Rio Béni à Rurrenabaque .....	p. 98
66 : Profils en travers, profils des vitesses, de la turbidité et de la conductivité, lors des jaugeages du Rio Béni à Cachuela Esperanza .....	p. 100
67 : Profils en travers, profils des vitesses, de la turbidité et de la conductivité, lors des jaugeages du Rio Mamoré à Guayaramerin .....	p. 100
68 : Concentration moyenne dans la section vs. concentration de l'échantillon de surface, stations du réseau PHICAB .....	p. 102
69 : Complexité de la relation entre matières en suspension et débit, River Dart à Bickleigh .....	p. 102
70 : Matières en suspension vs. débit pour quelques stations andines de Bolivie .....	p. 103
71 : Matières en suspension vs. turbidité, Rio Béni à Angosto del Bala et Rio Béni à Cachuela Esperanza .....	p. 103
72 : Les tournées hydrologiques du PHICAB en Amazonie bolivienne .....	p. 104
73 : Conductivité laboratoire vs. conductivité terrain des points d'eau .....	p. 105
74 : Salinité vs. conductivité, Rio Béni à Angosto del Bala et à Cachuela Esperanza .....	p. 108

#### CHAPITRE V

75. Carte des teneurs moyennes en matières en suspension .....	p. 110
76. Distribution statistique des matières en suspension .....	p. 111
77. Matières en suspension et altitude .....	p. 111
78. Matières en suspension vs. débit spécifique .....	p. 113
79 : Granulométrie des sédiments de fond dans le bassin du Rio Béni .....	p. 113
80 : Granulométrie des sédiments charriés, bassin du Rio Achumani, La Paz .....	p. 114
81 : Profils en long et évolution amont-aval du diamètre caractéristique ( $d_{50}$ ) des sédiments de fond du Rio Béni et de quelques tributaires andins .....	p. 114
82 : Evolution amont-aval du diamètre caractéristique ( $d_{50}$ ) des sédiments de fond du Rio Mamoré et de ses principaux tributaires andins .....	p. 115

