

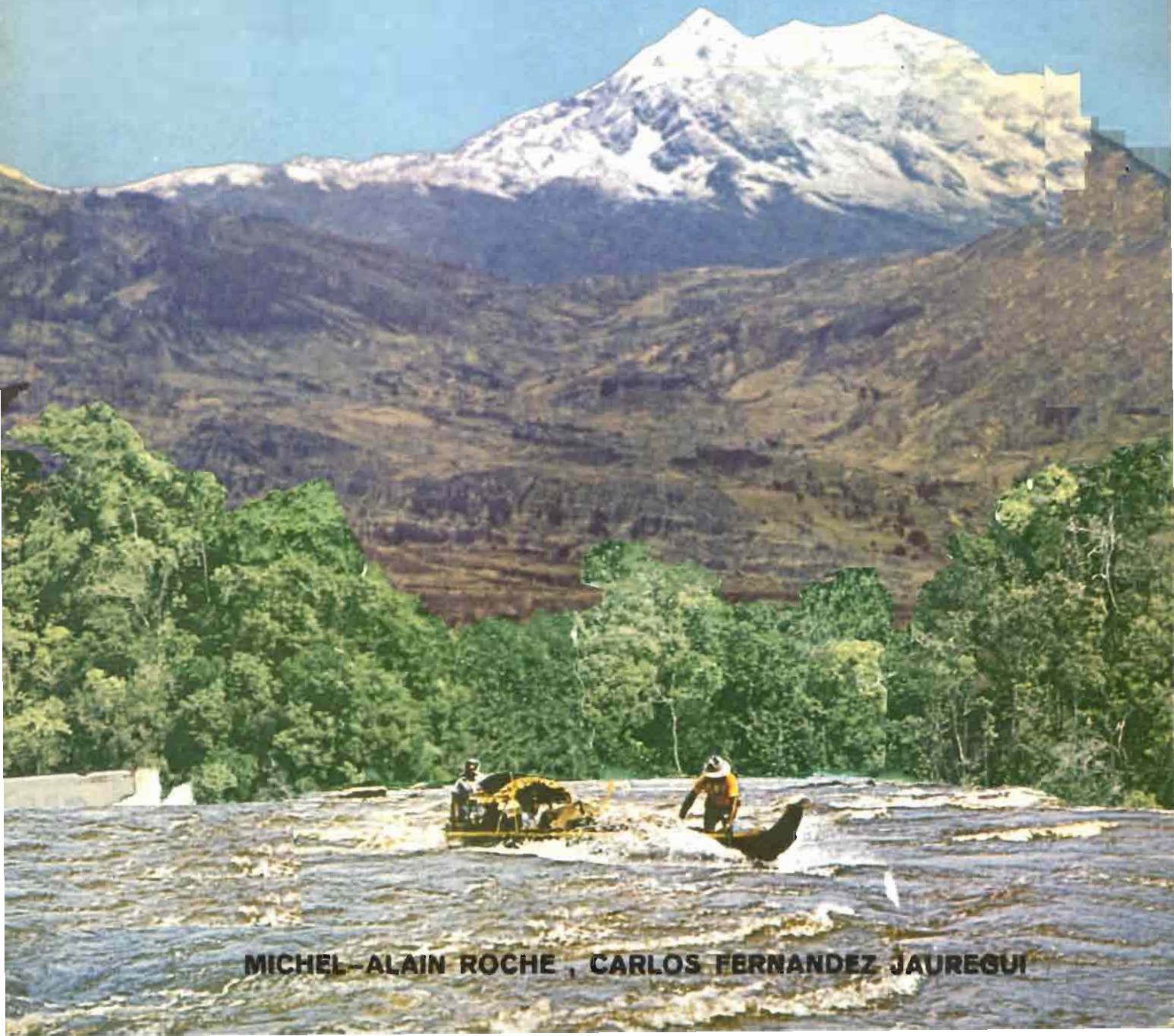
IHH

PHICAB

ORSTOM

CONAPHI

RESSOURCES HYDRIQUES
SALINITES ET EXPORTATIONS SALINES
DES FLEUVES DE L'AMAZONIE BOLIVIENNE



MICHEL-ALAIN ROCHE , CARLOS FERNANDEZ JAUREGUI

I H H

P H I C A B

O R S T O M

C O N A P H I

RESSOURCES HYDRIQUES
SALINITES ET EXPORTATIONS SALINES
DES FLEUVES DE L'AMAZONIE BOLIVIENNE

MICHEL-ALAIN ROCHE , CARLOS FERNANDEZ JAUREGUI

MARS 1987

RESSOURCES HYDRIQUES, SALINITES ET EXPORTATIONS SALINES DES FLEUVES DE
L'AMAZONIE BOLIVIENNE

Michel-Alain ROCHE ¹ et Carlos FERNANDEZ JAUREGUI ²

1. Institut Français de la Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM), 1 Cour de la Commanderie, 17000 La Rochelle, France.
2. Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH de la UMSA), BP 699, La Paz - Bolivia.

