

ETUDE DE LA PHYSICO-CHIMIE ET DES SUSPENSIONS
DES COURS D'EAU DE L'AMAZONIE BOLIVIENNE :
L'EXEMPLE DU RIO BENI.

Jean louis GUYOT, Michel Alain ROCHE & Jacques BOURGES
Mission ORSTOM, C.P. 8714, La Paz, Bolivie.

Résumé :

Le réseau du programme hydrologique PHICAB, composé d'une quinzaine de stations hydrométriques situées en plaine amazonienne sur les bassins des Rios Béni et Mamoré, permet l'échantillonnage aux pas de temps journalier et décadaire de ces tributaires andins du haut bassin du Rio Madeira. A ces échantillons provenant du réseau, s'ajoutent des prélèvements de campagnes fléchées réalisées à différentes époques hydrologiques sur l'ensemble du bassin versant (744000 km²).

Dans le cas du Rio Béni, en plus des six stations du réseau, nous disposons de 140 points de prélèvement régulièrement échantillonnés par le PHICAB et le SENAMHI. La majorité de ces points de mesure est située dans la partie andine du bassin, à l'amont de Rurrenabaque (67000 km²).

Les résultats obtenus et ceux en cours d'acquisition permettent de caractériser les différents milieux aquatiques de l'Amazonie bolivienne, d'évaluer les transferts de matière en solution et en suspension des Andes vers l'Amazonie, et d'en caractériser les régimes.

1 - INTRODUCTION -

Le projet PHICAB (Programme hydrologique et climatologique de Bolivie) est le résultat d'une convention entre l'ORSTOM et le SENAMHI (Service national de météorologie et d'hydrologie de Bolivie), étendue ensuite à l'Institut d'Hydraulique et d'Hydrologie de l'UMSA (Université San Andres de La Paz).

L'objectif de ce programme de recherche est l'étude de la climatologie, de l'hydrologie et de la physico-chimie des eaux en Bolivie, avec comme priorité le bassin amazonien de ce pays andin.

Pour mener à bien cette étude, le PHICAB dispose d'un réseau de 15 stations hydrométriques situées dans la plaine amazonienne (llanos) et venant en complément des stations du SENAMHI localisées dans les Andes (Fig. 1).

2 - METHODOLOGIE -

* Données existantes *

Si aucune donnée n'existait en ce qui concerne la qualité hydrochimique des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne, le SENAMHI avait déjà réalisé avec l'aide économique du PNUD, un grand nombre de prélèvements pour l'étude des débits solides sur son réseau andin. Les échantillons avaient été prélevés à l'aide d'un saumon creux (intégrateurs USD 48 & 49) à chaque verticale (de 1 à 12 suivant la largeur des cours d'eau) lors des jaugeages. Ces données provenant d'une trentaine de stations, et correspondant à la période 1975-1983, n'avaient jamais été dépouillées. Toute cette information est actuellement en cours de traitement au PHICAB.

* Echantillonnage *

Depuis la mise en place du PHICAB, l'échantillonnage s'effectue de la manière suivante, sachant qu'il s'agit de prélèvements ponctuels de surface souvent réalisés en bordure du cours d'eau :

+ aux stations du réseau : les observateurs prélèvent un échantillon de 60 ml tous les jours et un de 500 ml tous les 10 jours. Un technicien ORSTOM visite le réseau tous les 2 mois, prélève un échantillon de 1000 ml à chaque station lors des jaugeages, ainsi qu'aux principaux affluents du Rio Mamoré. Il assure également la collecte et l'envoi des échantillons des observateurs.

+ les observateurs de quelques stations du réseau du SENAMHI dans les Andes et sur l'Altiplano, prélèvent régulièrement (de 1 à 2 fois par mois) des échantillons de

500 ml. Ces échantillons sont envoyés à La Paz par leurs soins.

+ en plus des stations des réseaux, il existe environ 300 points de prélèvements supplémentaires répartis sur l'ensemble du pays (Fig. 2) et qui sont échantillonnés de 1 à 4 fois par an suivant les facilités d'accès.

Afin de tester la représentativité des prélèvements ponctuels des observateurs, une série de mesures a été réalisée lors d'une cinquantaine de jaugeages sur 20 stations différentes. Ces données ont été complétées en Mars 1988 à Angosto del Bala lors de 20 jaugeages en hautes eaux.

Les distributions de la conductivité ou des matières en suspension sont relativement homogènes le long de la section de jaugeage (Fig. 3) comme le montre la bonne corrélation entre les valeurs moyennes de chaque verticale et ces mêmes valeurs pondérées par la vitesse, la profondeur et la largeur d'influence (Fig. 4).

La représentativité des prélèvements ponctuels réalisés par les observateurs semble bonne comme le montre la corrélation entre ces valeurs et les valeurs moyennes de chaque verticale obtenues lors des jaugeages (Fig. 5).

* Les analyses *

La chaîne d'analyses mise au point en 1986 par le PHICAB pour les échantillons de 500 et 1000 ml est la suivante (tabl. 1). En 1987, 780 échantillons ont été prélevés ce qui représente un total de près de 12000 mesures ou analyses.

Les échantillons journaliers de 60 ml provenant du réseau PHICAB sont traités au laboratoire du SENAMHI où ils font l'objet de mesures de la conductivité électrique et de la turbidité.

Par ailleurs, des échantillons d'eau brute et d'eau filtrée sont envoyés au CEMAGREF de Lyon pour dosage du carbone organique total, dissous et particulaire.

Les échantillons prélevés par les observateurs sont collectés tous les deux mois et acheminés à La Paz par voie aérienne. Cela pose des problèmes de conservation pour la détermination de certains éléments. Toutefois la relation entre la conductivité de terrain et la conductivité de laboratoire reste toujours très bonne (fig. 6). D'autre part, des dosages de l'alcalinité, considérée comme l'un des éléments les moins stables, ont été réalisés sur le terrain. La bonne tenue des résultats (Fig. 7) nous laisse croire que l'altération des échantillons reste faible.

Une série de 15 échantillons identiques, prélevés à 17 points caractéristiques du bassin représentant l'éventail des gammes de concentration rencontrées, a été analysée par la chaîne du PHICAB. Les résultats montrent des précisions d'analyse différentes suivant les éléments dosés et les gammes de concentration rencontrées. Globalement, la précision de la minéralisation totale peut être estimée à 10 % et la teneur en M.E.S. à 20 % .

* Banque de données *

Le PHICAB a développé un certain nombre de logiciels concernant la qualité des eaux :

+ DEPCHIM en Basic, permet le dépouillement des données provenant des deux laboratoires pour le calcul des teneurs des divers éléments.

+ DATCHIM en DBase 3Plus pour la gestion de la banque de données, le calcul de certains paramètres et l'impression de tableaux annuels et autres. DATCHIM gère 2 types de fichiers : les fichiers de résultats d'analyses physico-chimiques des stations ou des points de prélèvement (Fig. 8), et les fichiers de données journalières (Fig. 9).

En particulier, à partir des données journalières de conductivité et de turbidité, DATCHIM permet le calcul des minéralisations et des matières en suspension grâce aux corrélations $Min=f(\text{Conductivité})$ et $MES=f(\text{turbidité})$ réalisées à chaque station à partir des résultats des analyses physico-chimiques (Fig. 10).

+ les traitements statistiques et les tracés graphiques sont effectués à l'aide de STATGRAPHICS qui importe directement les fichiers de la banque de données (Fig. 11).

3 - L'EXEMPLE DU RIO BENI -

Le Rio Béni, avec le Rio Mamoré, forme le Rio Madeira, le plus grand des affluents méridionaux de l'Amazone. A sa confluence avec le Rio Mamoré, près de Cachuela Esperanza, le Rio Béni draine un bassin versant de 282000 km², dont 40 % sont situés dans la cordillère orientale des Andes boliviennes et péruviennes (Fig. 12). Les reliefs sont extrêmement contrastés, avec des points culminants approchant les 6500 mètres dans la Cordillère Royale (Illimani, Illampu,...) et une altitude de l'ordre de 120 mètres au confluent avec le Rio Mamoré. Le bassin versant se divise ainsi en une zone andine à fort gradient et une plaine amazonienne à très faible pente (Fig 13).

*** caractérisation hydrochimique des cours d'eau ***

Afin de caractériser d'un point de vue hydrochimique les quelques 117 cours d'eau du bassin versant faisant l'objet de prélèvements réguliers (Fig. 2), nous avons utilisé une méthode d'analyse factorielle, adaptée aux variables numériques continues : l'analyse en composantes principales (ACP) sur variables centrées réduites.

La distribution des points variables (Fig. 14a) sur les deux premières composantes qui représentent 65 % de la variance totale, montre que la composante 1, ou composante de 'taille' est en fait une échelle de minéralisation. Les matières en suspension (MES) sont bien corrélées aux minéralisations. La composante 2, peut être assimilée à une échelle de température, donc d'altitude, ou de pH. Aux eaux chaudes, acides, à forte teneur relative en silice et colorées, s'opposent des eaux plus froides à pH plus élevés.

La distribution des points objets (Fig. 14b) permet d'identifier chimiquement quelques grandes familles d'eaux, comme les rios Consata-Mapiri, La Paz-Boopi ou Orthon. Globalement, les cours d'eau andins sont situés au bas du graphique (pH plus élevés, température plus basse, absence de couleur, teneur en fer et en silice plus faible). Ces rios andins s'étalent bien sur l'échelle de minéralisation, en relation avec la nature géologique de leur bassin versant. Par contre les cours d'eau de plaine sont toujours faiblement minéralisés et faiblement chargés en MES.

Afin de faire apparaître des liaisons entre les échantillons du nuage, nous avons utilisé une méthode de classification dite 'ascendante hiérarchique', basée sur le calcul des distances entre les points objets de l'ACP. Certaines familles, difficilement discernables dans le nuage, ont été individualisées par cette méthode statistique (Fig. 15).