83 : Granulométrie des matières en suspension dans le bassin andin du Rio Béni .....	p. 115
84 : Granulométrie des matières en suspension du Rio Béni .....	p. 117
85 : Granulométrie des matières en suspension du Rio Mamoré .....	p. 117
86 : Dimension des matières en suspension vs. débit, vs. teneurs en MES, Rio Mamoré à Puerto Ganadero et Montevideo .....	p. 116
87 : Localisation des points d'échantillonnage des matières en suspension en hautes eaux .....	p. 118
88 : Minéralogie des matières en suspension en hautes eaux dans les Andes .....	p. 119
89 : Evolution de la minéralogie globale sur le Rio Béni à Rurrenabaque .....	p. 119
90 : Minéralogie des argiles dans les matières en suspension des cours d'eau andins .....	p. 122
91 : Distribution des variables dans le plan des deux premières composantes de l'ACP sur la minéralogie des argiles, bassins andins .....	p. 122
92 : Evolution saisonnière de la minéralogie des argiles, stations du piedmont andin .....	p. 123
93 : Minéralogie des argiles : échantillon de MES vs. échantillon de sédiments, stations du réseau PHICAB dans les Llanos .....	p. 124
94 : Minéralogie des argiles dans les matières en suspension et dans les sédiments des Llanos	p. 125
95 : Minéralogie des argiles du Rio Madeira à Villabella .....	p. 125
96 : Teneur relative en MgO, CaO et Na <sub>2</sub> O des matières en suspension vs. débit spécifique, bassins andins .....	p. 127
97 : Géochimie (éléments majeurs) des matières en suspension en hautes eaux .....	p. 127
98 : Rapport SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) vs. débit spécifique pour les bassins andins .....	p. 128
99 : Evolution saisonnière de la géochimie (éléments majeurs) des matières en suspension, Rio Béni à Rurrenabaque .....	p. 129
100 : Géochimie des matières en suspension vs. géochimie des sédiments (éléments majeurs) stations du réseau PHICAB dans les Llanos .....	p. 130
101 : Géochimie des sédiments (éléments majeurs) stations du réseau PHICAB .....	p. 130
102 : Teneurs en éléments traces des matières en suspension .....	p. 132
103 : Evolution saisonnière des teneurs en éléments traces des matières en suspension, Rio Béni à Rurrenabaque .....	p. 132
104 : Géochimie des sédiments (éléments traces) stations du réseau PHICAB .....	p. 135
105 : Carbone organique particulaire vs. matières en suspension .....	p. 135
106 : Rapport COP/MES vs. MES .....	p. 135
107 : Débit, MES, COP/MES sur le Rio Béni à Rurrenabaque .....	p. 137
108 : Poids des mois de Janvier-Février-Mars sur l'exportation annuelle de sédiments en fonction de l'altitude, du ruissellement, et du poids de ces mois sur l'écoulement annuel .....	p. 139
109 : Débit moyen journalier et flux moyen journalier de MES dans les Andes .....	p. 141
110 : Régime hydrologique et régime des flux de matières en suspension, stations andines du bassin du Rio Béni .....	p. 142
111 : Régime hydrologique et régime des flux de matières en suspension, stations andines du bassin du Rio Mamoré .....	p. 142
112 : Concentration des matières en suspension vs. débits sur le Congo et l'Oubangui .....	p. 143
113 : Matières en suspension vs. débit, stations andines .....	p. 144
114 : Turbidités journalières, stations PHICAB du Rio Béni .....	p. 146
115 : Turbidités journalières, stations PHICAB du Rio Mamoré .....	p. 146
116 : Distribution de fréquence des turbidités journalières, stations du réseau PHICAB .....	p. 147
117 : Corrélogramme des turbidités journalières, stations du réseau PHICAB .....	p. 147
118 : Régime hydrologique et régime des flux de matières en suspension, stations PHICAB du bassin du Rio Béni .....	p. 149
119 : Régime hydrologique et régime des flux de matières en suspension, stations PHICAB du bassin du Rio Mamoré .....	p. 149
120 : Flux moyen mensuel de matières en suspension du Rio Madeira à Villabella .....	p. 148
121 : Turbidité journalière vs. débit moyen journalier, stations PHICAB du Rio Béni .....	p. 151
122 : Turbidité journalière vs. débit moyen journalier, stations PHICAB du Rio Mamoré .....	p. 151
123 : Matières en suspension vs. débit, stations du réseau PHICAB .....	p. 152
124 : Régime du transport de fond, Rio Huayllani à Achumani et Rio Unduavi à Sirupaya .....	p. 153
125 : Transport de fond vs. débit, Rio Huayllani à Achumani et Rio Unduavi à Sirupaya .....	p. 152
126 : Pente moyenne du bassin vs. pente du cours d'eau principal, vs. altitude moyenne du bassin, vs. superficie du bassin. Bassins andins .....	p. 156
127 : Indice de protection du sol vs. extension de la forêt, vs. pluviométrie annuelle .....	p. 157
128 : Taux de transport en suspension vs. pente moyenne, vs. indice lithologique de sensibilité à l'érosion, vs. indice de protection du sol, vs. débit spécifique .....	p. 157
129 : Taux de transport en suspension, vs. altitude moyenne, vs. ruissellement,	

pour différentes valeurs de l'indice lithologique de sensibilité à l'érosion .....	p. 158
130 : Flux de matières en suspension vs. débit, bassins andins, pour différentes valeurs de l'indice lithologique de sensibilité à l'érosion .....	p. 158
131 : Evolution amont-aval du débit et du flux de matières en suspension, bassins andins des rios Piray et Grande .....	p. 159
132 : Représentation schématique des apports en matières particulaires au Rio Madeira, stations du réseau PHICAB .....	p. 162
133 : Le débit et les apports en matières particulaires au Rio Madeira à Villabella par les rios Béni et Mamoré .....	p. 163