RESUME

Les ressources hydriques, les salinités et les exportations des grands sous-bassins du Haut Madera ont été mesurées pour la première fois. Le Rio Madera, à la confluence du Beni et du Mamoré est un des plus grands fleuves du monde : $17\ 000\ m^3.s^{-1}$, soit environ la moitié du débit du Congo, $1\ t.s^{-1}$ d'ions, soit un débit ionique proche de celui du Congo. Ses deux grands formateurs, le Beni et le Mamoré ont également des caractéristiques hydrologiques qui les classent comme de grands fleuves, supérieurs à la Volga, premier fleuve d'Europe, et au Niger, second fleuve d'Afrique. Les masses d'eau mises en jeu sont considérables. Les salinités de ces fleuves, de 57 à 61 $mg.l^{-1}$, sont relativement faibles à moyennes. Différents types d'eau, classés selon leur faciès hydrochimique, sont distingués dans les Andes, la plaine et les grands axes d'écoulement. Les eaux noires des plaines, très peu minéralisées, apparaissent le type le plus original. Le recyclage de la vapeur d'eau est confirmé par les faibles teneurs en chl orures et en sodium dans les eaux de la plaine, et permet de souligner l'importance de ce phénomène dans la genèse des précipitations sur le bassin. La contribution du haut Madera aux exportations de l'Amazone est de 9,7% pour les eaux et de 10,9% pour les ions.

Resumen

Los recursos hídricos, las salinidades y las exportaciones de las grandes sub-cuencas del alto Río Madera fueron medidas por primera vez. El Río Madera, a la confluencia de los Ríos Beni y Mamoré se revela uno de los más grandes ríos del mundo: $17\ 000\ m^3 \cdot s^{-1}$, siendo aproximadamente la mitad del caudal del Río Congo, $1t \cdot s^{-1}$ de iones, siendo un caudal iónico cercano del producido por el Río Congo. Sus dos grandes formadores, los Ríos Beni y Mamoré tienen igualmente características hidrológicas que los clasifican como grandes ríos, superiores al Río Volga, primer río de Europa, y al Río Niger, segundo río de Africa. Las masas de agua puestas en juego son considerables. Las salinidades de estos ríos, de 57 a $61\ mg \cdot l^{-1}$, son relativamente bajas a medianas. Diferentes tipos de agua, clasificadas conforme a sus facies hidroquímicas, son distinguidas en los Andes, los Llanos y los grandes ejes de escurrimiento. Las aguas negras de los llanos, muy poco mineralizadas, parecen el tipo más original. El reciclaje del vapor de agua es confirmado por las bajas concentraciones en cloruros y sodio en las aguas de la llanura, y permite subrayar la importancia de este fenómeno en la génesis de las precipitaciones sobre la cuenca. La contribución del alto Río Madera a las exportaciones del Río Amazonas es de 9,7% para las aguas y 10,9% para los iones.

Mots clés : HYDROLOGIE, HYDROCHIMIE, ANDES, AMAZONIE, BOLIVIE, AMERIQUE DU SUD, CLIMATOLOGIE.

SOMMAIRE

- Résumé
- INTRODUCTION
- SUPERFICIES, VEGETATION ET GEOLOGIE DES BASSINS
- PLUVIOMETRIE DES BASSINS
- FONCTIONNEMENT DU SYSTEME HYDROLOGIQUE
- RESSOURCES HYDRIQUES ET COMPARAISONS AVEC CELLES DES PLUS GRANDS FLEUVES DU MONDE
- SALINITES DES EAUX ET EXPORTATIONS IONIQUES
 - Salinités globales
 - Comparaison des salinités et des exportations ioniques avec celles des grands fleuves du monde
 - Teneurs ioniques spécifiques
 - Teneurs ioniques relatives et types d'eau
 - Essai d'évaluation des exportations d'ions spécifiques
- CONCLUSION
- Bibliographie
- Figures

INTRODUCTION

L'Amazonie bolivienne correspond à la moitié supérieure du bassin du Rio Madera (fig. 1), dont une partie se situe également au Pérou et au Brésil. L'ensemble du bassin s'étend sur la Cordillère orientale des Andes, la plaine adjacente et le Bouclier Brésilien. Les eaux s'y écoulent ainsi dans des zones de relief, de lithologie, de climat et de végétation très variées qui leur confèrent des caractéristiques très diverses.

Le Rio Madera est formé par la confluence de quatre grands fleuves: Le Madre de Dios et le Beni qui confluent pour continuer le Beni; le Mamoré et l'Itenez qui confluent pour continuer le Mamoré. Ce sont ainsi le Beni et le Mamoré qui constituent peu après le Madera.

Les recherches menées dans le cadre d'accords passés entre l'ORSTOM, l'IHH et le SENAMHI pour le Programme Hydrologique et Climatologique de la Bolivie (PHICAB), en concertation avec le PHI de l'UNESCO-Rostlac, ont permis pour la première fois une évaluation des ressources hydriques de cette région. Une carte des hauteurs moyennes annuelles de pluie a été tracée d'après les données pluviométriques de toutes les stations climatologiques fiables du pays (Roche, M.A. et al., 1985) tandis que les hauteurs d'eau et les débits ont été mesurés en une quinzaine de stations hydrométriques dans les grandes rivières du système (ROCHE, M.A. et al., 1986).