*** Exportation de matières ***

Le bilan des exportations de matières en solution et en suspension par le Rio Béni, pour la période 1983-1987, a été réalisé pour les stations du PHICAB (Tabl. 2 & Fig. 12).

Les régimes hydrologiques, des Andes vers la plaine, sont comparables et présentent une période de hautes eaux de décembre à avril, la variabilité du régime étant plus grande à la sortie des Andes (Fig. 16 & 17).

Les régimes de matières dissoutes suivent assez bien les régimes hydrologiques, mis à part une anomalie en février à Angosto del Bala, liée à des lacunes d'observation.

Les matières solides ont un régime différent. Bien que les maxima de MES correspondent aux maxima hydrologiques, mis à part l'anomalie de février à Agosto del Bala, les mois de janvier à mars fournissent l'essentiel du débit solide.

Le tableau 3 résume les caractéristiques de ces exportations au niveau annuel et pour la période 1983-1987.

Si les taux d'érosion chimique varient peu de l'amont vers l'aval et restent faibles, les taux d'érosion mécanique subissent une forte diminution, depuis la sortie des Andes jusqu'au confluent du Rio Mamoré, sous le double effet de la dilution par les affluents de la plaine et la sédimentation.

4 - CONCLUSION -

Le travail réalisé sur le Rio Béni est un exemple des études menées par le PHICAB depuis 1983, tant sur la caractérisation hydrochimique des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne que sur l'évaluation des flux de matières et de l'érosion de cette partie des Andes tropicales.

5 - BIBLIOGRAPHIE -

ABASTO N. - 1987 - "Balance hidrico superficial de la cuenca del Rio Madre de Dios." - Tesis de grado, UMSA, La Paz - Publ. PHICAB - 265 p.

ABASTO N., HOORELBECKE R. & ROCHE M.A. - 1985 - "Caracteristicas y calibracion de la red hidrometrica PHICAB en la cuenca Amazonica de Bolivia." - Publ. PHICAB - 120 p.

BOURGES J. - 1987 - "Projet de Cachuela Esperanza. Etude sommaire des apports." - Publ. PHICAB - 20 p.

BOURGES J. - 1988 - "Necesidad de una red hidrometrica para el desarrollo. Aplicacion al embalse de Cachuela Esperanza." - 2° Simposio de la investigacion francesa en Bolivia, La Paz, Avril 1988.

BOURGES J. & GUYOT J.L. - (à paraître) - "Etude hydrologique du Béni à Cachuela Esperanza et des apports de ses principaux tributaires. Bilan des matières en solution et en suspension." - Publ. PHICAB.

ESPINOZA O. - 1985 - "Balance hidrico superficial de la cuenca del Rio Beni." - Tesis de grado, UMSA, La Paz - Publ. PHICAB - 181 p.

GUYOT J.L. - 1986 - "Evolucion en el espacio y el tiempo de las concentraciones de materia en solution y en suspension de las aguas de la cuenca amazonica de Bolivia." - 1° Simposio

de la investigación francesa en Bolivia, La Paz, Septiembre 1986 - p. 48-53.

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 Química 7(1) - p. 36-50.

GUYOT J.L., CALLE H., CORTES J. & BARRAGAN M.C. - 1988 - "Aportaciones de sedimentos por el Rio Beni a los sitios potenciales de presas." - 2° Simposio de la investigación francesa en Bolivia, La Paz, Avril 1988.

GUYOT J.L., CORBIN D., QUINTANILLA J., CALLICONDE M. & CALLE H. - 1988 - "Caracterización físico-química de los rios y lagunas de la cuenca amazonica de Bolivia." - 2° Simposio de la investigación francesa en Bolivia, La Paz, Avril 1988.

GUYOT J.L., QUINTANILLA J. & CALLE H. - 1988 - "Estimación de la precisión de los análisis físico-químicos realizados por el PHICAB en Bolivia." - Publ. PHICAB.

GUYOT J.L., BOURGES J., CALLE H. & GALLARDO H. - 1988 - "Evolución de los caudales, de la hidroquímica y de los sedimentos en el Rio Beni a Rurrenabaque en época de crecida (Marzo 1988)." - Publ. PHICAB.

GUYOT J.L., HOORELBECKE R., CALLE H. & FUERTES O. - 1988 - "Representatividad del muestreo en la red PHICAB en la Amazonia boliviana." - Publ. PHICAB.

GUYOT J.L., BOURGES J., HOORELBECKE R., ROCHE M.A., CALLE H., CORTES J. & BARRAGAN M.C. - (à paraître) - "Exportation de matières en suspension des Andes vers l'Amazonie par le Rio Beni, Bolivie." - International Symposium on sediment Budgets, IAHS, Porto Alegre, Dec. 1988.

LEBAR D., MORINEAU A. & FENELON J.P. - 1982 - "Traitement des données statistiques." - Ed. Dunod - 510 p.

ROCHE M.A., FERNANDEZ C., APOTEKER A., ABASTO N., CALLE H., TOLEDE M., CORDIER J.P. & POINTILLARD C. - 1986 - "Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne." - Publ. PHICAB - 257 p.

ROCHE M.A. & FERNANDEZ C. - (à paraître) - "Water resources, salinity and salt exportations of the rivers of the bolivian Amazon." - Journal of hydrology.

ROCHE M.A., BOURGES J. & GUYOT J.L. - (à paraître) - "Climato-hydrology and hydrochemistry of the Bolivian Amazon." - IAHS Third scientific assembly, Baltimore, Mai 1989.

stations : 1 : Rio Grande & Abapo. 2 : Rio Ichilo & Puerto Villarroel. 3 : Rio Ichilo-Masoré & Muyurina. 4 : Rio Masoré & Puerto Barador ou Puerto Ganadero. 5 : Rio Ibaré & Puerto Alsacen. 6 : Rio Masoré & Nonsevidco. 7 : Rio Masoré & Puerto Siles ou Cooperativa. 8 : Rio Itenez & Caspasento Moré ou Vuelta Grande. 9 : Rio Masoré & Guayarsacin. 10 : Rio Alto-Béni & Angosto del Bala ou Kurrenabaque ou Bonaventura. 11 : Rio Béni & Portachuelo ou Dos Estrellas ou Palermo. 12 : Rio Madre de Dios & Miraflores. 13 : Rio Orthon & Caracoles. 14 : Rio Béni & Riberalta. 15 : Rio Béni & Cachuela Esperanza.