## CHAPITRE VI

134 : Teneurs en Cl <sup>-</sup> des eaux de pluie du bassin amazonien vs. distance à l'Océan Atlantique	p. 166
135 : Carte des teneurs moyennes en matières dissoutes .....	p. 168
136 : Distribution statistique des teneurs moyennes en matières dissoutes .....	p. 167
137 : Signification d'une boîte à moustaches (Box and Whisker Plot) .....	p. 170
138 : Distribution statistique de la physico-chimie des cours d'eau .....	p. 171
139 : Distribution statistique des éléments majeurs en solution .....	p. 172
140 : Matières en suspension vs. matières dissoutes .....	p. 173
141 : Matières dissoutes et altitude .....	p. 173
142 : Matières dissoutes vs. débit spécifique .....	p. 173
143 : Silice dissoute vs. somme des cations .....	p. 173
144 : Rapport SiO <sub>2</sub> /matière dissoute vs. matière dissoute .....	p. 173
145 : Silice dissoute et altitude .....	p. 174
146 : Somme des cations vs. conductivité à 25°C .....	p. 174
147 : Carte des ions dominants des cours d'eau .....	p. 175
148 : Distribution statistique des teneurs moyennes en matières dissoutes en fonction des ions dominants .....	p. 174
149 : Evolution de la salinité ionique globale des eaux, d'amont en aval .....	p. 176
150 : Carbone organique dissous vs. débit, Rio Béni à Angosto del Bala .....	p. 190
151 : Carbone organique dissous et altitude .....	p. 192
152 : Distribution statistique des teneurs en carbone organique dissous .....	p. 192
153 : Conductivités journalières, stations andines de l'Alto-Béni .....	p. 195
154 : Régime hydrologique et régime des flux de matières dissoutes, stations andines du bassin du Rio Béni .....	p. 195
155 : Conductivité journalière vs. débit moyen journalier, stations andines de l'Alto-Béni .....	p. 196
156 : Conductivité journalière, stations PHICAB du Rio Béni .....	p. 197
157 : Conductivité journalière, stations PHICAB du Rio Mamoré .....	p. 197
158 : Distribution de fréquence de la conductivité des eaux de sources d'aquifères carbonatés	p. 199
159 : Distribution de fréquence des conductivités journalières, stations du réseau PHICAB	p. 200
160 : Corrélogramme des conductivités journalières, stations du réseau PHICAB .....	p. 200
161 : Régime hydrologique et régime des flux de matières dissoutes, stations PHICAB du Rio Béni .....	p. 202
162 : Régime hydrologique et régime des flux de matières dissoutes, stations PHICAB du Rio Mamoré .....	p. 202
163 : Flux moyen mensuel de matières dissoutes du Rio Madeira à Villabella, 1983-1989 .....	p. 201
164 : Conductivité journalière vs. débit moyen journalier, stations PHICAB du Rio Béni .....	p. 204
165 : Conductivité journalière vs. débit moyen journalier, stations PHICAB du Rio Mamoré .....	p. 204
166 : Matières dissoutes vs. débit, stations du réseau PHICAB .....	p. 205
167 : Evolution du débit, de la température, du pH, des MES, des MD, et des éléments majeurs en solution, au cours d'une crue du Rio Béni à Rurrenabaque .....	p. 206
168 : Carte de localisation des points de prélèvements de la région de Trinidad .....	p. 208
169 : Distribution spatiale des MES, des MD, et des teneurs en K, dans le système Mocovi-Cokinoki-Tapada-d'Orbigny-Siquero-Mamoré-Okreni, en fin d'étiage, en montée des eaux et en hautes eaux .....	p. 209
170 : Taux de transport en solution vs. taux de transport en suspension, bassins andins .....	p. 210
171 : Taux de transport en solution vs. ruissellement .....	p. 211
172 : Flux de matières dissoutes vs. débit .....	p. 211
173 : Représentation schématique des apports en matières dissoutes au Rio Madeira, stations du réseau PHICAB .....	p. 213

174 : Le débit et les apports en matières dissoutes au Rio Madeira à Villabella, par les rios Béni et Mamoré .....	p. 214
175 : Flux spécifique de carbone organique dissous vs. extension de la couverture forestière ...	p. 214
176 : Flux spécifique de carbone organique dissous vs. ruissellement .....	p. 214
177 : Représentation schématique des apports en carbone organique dissous et particulaire au Rio Madeira, stations du réseau PHICAB .....	p. 215

## CONCLUSION

178 : Représentation schématique des flux de matières particulaires du Rio Madeira, des Andes vers la plaine amazonienne .....	p. 217
179 : Importance relative des différentes unités géographiques sur la superficie, le débit, et les flux de matières dissoutes et particulaires .....	p. 218
180 : Représentation schématique des débits et des flux de matières dissoutes et particulaires dans le bassin du Rio Madeira .....	p. 219
181 : Les flux de matières dissoutes et particulaires du Rio Madeira à Villabella .....	p. 218
182 : Flux élémentaires des phases dissoutes et particulaires du Rio Madeira à Villabella .....	p. 220
183 : Débit et flux moyens mensuels de matières dissoutes et particulaires du Rio Madeira à Villabella .....	p. 220

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I

I : Superficie des 20 plus grands bassins fluviaux du monde .....	p. 22
II : Débits de 20 grands fleuves mondiaux .....	p. 31
III : Débit moyen mensuel du Rio Solimoes à Manacapuru .....	p. 34
IV : Flux de matière dissoute de 20 grands fleuves .....	p. 36
V : Flux de matières en suspension de 20 grands fleuves .....	p. 37

## CHAPITRE II

VI : Le Rio Madeira dans le bassin amazonien .....	p. 40
VII : Les stations du réseau PHICAB en Amazonie bolivienne .....	p. 44

## CHAPITRE III

VIII : Distribution de la couverture végétale dans la partie bolivienne du bassin du Rio Madeira .....	p. 57
IX : Précipitation moyenne annuelle de 6 stations boliviennes .....	p. 71
X : Caractéristiques des stations hydrométriques utilisées .....	p. 80
XI : Coefficient d'auto-corrélation de la pluie journalière à Trinidad, et des débits moyens journaliers aux stations PHICAB, pour différents pas de temps .....	p. 88

## CHAPITRE IV

XII : Caractéristiques des bassins andins des rios Piray et Pilcomayo .....	p. 90
XIII : Coefficients de corrélation du débit (Q), des matières en suspension (MES), du débit solide (QS), des matières dissoutes (MD) et du débit dissous (QD), des rios Pilcomayo à Villamontes et Piray à Angostura, pour différents pas de temps (dt) .....	p. 91
XIV : Ecarts du débit solide et du débit dissous des rios Pilcomayo à Villamontes et Piray à Angostura, en fonction du pas de temps d'échantillonnage (dt) .....	p. 94
XV : Distribution de la turbidité et de la conductivité moyennes sur les 12 verticales, lors des jaugeages du Rio Béni à Rurrenabaque .....	p. 97
XVI : Distribution de la turbidité et de la conductivité moyennes sur les 12 verticales, lors des jaugeages aux stations du réseau PHICAB .....	p. 99
XVII : Exemple de calcul du flux de matières en suspension, Rio Béni à Portachuelo .....	p. 108

## CHAPITRE V

XVIII : Caractéristiques granulométriques des matières en suspension des fleuves andins .....	p. 116
XIX : Minéralogie des matières en suspension .....	p. 120
XX : Minéralogie des sédiments, stations du réseau PHICAB .....	p. 120
XXI : Géochimie des matières en suspension, éléments majeurs .....	p. 128
XXII : Géochimie des sédiments, éléments majeurs, stations du réseau PHICAB .....	p. 129
XXIII : Géochimie des matières en suspension, éléments traces .....	p. 131
XXIV : Géochimie des sédiments, éléments traces, stations du réseau PHICAB .....	p. 133
XXV : Teneurs élémentaires de la phase particulaire comparées à celles des grands fleuves de l'Amérique du Sud, et de la moyenne mondiale .....	p. 133
XXVI : Carbone organique particulaire, caractéristiques des cours d'eau échantillonnés .....	p. 136
XXVII : Rapport COP/MES .....	p. 137
XXVIII : Les matières en suspension dans les bassins andins .....	p. 140
XXIX : Les matières en suspension aux stations du réseau PHICAB .....	p. 145
XXX : Coefficient de corrélation des turbidités journalières aux stations du réseau PHICAB pour différents pas de temps .....	p. 148

XXXI : Taux de transport en suspension et caractéristiques géographiques des bassins andins	p. 155
XXXII : Bilan de l'exportation de matières en suspension des bassins andins	p. 160
XXXIII : Les matières en suspension dans un bassin du bouclier brésilien	p. 160
XXXIV : Bilan de l'exportation des matières en suspension des bassins du bouclier brésilien	p. 161
XXXV : Bilan du transport de matières en suspension dans les Llanos, stations du réseau PHICAB	p. 161
XXXVI : Bilan élémentaire des matières particulaires du Rio Madeira à Villabella	p. 163