PHICAB

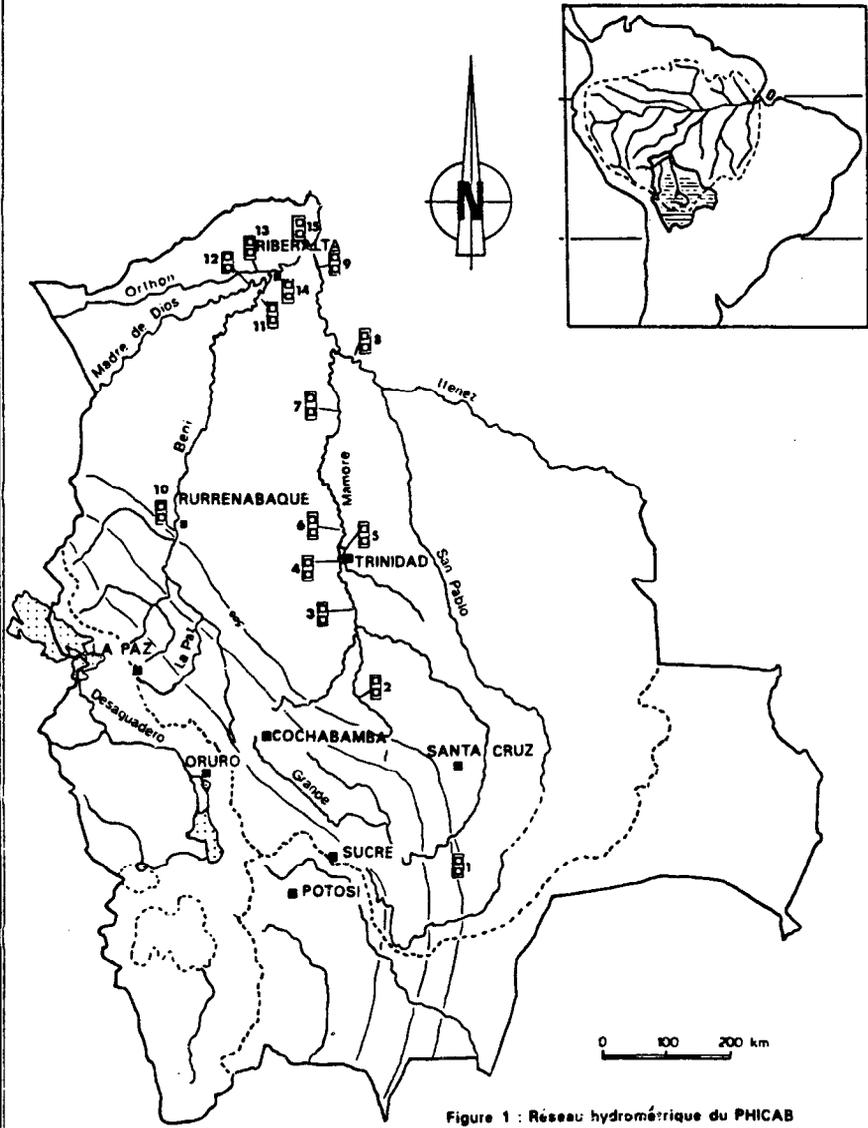
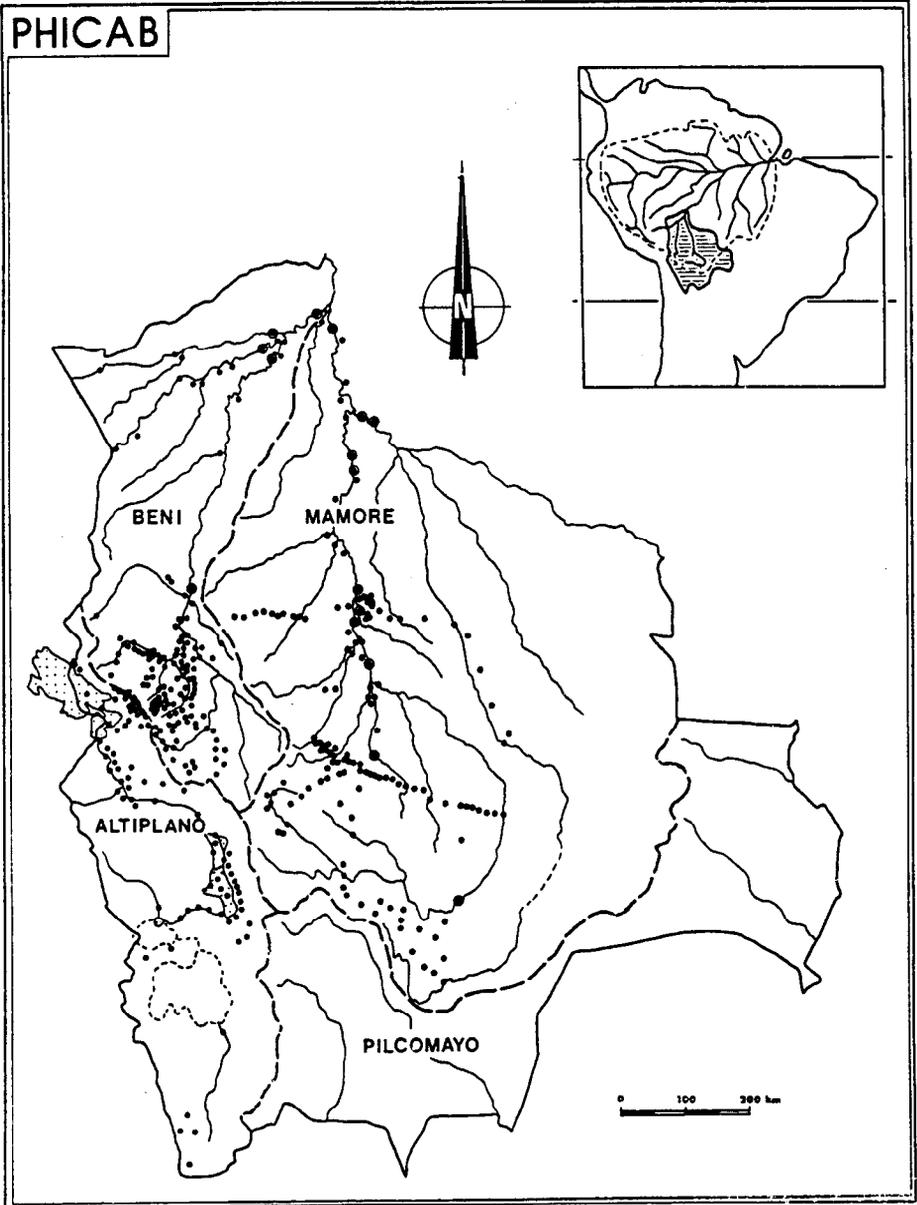


Figure 1 : Réseau hydrométrique du PHICAB

Figure 2 : Points de prélèvements du PHICAB

Bassin fermé de l'Altiplano	: 83 points, 150000 km ²
Bassin amazonien du Béni	: 139 points, 202000 km ²
Bassin amazonien du Mamoré	: 144 points, 542000 km ²



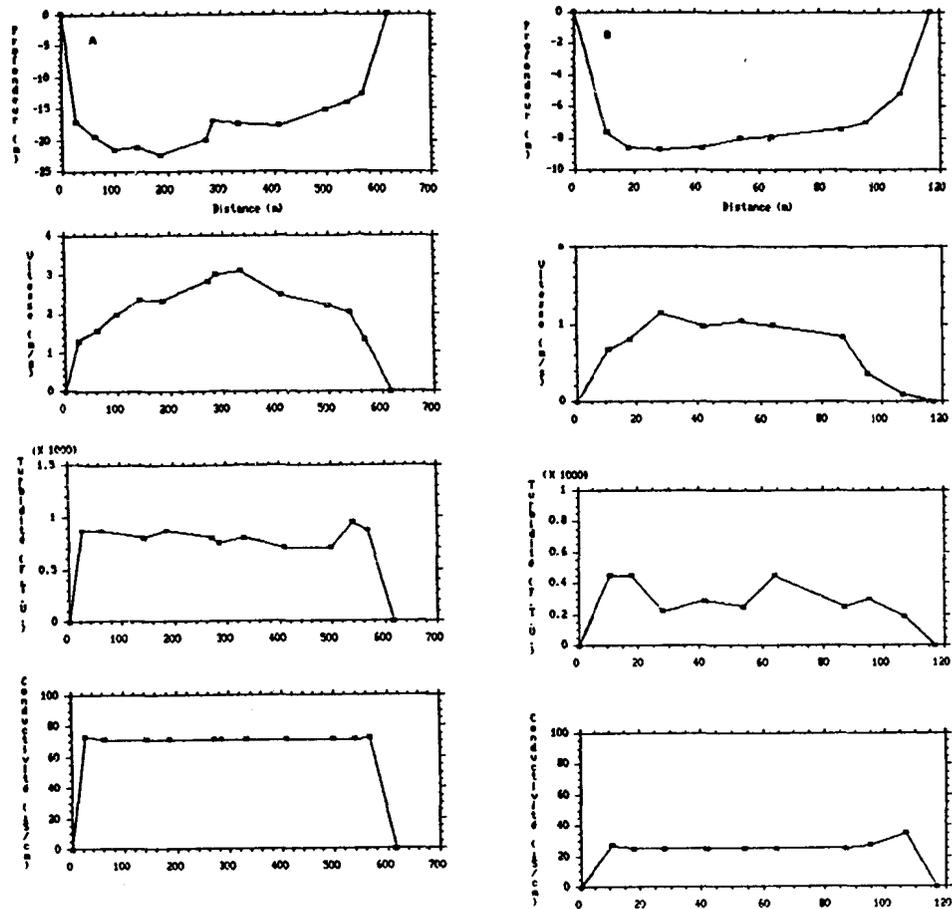


Figure 3 : Profil en travers, profils des vitesses, des turbidités et des conductivités en Janvier 1987 à

a : Rio Béni à Cachuela Esperanza
b : Rio Orthon à Caracoles

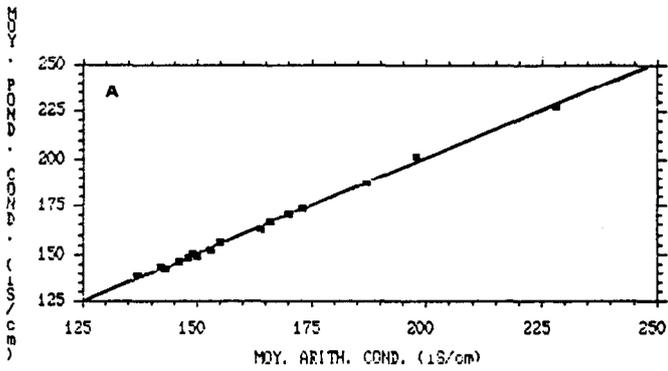


Figure 4 : Relation entre moyennes arithmétiques et moyennes pondérées des données de chaque verticale lors des jaugages à Angosto del Bala en Mars 1988.

a : Conductivité - $n = 17$ - $r = 0.999$
 b : M.E.S. - $n = 17$ - $r = 0.996$

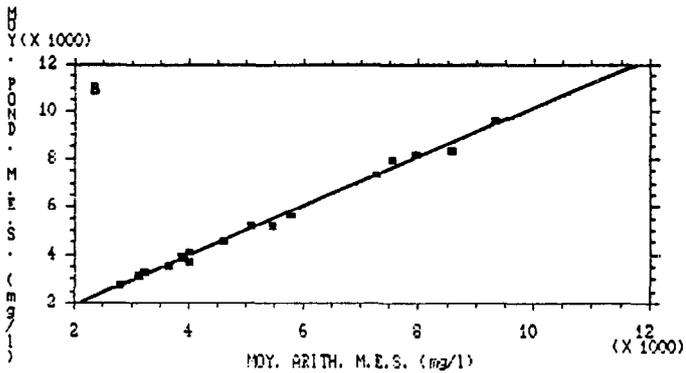
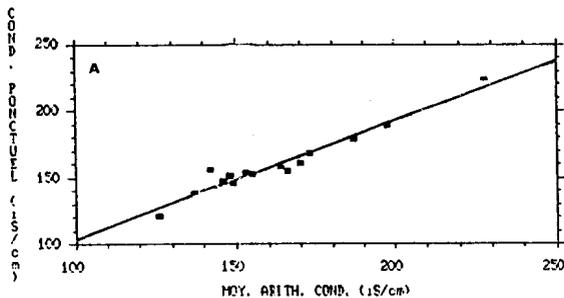
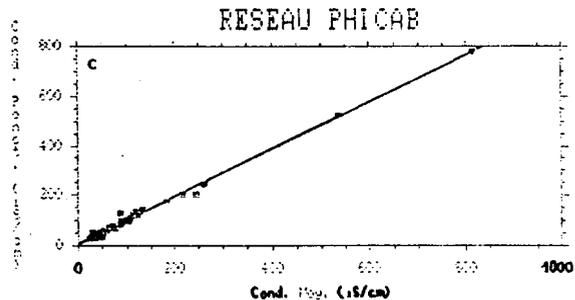
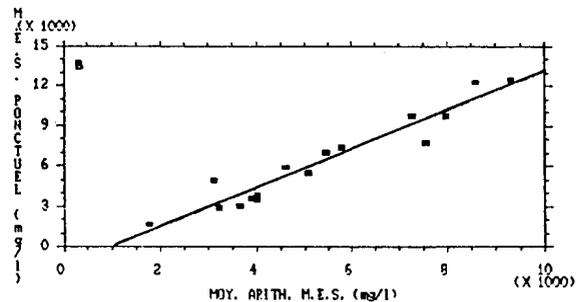