## CHAPITRE VI

XXXVII : Répartition des cours d'eau échantillonnés	p. 170
XXXVIII : Physico-chimie des cours d'eau andins :	
A : bassins des rios Mapiří, Challana, Tipuani, Coroico	p. 178
B : bassins des rios Zongo, Kaka, La Paz, Luribay	p. 180
C : bassins des rios Tamampaya, Boopi, Cotacajes, Alto-Béni	p. 181
D : bassins des rios Béni, Yacuma, Sécuré	p. 182
E : bassins des rios Chaparé; Ichilo, Grande	p. 183
F : bassins des rios Grande (suite), Parapeti	p. 184
XXXIX : Géochimie des dépôts salins du bassin du Rio La Paz	p. 177
XXXX : Physico-chimie des cours d'eau des Llanos :	
A : bassins des rios Béni, Madre de Dios, Orthon	p. 186
B : bassins des rios Grande, Ichilo, Chaparé, Sécuré, Tijamuchi, Apéré, Yacuma, Mamoré, Itenez	p. 187
XXXXI : Physico-chimie des cours d'eau du bouclier brésilien :	
Bassins des rios Mamoré et Itenez	p. 188
XXXXII : Eléments traces en solution	p. 189
XXXXIII : Carbone organique dissous et caractéristiques des cours d'eau échantillonnés	p. 191
XXXXIV : Les matières dissoutes dans les bassins andins	p. 194
XXXXV : Les matières dissoutes aux stations du réseau PHICAB	p. 196
XXXXVI : Coefficient de corrélation des conductivités journalières aux stations du PHICAB	p. 201
XXXXVII : Taux de transport en solution (Td) de quelques bassins andins	p. 210
XXXXVIII : Bilan estimé de l'exportation de matières dissoutes des bassins andins	p. 211
XXXXIX : Bilan estimé de l'exportation de matières dissoutes des bassins du bouclier brésilien	p. 212
XXXXX : Bilan du transport de matières en solution dans les Llanos, stations du PHICAB	p. 212
XXXXXI : Bilan élémentaire des matières dissoutes du Rio Madeira à Villabella	p. 213

## LISTE DES PHOTOGRAPHIES

*(Toutes les photographies sont de Annie & Jean Loup GUYOT, sauf les N° 3 et 4 qui sont de Gilbert JACCON)*

Photo de couverture : Méandres du Rio Mamoré près de Trinidad .....	p. 1
1. L'illimani près de Sorata, dans la Cordillère Royale .....	p. 3
2. Le Rio Madre de Dios à la station de Miraflores .....	p. 3
3. La section de jaugeage de l'Amazone à Obidos .....	p. 18
4. Le bateau Gamboinha III utilisé pour le jaugeage de l'Amazone à Obidos .....	p. 18
5. Le lac Titicaca et la Cordillera Royale .....	p. 46
6. La vallée glaciaire d'Hichu Kkota dans le Cordillera Royale .....	p. 46
7. L'illimani surplombe la ville de La Paz .....	p. 53
8. La ville de Sorata et la vallée du Rio San Cristobal, au pied de l'illampu .....	p. 53
9. Entre la Cordillère Royale et La Paz, la bordure de l'Altiplano .....	p. 59
10. Les séries sédimentaires plio-quadernaires d'altitude, dans la région de La Paz .....	p. 59
11. Formes d'érosion dans les séries plio-quadernaires dans la région de La Paz .....	p. 64
12. Le Rio Achumani à La Paz, en période de hautes eaux .....	p. 66
13. Le Rio La Paz à Rio Abajo traverse la coulée sédimentaire quadernaire .....	p. 66
14. Coulée de débris dans la vallée du Rio Zongo .....	p. 78
15. Glissement de terrain dans la vallée du Rio Consata .....	p. 78
16 & 17. Coulée de boue dans la vallée du Rio La Paz .....	p. 81
18. La piste des Yungas dans la vallée du Rio Coroico .....	p. 86
19. La vallée du Rio Taquesi (Yungas), au pied du village de Yanacachi .....	p. 86
20. Le Rio La Paz à Palca, au pied de l'illimani .....	p. 95
21. Le Rio Khatu près de Quime .....	p. 95
22. Le Rio Zongo à Islani, en basses eaux .....	p. 101
23. Le Rio Zongo à Islani, en hautes eaux .....	p. 101
24. Cascade dans la vallée du Rio Coroico .....	p. 112
25. Rio Coroico à Caranavi .....	p. 112
26. La confluence des rios Taquesi et Unduavi à Puente Villa .....	p. 121
27. La confluence des rios Camata et Consata, près de Mapiri .....	p. 121
28. L'exploitation aurifère dans les alluvions du Rio Tipuani .....	p. 126
29. La confluence des rios Mapiri et Coroico, près de Guanay .....	p. 126
30. La rivière souterraine d'Umajalanta, région karstique de Torotoro .....	p. 134
31. Le Rio Grande à La Viña, et les séries carbonatées du Crétacé .....	p. 134
32. Tournée hydrologique sur le Rio Alto-Béni .....	p. 138
33. Jaugeage à partir d'un téléphérique, Rio Béni à Angosto del Bala .....	p. 143
34. Les séries sédimentaires tertiaires dans l'Alto-Béni .....	p. 150
35. Glissement de terrain en bordure du Rio Alto-Béni .....	p. 150
36. Le Rio Chaparé à Villa Tunari, au piedmont des Andes .....	p. 153
37. Les dépôts sédimentaires du Rio Grande, dans la zone de piedmont .....	p. 164
38. Reprise éolienne des sédiments des rios Grande et Piray, dans la région de Santa Cruz .....	p. 164
39. Tournée hydrologique dans le Béni .....	p. 169
40. Jaugeage depuis une pirogue, Rio Mamoré à Puerto Ganadero .....	p. 169
41. Cours d'eau typique des Llanos (eaux noires) .....	p. 179
42. Un fleuve des Llanos méandre dans la savane inondable du Béni .....	p. 179
43. Dépôts de bois sur les rives du Rio Béni .....	p. 185
44. Piégeage de sédiments par la végétation dans la plaine d'inondation, région de Trinidad .....	p. 185
45. Le Rio Mamoré à Puerto Varador, en hautes eaux .....	p. 193
46. Le Rio Mamoré à Puerto Siles, en basses eaux .....	p. 193
47. Les lagunes de la région de Trinidad .....	p. 198
48 & 49. La confluence des rios Itenez (eaux noires) et Mamoré (eaux blanches) .....	p. 203
50. Méandres du Rio Mamoré dans les Llanos .....	p. 207
51. Les rapides du Rio Béni à Cachuela Esperanza .....	p. 207
52. Le Rio Béni à Cachuela Esperanza .....	p. 215
53 & 54. Les séries du Paléozoïque des Sierras Chiquitánias dans l'Orient bolivien .....	p. 216
55. Le Rio Orthon à la station de Caracoles .....	p. 221
56. La pirogue du PHICAB sur le Rio Mamoré à Guayaramerin .....	p. 221

## TABLE DES MATIERES

Sommaire .....	p. 5
Remerciements .....	p. 7
Résumés .....	p. 9
Résumé .....	p. 9
Resumen .....	p. 11
Resumo .....	p. 13
Abstract .....	p. 15
 INTRODUCTION .....	 p. 17
 I. LE BASSIN AMAZONIEN .....	 p. 19
I.A. Un peu d'histoire .....	p. 20
I.A.1. Le siècle des conquérants découvreurs .....	p. 20
I.A.2. Le siècle des missionnaires pacificateurs .....	p. 20
I.A.3. Le siècle des savants explorateurs .....	p. 20
I.B. Le bassin de l'Amazone .....	p. 21
I.B.1. Extension et limites .....	p. 21
I.B.2. Les grandes unités morfo-structurales .....	p. 23
I.B.2.a. Histoire géologique du bassin amazonien .....	p. 23
I.B.2.b. Les boucliers guyanais et brésilien .....	p. 24
I.B.2.c. Les Andes .....	p. 24
I.B.2.d. La plaine amazonienne ou Llanos .....	p. 24
I.B.3. Les sols et la végétation .....	p. 26
I.B.4. Les grands bassins hydrographiques .....	p. 27
I.C. Le climat du bassin amazonien .....	p. 29
I.D. L'hydrologie de l'Amazone .....	p. 30
I.E. Les matières dissoutes et particulaires .....	p. 34
I.E.1. Les types d'eau .....	p. 34
I.E.2. Les matières dissoutes .....	p. 35
I.E.3. Les matières particulaires .....	p. 36
 II. LE PROGRAMME PHICAB DANS LE BASSIN DU RIO MADEIRA .....	 p. 39
II.A. Le Rio Madeira .....	p. 40
II.A.1. Le Rio Madeira dans le bassin amazonien .....	p. 40
II.A.2. Le haut-bassin du Rio Madeira en Bolivie .....	p. 42
II.B. Le Programme PHICAB en Bolivie .....	p. 42
II.B.1. L'hydrologie bolivienne .....	p. 42
II.B.2. Les objectifs du programme PHICAB .....	p. 42
II.B.3. La problématique .....	p. 43
II.B.4. Le partenariat .....	p. 45
 III. LE BASSIN DU RIO MADEIRA A VILLABELLA (BOLIVIE) .....	 p. 47
III.A. Un peu plus d'histoire .....	p. 48
III.A.1. L'époque précolombienne .....	p. 48
III.A.2. La conquête des Andes .....	p. 48
III.A.3. Les religieux et la pénétration des Llanos .....	p. 48
III.A.4. Les savants, les explorateurs et l'indépendance .....	p. 49
III.B. Limites et extension du bassin .....	p. 50
III.C. Le relief .....	p. 52
III.C.1. Le bouclier brésilien .....	p. 54
III.C.2. Les Andes .....	p. 54
III.C.3. Les Llanos .....	p. 55
III.D. La géologie .....	p. 55
III.D.1. Le bouclier brésilien .....	p. 55
III.D.2. Les Andes .....	p. 56
III.D.3. Les Llanos .....	p. 57