Figure 5 : Relation entre moyennes arithmétiques des données de chaque verticale et mesures ponctuelles de surface lors des jaugeages :



- à Angosto del Bala en Mars 1988 -

a : Conductivité - n = 15 - r = 0.974
 b : M.E.S. - n = 15 - r = 0.961



- sur l'ensemble du réseau en 1987 -

c : Conductivité - n = 38 - r = 0.997
 d : Turbidité - n = 34 - r = 0.874

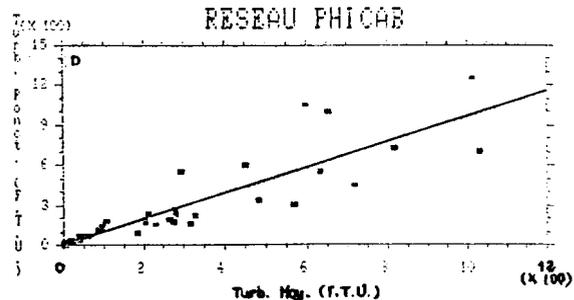


Tableau 1 : Chaîne d'analyses du PHICAB

=====

LABORATOIRE DU SENAMHI - EL ALTO - LA PAZ

Réception et codification de l'échantillon

Mesure de : pH (pHmètre)
 Conductivité (conductivimètre)
 Turbidité (colorimètre)

Filtration : Filtre en fibre de verre GFC

Mesure de : Couleur (colorimètre)
 M.E.S. (balance de précision)

Dosage de l'alcalinité (volumétrie)

Transfert au laboratoire de l'IIQ-UMSA

=====

LABORATOIRE DE L'I.I.Q. - U.M.S.A.

Dosage de : Chlorures (Colorimétrie)
 Sulfates (Colorimétrie)
 Silice (Colorimétrie)
 Calcium (Abs. Atomique)
 Magnésium (Abs. Atomique)
 Fer (Abs. Atomique)
 Sodium (Emission flamme)
 Potassium (Emission flamme)

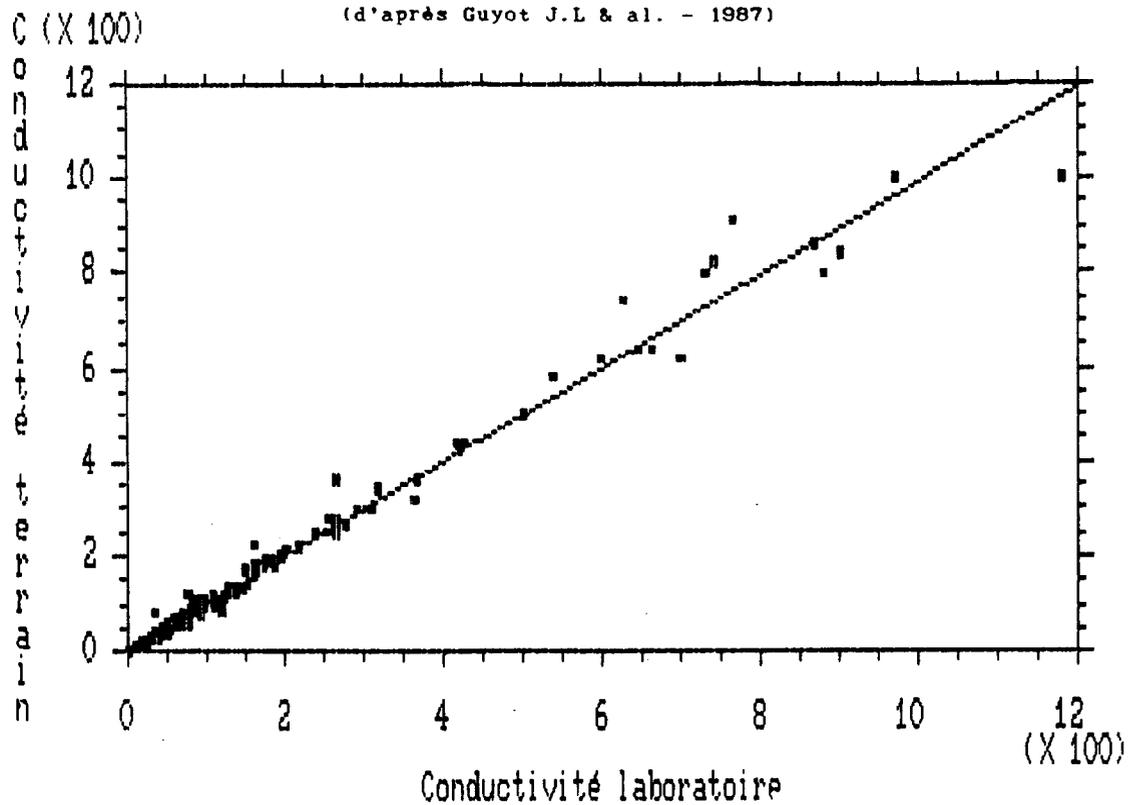
Retour au laboratoire du SENAMHI pour archivage

=====

- Fig. 6 -

Conductivité terrain = f(Conductivité labo)
n = 147 r = 0.991

(d'après Guyot J.L & al. - 1987)



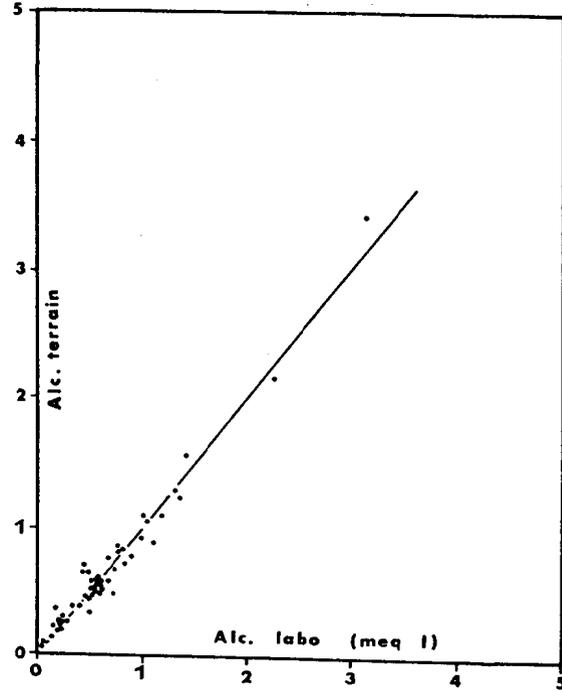


Figure 7 : Relation entre Alcalinité terrain et Alcalinité mesurée au laboratoire - $n = 51$ - $r = 0.983$
(d'après Roche M.A. & al, 1986)

Station : OFI MAMORÉ
Rio : YACUMA

Altitude de la station : m.
Altitude médiane du bassin versant : m.
Superficie du bassin versant : km²
Débit spécifique : l./s.
Distance du confluent Ben-Mamoré : km

N°	Date	Aut.	Haut m.	Débit m ³ /s	Temp °C	Conduct micS/cm	pH	Conclab micS/cm	pHlab	Turb FTU	Coli Pt/Co	M.E.S. mg/l	Deb.sol. t/j
1	07/05/82	MAR	-	-	-	-	-	33	-	-	-	-	-
2	31/05/84	RH	-	-	26.0	57	-	77	8.5	-	-	-	-
3	07/10/86	RH	-	-	30.0	120	-	76	7.5	80	165	85.5	-
4	02/12/86	RH	-	-	27.0	38	-	40	6.1	220	310	96.2	-
5	29/01/87	RH	-	-	-	-	-	46	6.2	120	240	655.3	-
6	06/03/87	RH	-	-	27.0	54	-	56	6.3	50	75	21.9	-
7	22/05/87	RH	-	-	-	-	-	32	6.6	39	150	20.9	-
8	31/07/87	RH	-	-	25.2	120	-	132	9.6	98	50	102.9	-
9	05/12/87	RH	-	-	-	-	-	61	7.0	158	235	422.4	-
	MINIMUM		-	-	25.2	38	-	32	6.1	39	50	20.9	-
	MAXIMUM		-	-	30.0	120	-	76	7.5	220	310	655.3	-
	MOYENNE		-	-	27.0	76	-	61	7.2	109	175	290.7	-

N°	NO3 mg/l	CO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	PO4 mg/l	NO2 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	SiO2 mg/l	Miner. mg/l	Deb.dis. t/j	B.I. °
1	19.5	-	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.1	2.3	1.7	1.1	0.0	-	(27.7)	(-)	(-7.8)
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	()	()	()
3	41.5	0.0	2.5	3.1	-	-	5.5	1.7	6.1	2.9	2.4	0.0	9.9	75.6	-	-1.5
4	13.4	0.0	1.4	6.7	-	-	-	3.5	5.6	2.7	2.5	0.0	7.5	(44.3)	(-)	(-29.2)
5	29.3	0.0	0.4	5.7	-	-	4.3	1.6	2.3	1.9	2.5	-	9.8	57.8	-	2.1
6	34.2	0.0	0.4	2.9	-	-	6.0	2.0	2.3	1.7	2.1	-	12.8	64.4	-	-3.9
7	20.7	0.0	0.1	0.0	-	-	2.2	0.9	1.7	1.6	0.6	-	18.8	46.6	-	5.2
8	65.9	0.0	-	7.7	-	-	9.0	3.4	8.2	1.9	0.7	-	5.8	(102.6)	(-)	(3.3)
9	30.5	0.0	0.2	3.2	-	-	4.6	1.6	4.1	3.0	1.8	-	3.1	52.1	-	-8.7
MINIMUM	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.9	1.7	1.6	0.6	0.0	3.1	0.0		
MAXIMUM	65.9	0.0	2.5	7.7	0.0	0.0	9.0	3.5	8.2	3.0	3.5	0.0	18.8	102.6		
MOYENNE	31.9	0.0	0.7	3.7	0.0	0.0	4.8	2.0	4.1	2.2	1.8	0.0	9.7	52.3		

- Fig. 8 -

Exemple de tableau de résultats d'analyses
physico-chimiques édité par DATCHIM.

Station : MIRAFLORES
 Rio : MADRE DE DIOS

Variable : DEBIT SOLIDE ENTIER PAR LA TURBIDITE (L/S)
 Année : 1987

Jour	Janv	Fevr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juili	Août	Sept	Octo	Nove	Deco
1	391166				74196		14201	27151	10198	20616	51904	
2	330438	311503	315339	248286	171420	30695		113149	10702	19164	51412	259304
3	337258	167553	297200	224865	171943	29758		103231	10500	9442	58279	257481
4	149185	247020	164927	240397	207940	20876		96019	10420	11750	61378	297782
5	124920	136320	257156	199592	207207	39105		25054	10120	9779	66945	329804
6	256867	218091	177998	279942	262849	31062		18249	10420	9653	67984	332248
7	292346	144796	195754	208213	191960	30996		15143	10340	9731	72923	
8	286404	225243	245619	127660	81751	42246		14808	10042	10863	74204	279477
9	351618	221613	345170	103049	85425	29852		21726	10260	11205	42506	327755
10	319984	153375	250965	125932		42045	12825	17156	10179	23562	63669	293359
11	118579				81999		12649	27062	9518	19705	110362	
12	278774	527427		104999	70843	39054	12696	22520	9176	24160	126944	
13	214529		410672	112144	71028	34557	11352	20789	9497	19164	148471	316844
14	377635	201828	382655	116995	110265	34268	11518	18645	20141	22707	127725	263947
15	152407	149070	212241	98025	103761	27025	11302	16651	23279	23479	126556	227603
16	147504	258980	191797	131496	163868	25171	10727	14264	28520	22525	119967	220671
17	147725	385383	171461	155983		25335	12517	12499	29983	10130	90242	209807
18	124425	168657	168726		73744	20620	19186	12744	19943	10099	120861	224597
19	161758	147597	137432	159454	103209	24720	19733	11141	26937	13344	108119	181650
20	212067	158915	125906	151622	145985	24912	16940	10665	26105	16338	110272	225860
21	292996				115124		16281	10665	11677	62149	124376	166435
22	273161	167283		207815	119198	21451	15095	11402	11622	52411	109590	172209
23	239531	136464	213071		104622	21349	22913	10821	10508	71998	91400	170346
24	173522	126810	228018	214419		20472	28122	10741	11355	101889	76545	236115
25		120773	272242	142826	96441	21047	23168	10660	10509	168089	110259	224522
26		122453	122517	219048	104626	16714	29920	9996	9820	162694	107482	194090
27		120428	202286	136666		15460	20744	10340	21282	176996	80278	242864
28		149052	189286	155390	94278		16595	9964	19982	159492		206071
29			204914	162647	62280		15085	10260	20618	162645		208285
30			192829	49602			17084	9669	19982	110143		198624
31			204997		46223		21659	9886		106523		182270
MOYENNE	240288	198651	227391	149229	114953	28412	17227	22644	15088	52398	92536	240802
MINIMUM	118579	120428	125906	98025	46223	15460	10727	9669	9176	9442	42506	166435
MAXIMUM	391166	527427	410672	279942	262849	42246	33168	113149	29983	176896	148471	332248

- Fir. 9 -

Exemple de tableau annuel édité par DATCHIM.

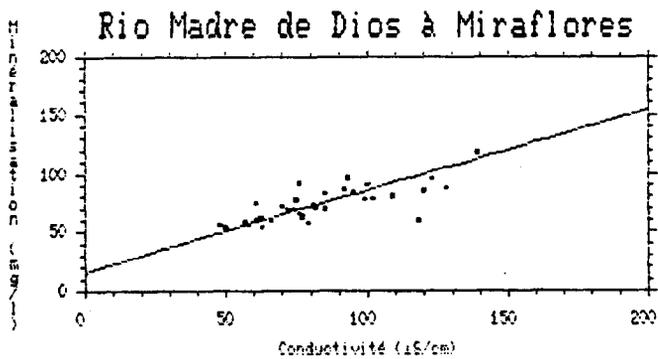


Figure 40a : Relation Minéralisation = $f(\text{Conductivité})$
à Miraflores - $n = 37$ - $r = 0.916$

Figure 40b : Relation M.E.S. = $f(\text{Turbidité})$
à Angosto del Bala - $n = 273$ - $r = 0.937$

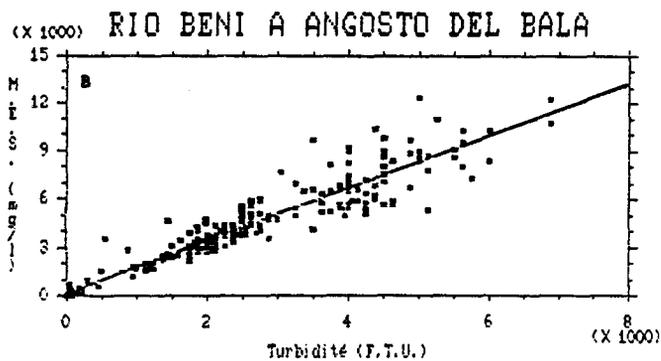
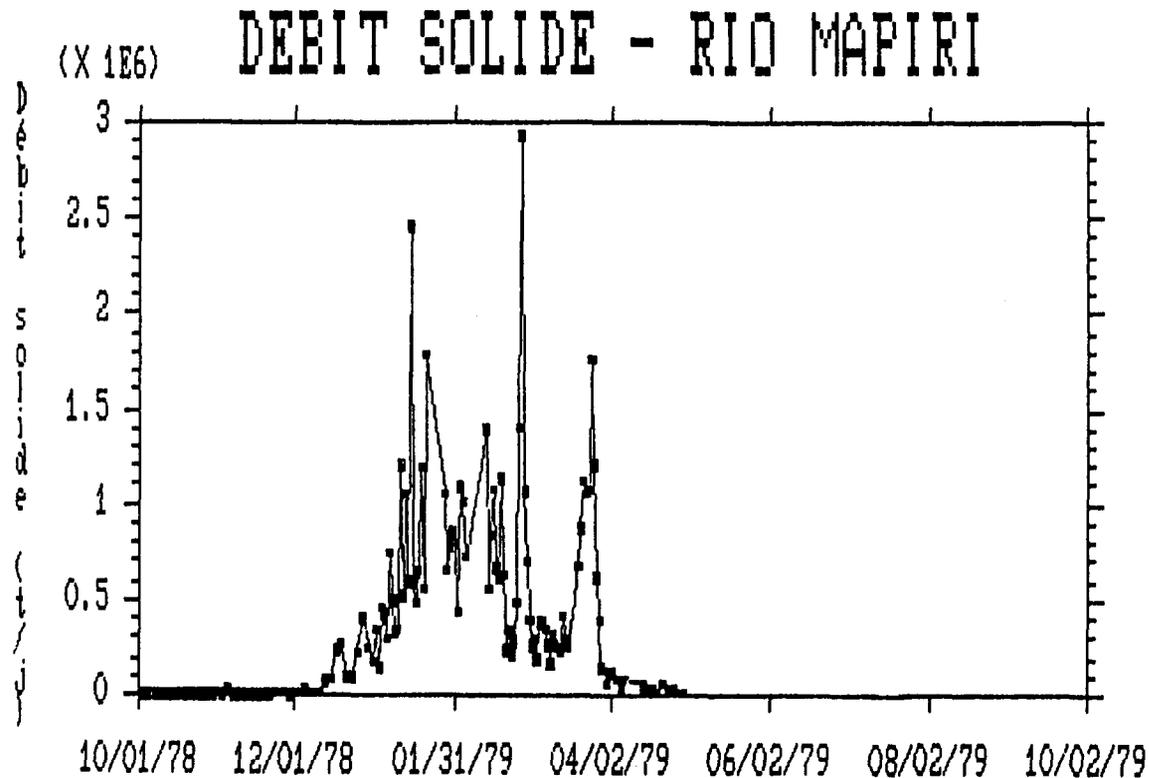


Figure 11 : Exemple de tracé graphique réalisé par
STATGRAPHICS à partir de la base de données de
DATCHIM.