III.E. Les sols et la végétation .....	p. 57
III.E.1. Le Bouclier brésilien .....	p. 58
III.E.2. Les Andes .....	p. 58
III.E.3. Les Llanos .....	p. 58
III.F. L'hydrographie .....	p. 58
III.F.1. Les bassins hydrographiques .....	p. 58
III.F.2. Les fleuves andins dans la plaine amazonienne .....	p. 62
III.G. Le climat .....	p. 67
III.G.1. Les données paléoclimatiques .....	p. 67
III.G.2. Les précipitations .....	p. 67
III.G.3. Les températures .....	p. 74
III.G.4. L'évapotranspiration et le ruissellement .....	p. 77
III.G.5. Le vent dans les Llanos .....	p. 77
III.H. L'hydrologie .....	p. 79
III.H.1. Les modules et les débits spécifiques .....	p. 79
III.H.2. Les régimes hydrologiques .....	p. 83
IV. A LA RECHERCHE D'UNE METHODE .....	p. 89
IV.A. L'échantillonnage .....	p. 90
IV.A.1. Variabilité temporelle .....	p. 90
IV.A.1.a. Variabilité saisonnière .....	p. 90
IV.A.1.b. Variabilité au cours d'une crue .....	p. 94
IV.A.1.c. Variabilité interannuelle .....	p. 94
IV.A.2. Variabilité spatiale dans la section de jaugeage .....	p. 96
IV.A.2.a. Dans les Andes .....	p. 96
IV.A.2.b. Au cours d'une crue à une station du piedmont andin .....	p. 97
IV.A.2.c. Dans les Llanos au cours du cycle hydrologique .....	p. 98
IV.A.3. Choix d'un protocole d'échantillonnage .....	p. 102
IV.A.3.a. Pas de temps .....	p. 102
IV.A.3.b. Mode d'échantillonnage .....	p. 104
IV.A.3.c. Conservation des échantillons .....	p. 105
IV.B. Les analyses .....	p. 105
IV.B.1. Au laboratoire du SENAMHI (El Alto, La Paz) .....	p. 105
IV.B.1.a. Echantillons journaliers de 120 ml. ....	p. 105
IV.B.1.b. Echantillons décennaires des observateurs du réseau PHICAB, échantillons des tournées hydrologiques et des campagnes "flash" .....	p. 106
IV.B.1.c. Granulométrie des sédiments .....	p. 106
IV.B.2. Au laboratoire de l'IQ-UMSA (Cotacota, La Paz) .....	p. 106
IV.B.3. Au laboratoire X-RAL (Toronto) .....	p. 106
IV.B.4. Au laboratoire de l'IGBA (Bordeaux) .....	p. 107
IV.B.5. Au laboratoire du CEMAGREF (Lyon) .....	p. 107
IV.C. La banque de données .....	p. 107
IV.D. Le calcul des flux .....	p. 107
IV.D.1. Détermination des teneurs globales .....	p. 107
IV.D.2. Mode de calcul des flux de matières .....	p. 108
V. LES MATIERES PARTICULAIRES .....	p. 109
V.A. La distribution régionale des matières en suspension .....	p. 111
V.B. La Granulométrie .....	p. 113
V.B.1. Sédiments du fond des cours d'eau .....	p. 113
V.B.2. Matières en suspension .....	p. 115
V.C. La minéralogie .....	p. 118
V.C.1. Minéralogie globale .....	p. 118
V.C.1.a. Dans les Andes .....	p. 118
V.C.1.b. Dans les Llanos .....	p. 119
V.C.2. Minéralogie des argiles .....	p. 122
V.C.2.a. Dans les Andes .....	p. 122
V.C.2.b. Dans les Llanos .....	p. 124
V.D. La géochimie .....	p. 127
V.D.1. Les éléments majeurs .....	p. 127
V.D.1.a. Dans les Andes .....	p. 127
V.D.1.b. Dans les Llanos .....	p. 129