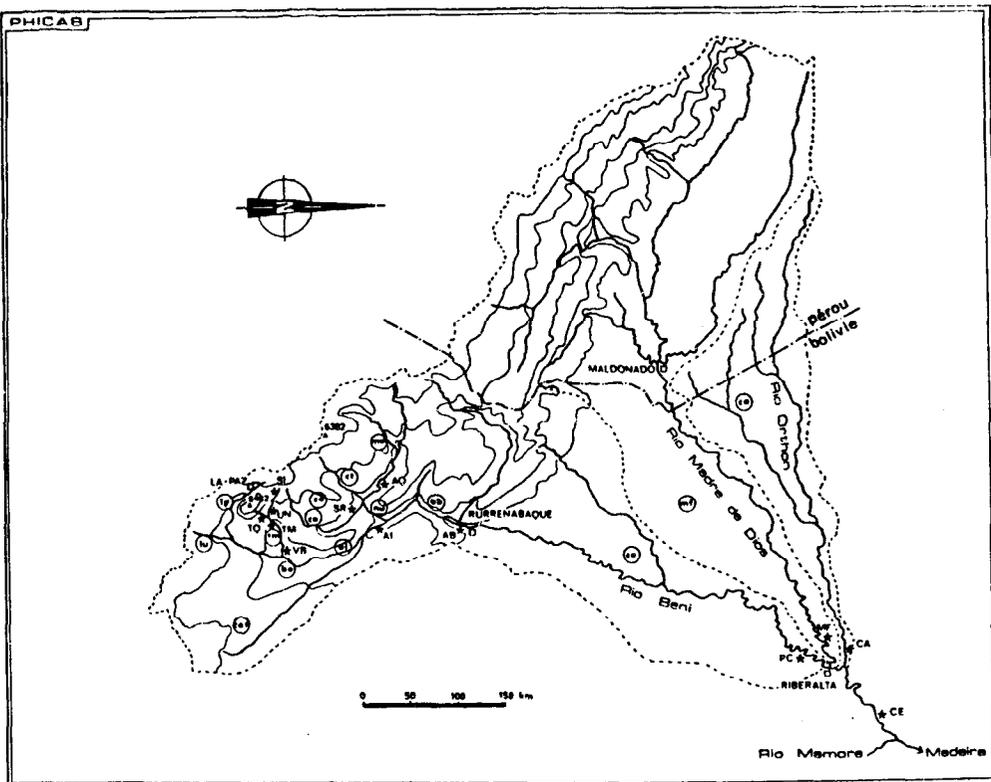


Figure 12 : Bassin versant du Rio Beni à Cachueta Esperanza.

stations : SI : Rio Unduavi à Sirupaya, UN : Rio Unduavi à Puente Villa, TO : Rio Taquesi à Puente Villa, TH : Rio Tamapaya à Puente Villa, VB : Rio Tamapaya à Villa Barrientos, SR : Rio Coroico à Santa Rita, AQ : Rio Mapiari à Angosto Quercano, AI : Rio Alto-Beni à Angosto Inicua, AB : Rio Alto-Beni à Angosto del Bala, PC : Rio Beni à Portachuelo, MF : Rio Madre de Dios à Miraflores, CA : Rio Orthon à Caracoles, CE : Rio Beni à Cachueta Esperanza.

bassins (cf tabl. 4) : lp : Rio La Paz, lu : Rios Luribay & Sapaqui, tm : Rio Tamapaya, bo : Rio Boopi, at : Rio Alto-Beni à Angosto Inicua, cot : Rio Cotacajes, co : Rio Coroico, zo : Rio Zongo, ct : Rios Challana & Tipuani, sa : Rios Conzata & Mapiari, nu : Rio Neta à Nube, ab : Rio Alto-Beni à Angosto del Bala, ce : Rio Beni à Cachueta Esperanza, mf : Rio Madre de Dios à Miraflores, ca : Rio Orthon à Caracoles.

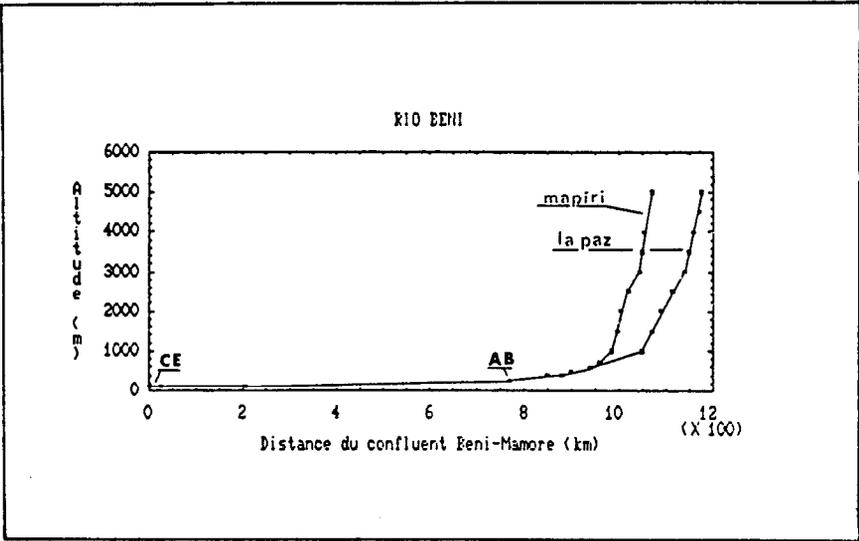
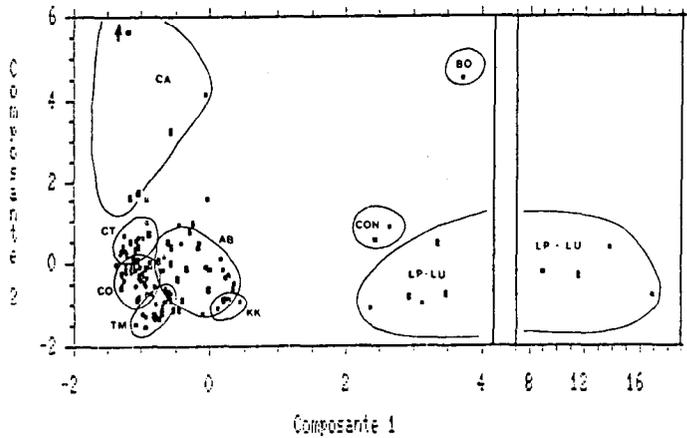
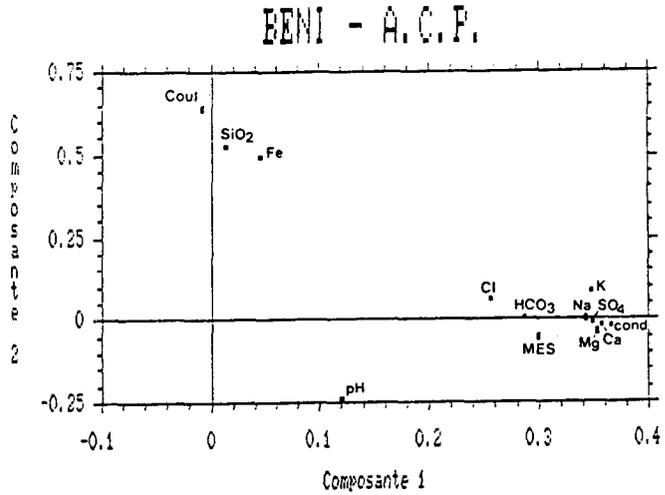


Figure 13 : Profil en long du Rio Beni.

AB : Angosto del Bala
 CE : Cachuela Esperanza

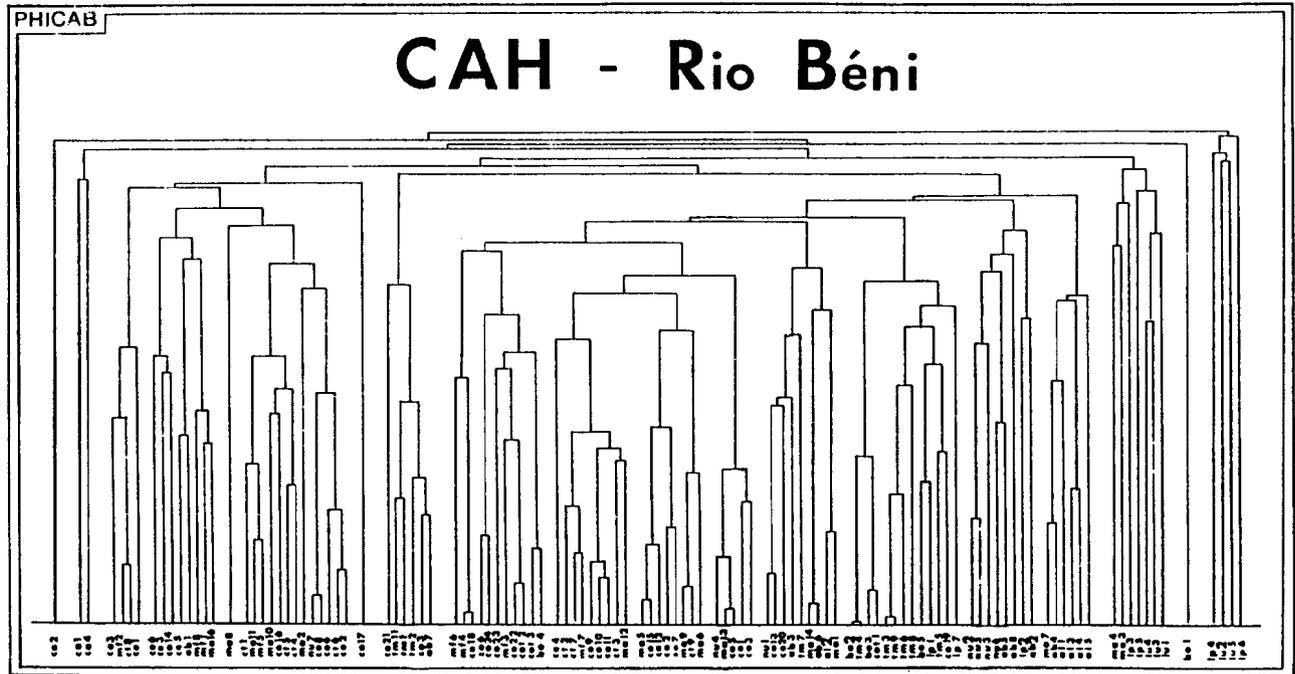
Figure 14 : Analyse en composantes principales des 117 rios du bassin du Bénoué.

14a : distribution des points variables



14b : distribution des points objets (voir tableau 4 pour les codes de rios)

Figure 15 : Classification ascendante hiérarchique des données de l'A.C.P. concernant les 117 rios du bassin du Bénin.
(voir tableau 4 pour les codes des rios)



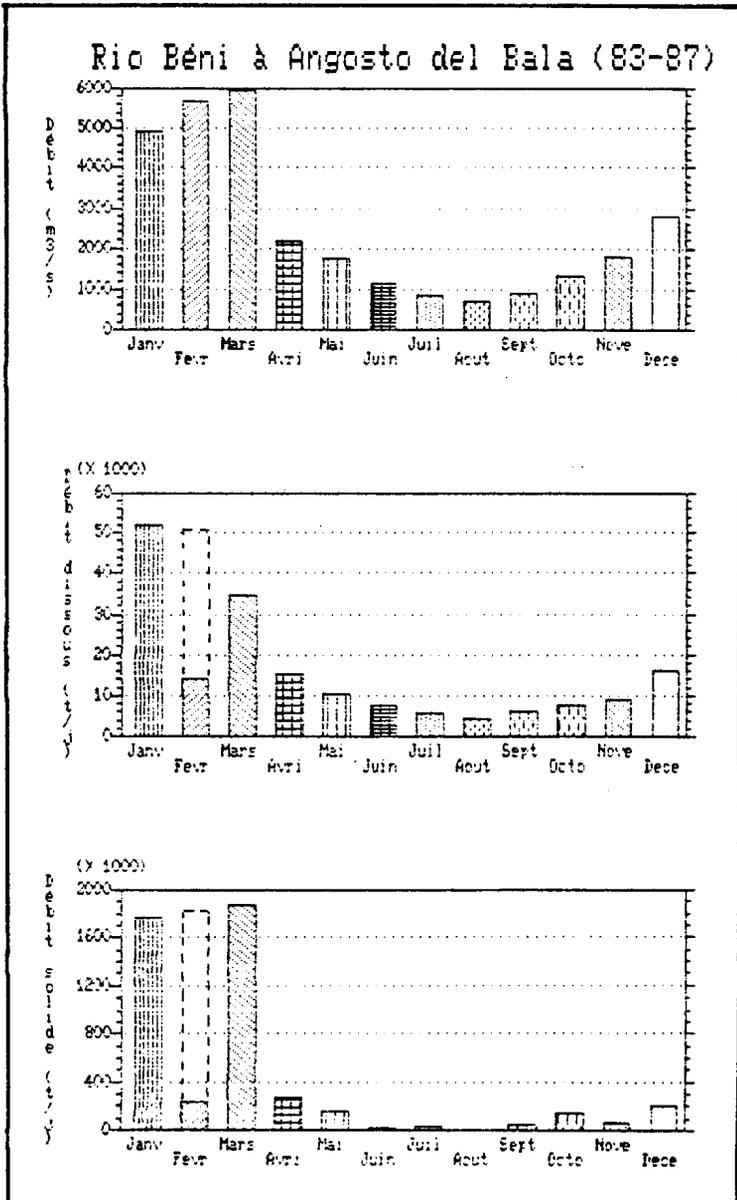


Figure 16 : Régime hydrologique, débit dissous et débit solide du Rio Béni à Angosto del Bala.

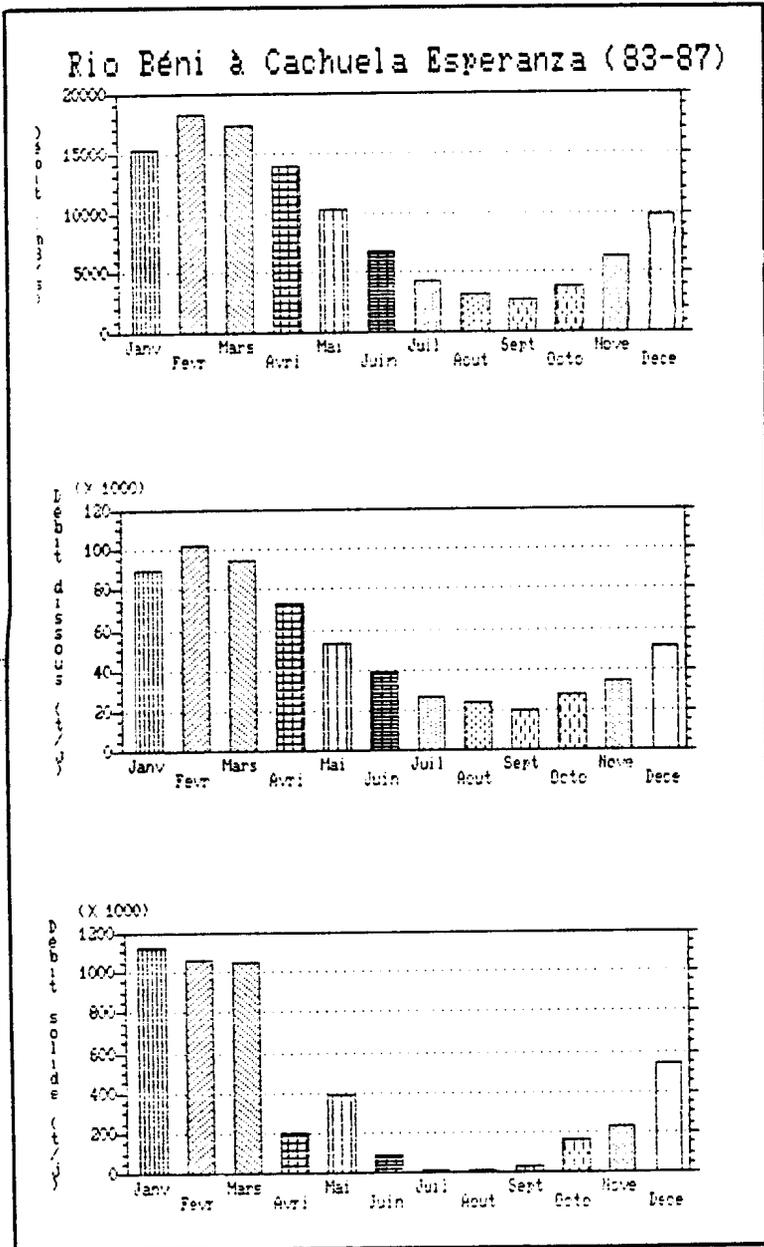


Figure 17 : Régime hydrologique, débit dissous et débit solide du Rio Béni à Cachuela Esperanza.

Tableau 2 : Stations du PHICAR (83-87)

Code	Station	Rio	Altitude (m)	Superficie (km ²)	Module (m ³ /s)
AB	Angosto del Bala	Alto-Béni	284	67200	2500
PC	Portachuelo	Béni	140	119000	2800
MF	Miraflores	Madre de Dios	140	124000	5410
CA	Caracoles	Orthon	130	32300	477
CE	Cachuela Esperanza	Béni	124	282000	9310

- Tableau 3 -

Code	Min. (mg/l)	Déb. dis. (10 ⁶ t/an)	Eros. chim. (t/km ² .an)	MES (mg/l)	Déb. sol. (10 ⁶ t/an)	Eros. mec. (t/km ² .an)	Eros. totale (t/km ² .an)
AB	78	5.6	83	1090	147	2180	2263
PC	88	7.6	64	886	123	1040	1104
MF	63	9.3	75	312	61	489	564
CA	48	0.63	19	132	1.8	55	74
CE	67	19.3	68	363	149	527	595

Tableau 4 : Index géographique des 117 rios du bassin du Béni.

Code	Rio	Station
A101	Alto-Béni	Puerto Linares ou Sapecho
A102	Piquendo	Villa Camacho
A103	Inicua	Puente Inicua
A104	Inicua	Cfl. Alto-Béni
A105	Alto-Béni	Angosto Inicua
B001	La Paz/Boopi	La Plazuela
B002	Miguillas	Miguillas
B003	Canamina	Canamina
B004	Chekha	Chekha
B005	???	Chekha
COT01	Khatu	Inquisivi
COT02	Khatu	Quime
COT03	Khatu	Haynacota
LPO1	Kaluyo	Achachicala
LPO2	Achachicala	La Paz (Amont)
LPO3	La Paz	Puente Lipari
LPO4	La Paz	Millocato
LPO5	Palca	Cfl. La Paz
LPO6	Kossini	Huaricana
LPO7	Chacaltaya	Achachicala
LU01	Luribay	Luribay
LU02	Sapahaqui	Sapahaqui
LU03	Porvenir	Cfl. Chinchá
LU04	Chinchá	Cfl. Porvenir
LU05	Caracato	Caracato
TH01	Unduavi	Cumbre
TH02	Unduavi	Chuspipata ou Unduavi
TH03	Unduavi	Sirupaya
TH04	Unduavi	Puente Villa
TH05	Taquesi	Puente Villa
TH06	Tamampaya	Puente Villa
TH07	Péris	Arapata
TH08	Solecama	Chulumani
TH09	???	Chulumani
TM11	Aceromarca	Cfl. Unduavi
ABO1	Quendeque	Cfl. Alto-Béni
ABO2	Chepite	Cfl. Alto-Béni
ABO3	Suapi	Cfl. Alto-Béni
ABO4	Quiquibey	Cfl. Alto-Béni
ABO5	Quiquibey	Piste
ABO6	Tuichi	Cfl. Alto-Béni
ABO7	Pelechuco	Pelechuco
ABO8	Alto-Béni	Angosto del Bala ou Rurren.
CAO1	Tahuamanu	Porvenir
CAO2	Tahuamanu	Puerto Rico
CAO3	Manuripi	Puerto Rico
CAO4	Orthon	Caracoles
CEO1	Madidi	Cfl. Béni