V.D.2. Les éléments traces .....	p. 130
V.D.2.a. Dans les Andes .....	p. 130
V.D.2.b. Dans les Llanos .....	p. 132
V.E. Le carbone organique particulaire .....	p. 135
V.F. Le régime .....	p. 139
V.F.1. Les matières en suspension .....	p. 139
V.F.1.a. Dans les Andes .....	p. 139
V.F.1.b. Dans les Llanos .....	p. 145
V.F.2. Le transport de fond .....	p. 152
V.F.2.a. Dans les Andes .....	p. 152
V.F.2.b. Dans les Llanos .....	p. 153
V.G. Le bilan .....	p. 154
V.G.1. Le transport de fond et les matières en suspension .....	p. 154
V.G.1.a. Dans les Andes .....	p. 154
V.G.1.b. Dans les Llanos .....	p. 154
V.G.2. Le bilan global : érosion et sédimentation .....	p. 156
V.G.2.a. Dans les Andes .....	p. 156
V.G.2.b. Dans le bouclier brésilien .....	p. 160
V.G.2.c. Dans les Llanos .....	p. 161
V.G.3. Le bilan élémentaire .....	p. 163
VI. LES MATIERES DISSOUTES .....	p. 165
VI.A. L'hydrochimie .....	p. 166
VI.A.1. Les apports atmosphériques .....	p. 166
VI.A.2. Les éléments majeurs en solution .....	p. 167
VI.A.2.a. Dans l'ensemble du bassin .....	p. 167
VI.A.2.b. Dans les Andes .....	p. 176
VI.A.2.c. Dans les Llanos .....	p. 186
VI.A.2.d. Dans le bouclier brésilien .....	p. 188
VI.A.3. Les éléments traces en solution .....	p. 189
VI.A.3.a. Dans les Andes .....	p. 190
VI.A.3.b. Dans les Llanos .....	p. 190
VI.B. Le carbone organique dissous .....	p. 190
VI.C. Le régime .....	p. 194
VI.C.1. Le régime global des matières dissoutes .....	p. 194
VI.C.1.a. Dans les Andes .....	p. 194
VI.C.1.b. Dans les Llanos .....	p. 196
VI.C.2. Le régime des éléments majeurs .....	p. 206
VI.C.2.a. Le Rio Béni au piedmont des Andes .....	p. 206
VI.C.2.b. Le Rio Mamoré dans la plaine d'inondation .....	p. 208
VI.D. Le bilan .....	p. 210
VI.D.1. Le bilan global .....	p. 210
VI.D.1.a. Dans les Andes .....	p. 210
VI.D.1.b. Dans le bouclier brésilien .....	p. 211
VI.D.1.c. Dans les Llanos .....	p. 212
VI.D.2. Le bilan élémentaire .....	p. 213
VI.D.2.a. Le Rio Madeira à Villabella .....	p. 213
VI.D.2.b. Le carbone organique dissous .....	p. 214
VII. CONCLUSION .....	p. 217
Références bibliographiques .....	p. 223
Cartes utilisées .....	p. 247
Liste des figures .....	p. 249
Liste des tableaux .....	p. 255
Liste des photographies .....	p. 257
Table des matières .....	p. 259

ORSTOM Éditeur  
Dépôt légal : octobre 1993  
Impression  
ORSTOM BONDY

ORSTOM Éditions  
213, rue La Fayette  
F-75480 Paris Cedex 10  
Diffusion  
72, route d'Aulnay  
F-93143 Bondy Cedex  
ISSN : 0767-2888  
ISBN : 2-7099-1157-4

*Photo de couverture :*  
*Méandres du Rio Mamoré près de Trinidad (140 m).*  
*Meandros del Río Mamoré cerca de Trinidad.*  
*Mamoré river meanders near Trinidad.*

*Cliché : Annie et Jean Loup Guyot*