CE02	Biata	Cfl. Béni
CE03	Béni	Portachuelo
CE04	Ivon	Cfl. Béni
CE05	Béni	Riberalta
CE06	Béni	Cachuela Esperanza
MF01	Madre de Dios	Puerto Chive
MF02	Toromona	Cfl. Madre de Dios
MF03	Madre de Dios	San José
MF04	Caido	Cfl. Madre de Dios
MF05	Manupari	Cfl. Madre de Dios
MF06	Canada	Cfl. Madre de Dios
MF07	Genechiquia	Cfl. Madre de Dios
MF08	Madre de Dios	Miraflores
CO01	San José	Chicaloma
CO02	Cedro	Yolosa
CO03	San Juan	Yolosa
CO05	Coroico	Cfl. Santa Barbara
CO06	Santa Barbara	Cfl. Coroico
CO08	Challa	Challa
CO09	Choro	Altochoro
CO10	San Pedrito	Cfl. Coroico
CO11	Quitacalzon	Puerto Leon
CO12	Chojna	Puente
CO13	Yara	Caranavi
CO14	Carrasco	Carrasco
CO15	Coroico	Alcoche ou Santa Rita
CO16	Coroico	Cfl. Mapiri
CO17	Tajlihui	Puente
CO18	Bronciano	Santa Fé de Caranavi
CO19	???	Villa Flor
CO20	San Silverio	???
CO21	Yorisa	Cfl. Coroico
CO22	Elena	Vado
CO23	Chairo	Cfl. Huarinilla
CO24	Huarinilla	Cfl. Chairo
CT01	Challana	Cfl. Sapukani
CT02	Sapukani	Cfl. Challana
CT03	Challana	Cfl. Mapiri
CT04	Tipuani	Cfl. Tora
CT05	Tora	Cfl. Tipuani
CT06	Tipuani	???
CT07	Bartolo	Cfl. Tipuani
CT08	Tipuani	Tipuani
CT09	Tipuani	Guanay
MA01	San Cristobal	Sorata
MA02	Gunduraya	Cfl. Consata
MA03	Consata	Consata
MA04	Consata	Cfl. Camata
MA05	Camata	Cfl. Consata
MA06	Tarapo	Cfl. Consata
MA07	Mapiri	Mapiri
MA08	Korijahuirá	Piste
MA09	Merkhe	Piste
MA10	Chimate	Chimate
MA11	Dinamarca	Piste

MA12	Mariapo	Piste
MA13	Charoplaya	Piste
MA14	Mapiri	Guanay
MA16	Mapiri	Cfl. Coroico
NU01	Kaka	Teoponte
NU02	Uyapi	Cfl. Kaka
NU03	Tomachi	Cfl. Kaka
NU04	Kaka	Nube
NU05	Catea	Cfl. Kaka
NU06	Quencala	Cfl. Kaka
NU07	Kaka	Cfl. Alto-Béni
Z003	Zongo	Aval barrage
Z006	Zongo	Islani
Z007	Zongo	Cfl. Coroico

DISCUSSION

J. COLOMBANI pose plusieurs questions techniques sur le choix des préleveurs d'une capacité limitée, de l'ordre de 0,5 litre.

J.L. GUYOT rappelle que la collecte des échantillons se fait par voie aérienne ce qui leur impose une petite taille. L'expérience montre que, sur une section, quel que soit le point de prélèvement, la conductivité électrique de l'eau est assez homogène de même que la turbidité, si toutefois elle est essentiellement constituée d'éléments fins. J.L. GUYOT rappelle que les exemples qu'il a présentés lors de son exposé oral sont tirés de petits bassins versants et les troubles qui transitent sont d'abord des argiles.

Enfin J. COLOMBANI s'interroge sur la relation entre la composition relative des sels dissous dans l'eau et leur conductivité.

Aujourd'hui, J.L. GUYOT n'a pas travaillé dans cette direction car le réseau est très jeune. C'est essentiellement un travail de collecte, de gestion et de banque de données qui a été mené jusqu'à maintenant.

J.O. JOB considère que l'étude de la composition relative des sols dissous en fonction de la conductivité électrique est intéressante si les ions bivalents varient très vite. Ceci se vérifie dans la zone aride. C'est une méthode à mettre en oeuvre quand il y a un apport d'ions calcium notamment. De plus, la faiblesse des apports des rivières boliviennes en ions dissous est un autre handicap que souligne J.L. GUYOT.

M. ROCHE s'interroge sur la part de la restitution des nappes et sur celle de la vidange qui correspond au déstockage des vastes plaines d'inondation. Peut-être, est-il possible d'appréhender qualitativement et quantitativement ces phénomènes grâce à des mesures de concentration des ions dissous, échelonnées en différents points ?

J.L. GUYOT confirme l'intérêt de ce type de mesures mais rappelle que ces vastes zones d'inondation, qui couvrent plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés le long du Mamoré central, sont d'abord de formidables pièges à sédiments. On évalue sur le Beni le piégeage par la forêt à 40 % de la charge solide. Par contre, la composition chimique des eaux est moins affectée. Le problème des eaux souterraines est aujourd'hui complètement occulté. Pas de sondage, pas de données. Pour J.L. GUYOT, il semble que, dans cette zone sédimentaire, il n'y ait pas de nappe importante.

D'un strict point de vue technique, G. JACCON rappelle que la différence de milieux traités - les Andes et l'Amazone - permet de conjuguer les nécessités et les exigences de la technique du prélèvement des troubles :

la rapidité nécessaire, dans la montagne, pour suivre les pics très aigus de concentration ;

la finesse de l'analyse indispensable, en plaine, afin de suivre les variations fines des concentrations sur une même verticale et sur plusieurs verticales de très vastes sections.

G. PEDRO qui demande comment s'articulent le programme et ses objectifs, J.L. GUYOT rappelle que, PHICAB, c'est d'abord une amélioration de la connaissance d'un milieu peu connu. Ensuite, c'est une évaluation de l'apport de l'érosion andine aux fleuves. Pour les partenaires boliviens de PHICAB, c'est aussi l'occasion d'étudier, avant la mise en chantier éventuelle de deux barrages sur le Rio Beni, la sédimentation du point de vue hydraulique et une opportunité de travailler sur des voies navigables qui pourraient être mieux valorisées.

A. ROCHE complète ce tableau en le plaçant dans un vaste thème de recherche : celui des eaux noires des plaines d'inondation du monde tropical. Ce thème doit impérativement être étudié en relation avec des pédologues et des biologistes notamment des spécialistes de chimie organique. Ces eaux noires sont un type d'eaux peu minéralisées, au pH acide, relativement riches en potassium, silice et en fer. Pour fixer les idées sur leur importance, seulement en Bolivie amazonienne, chaque année, ce sont 150 000 km² qui sont inondés. Cette surface pourrait avoir un fort potentiel de développement notamment pour l'élevage.

J.L. GUYOT signale que deux partenaires ont localement contacté le programme PHICAB afin d'étudier la part de l'homme dans les apports de la région andine.

D'abord la Mairie de La Paz, confrontée à des problèmes d'érosion dans son Plan d'Occupation des Sols (POS), a décidé d'équiper un bassin représentatif. D'une surface d'environ 15 km², il sera implanté en amont des zones urbaines sur des séries géologiques plio-quaternaires très facilement érodables.

Ensuite, l'USAID, la coopération des Etats-Unis, étudie plus précisément l'influence de l'homme sur une région du haut-Mamoré équivalente à celle étudiée par PHICAB sur le haut-Beni. Il s'agit de la région du Chaparé productrice de coca. Pour développer d'autres cultures, les américains vont d'abord désenclaver la région par l'ouverture d'une route qui recoupera la plupart des cours d'eau de la région. En Amérique Latine, la soif de terres est telle que, généralement, l'ouverture d'une route correspond à une colonisation spontanée très rapide de ses abords. L'USAID voudrait étudier les transferts de matières avant, pendant et après la colonisation.

A une question de P. SEYLER sur les techniques d'échantillonnage, J.L. GUYOT répond en précisant que l'ensemble des échantillons a été filtré et que c'est à partir du filtrat que les analyses sur les ions majeurs ont été faites.

J.L. GUYOT signale aussi que, grâce à une collaboration avec le CEMAGREF de Lyon, des analyses sur le carbone organique total, dissous et particulaire sont faites. Les équipes du PHICAB ont prospecté les rivières de l'Altiplano andin, en premier lieu, pour des raisons de facilité d'accès et de proximité de La Paz. Il est prévu, maintenant, une intensification des campagnes - qui de deux passeront à quatre par an - en Amazonie bolivienne. Grâce à cette collaboration, les équipes de PHICAB pourront essayer de corréler, par exemple, le fer à la matière organique.

Au sujet de la présence du carbone organique total, il faut souligner le caractère sans doute exceptionnel que présentera l'année 1988 à cause d'un incendie gigantesque. A la suite d'une situation atmosphérique de type anti-El Niño, une sécheresse très forte s'est développée en Amazonie brésilienne, péruvienne et bolivienne.

Aujourd'hui, les brûlis traditionnels faits avant les pâturages en Bolivie ont abouti à un incendie non contrôlé de toute la forêt. C'est le premier de ce type en Bolivie amazonienne. Une superficie équivalente à six états européens (plus de un million de km² ?) était en feu en août 1988. A La Paz, à plus de 4 000 m d'altitude, la vue des volcans était impossible. On évalue à 1 000 m l'épaisseur du nuage de fumée sur toute la Bolivie.

M.A. ROCHE conclut la discussion en rappelant les différentes publications du PHICAB :

- une collection interne alimentée régulièrement par les collaborateurs et les membres ;
- des cartes au 1/4 000 000 en offset couleur sur la physico-chimie des eaux ;
- deux articles publiés ou acceptés dans des revues scientifiques internationales : Journal of Hydrology et Journal des Sciences Hydrologiques.