Parallèlement, les caractéristiques physico-chimiques des eaux ont été reconnues et les exportations salines évaluées, grâce à des mesures et analyses effectuées périodiquement aux mêmes stations et lors d'une campagne dans l'ensemble du bassin (ROCHE, M.A. et al., 1986).

Malgré des lacunes dans l'obtention des données, dues à la difficulté de trouver du personnel dans ces zones très éloignées, il a été possible d'estimer des valeurs moyennes mensuelles annuelles avec une précision satisfaisante.

Les mesures ont porté généralement sur les années 1984 et 1985, mais trois stations hydrométriques (Angosto del Bala sur le Beni, Abapo sur le Grande et Guayaramerin sur le Mamoré) ont été observés durant une quinzaine d'années. Ainsi, les valeurs obtenues dans l'ensemble du bassin ont pu être ajustées à des moyennes pluriannuelles (1968 ou 1970 à 1982).

Les tableaux 1 et 2 récapitulent les superficies et les volumes d'eau moyens pluriannuels disponibles à l'exutoire des grands bassins ainsi que les salinités et les tonnages d'ions exportés correspondants. Ces valeurs sont reportées sur les figures 5 et 9.

SUPERFICIES, VEGETATION ET GEOLOGIE DES BASSINS

L'ensemble du Rio Madera à sa formation draine un bassin de 851 000 km² dont 33,3% sont représentés par le Bassin du Beni et 66,7% par celui du Rio Mamoré. La superficie de la partie andine est de 204 500 km², soit 24%.

Dans les Andes, les bassins s'étalent depuis les glaciers, dont les plus hauts culminent entre 5 200 et 7 000 m, jusqu'à la forêt tropicale humide du piémont. Entre les deux, ils traversent au sud-est de La Paz, notamment dans le bassin du Rio Grande, des zones de hautes montagnes semi-arides.

Dans la plaine, la forêt est relayée à l'est par la savane inondable à forêt-galerie mais réapparaît sur le Bouclier Brésilien et dans le nord, après la confluence du Mamoré et de l'Itenez, où elle constitue la lisière de la grande forêt amazonienne.

Les terrains andins sont paléozoïques, mésozoïques, tertiaires et localement quaternaires. Ils ont été affectés par la phase de plissement pliocène, avec par endroits du Crétacé supérieur et de l'Eocène plissés lors de la phase anté ou intra-oligocène. Les plus hauts sommets sont constitués de roches éruptives (granites). Le Permien ou le Crétacé

contient des argiles rouges gypsifères dont les gisements sont localement exploités. Un gisement de chlorure de sodium est signalé dans le bassin du Rio Grande. Des schistes paléozoïques noirs et divers autres terrains des zones semi-arides ont la particularité de se couvrir d'exudations blanches en dehors des périodes de pluies rapprochées et d'être lessivés par celles-ci.

PLUVIOMETRIE DES BASSINS

La carte de pluviométrie moyenne annuelle (fig. 2), simplification d'une impression offset au 1/4 000 000 (M.A. Roche et al., 1985), montre la distribution spatiale des pluies sur l'ensemble de la Bolivie et des régions frontalières.

Le bassin du Rio Mamoré peut être subdivisé en trois zones :

- Le bassin du Rio Grande dans sa partie supérieure est semi-aride, avec des valeurs minimums de l'ordre de 480 mm dans la région de Cochabamba. Une zone à forte pluie, avec un maximum de 1700 mm sur les premiers reliefs des Andes, est à noter à l'ouest d'Abapo. La pluie moyenne sur le bassin est évaluée à 750 mm.
- Les bassins andins des affluents du Mamoré, situés entre ceux du Rio Grande et ceux du haut-Beni, sont les plus arrosés de Bolivie avec des hauteurs de pluies comprises entre 2000 et 6000 mm, le maximum se situant sur les deux formateurs du Chaparé (l'Espiritu Santo et le San Mateo), sur le Haut-Securé, sur le Chimoré et le Sacta. La précipitation moyenne sur cet ensemble est estimée à 3000 mm.
- La plaine, avec des précipitations comprises entre 800 mm sur le Rio Grande, 3000 mm sur l'Ichilo, 1900 mm au début du Madera. L'augmentation des hauteurs de pluie s'observe vers le Nord (800 à 1900 mm) et vers l'Ouest (1000-1900 mm à 2000-4000 mm). La pluie moyenne sur le bassin est évaluée à 1690 mm et 1800 mm sur l'ensemble du bassin du Mamoré.

Le bassin du Rio Itenez reçoit des précipitations comprises

entre 900 mm au sud, 1800 mm à l'est et 1900 mm au nord-est.

Le bassin du Rio Beni dans sa partie andine reçoit de l'ordre de 800 à 1000 mm sur les sommets plus de 4000 mm 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 mm. 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 mm. La pluie moyenne sur le bassin andin est estimée à 1630 mm.

Les pluies dans l'Alto-Beni varient entre 1500 et plus de 2000mm, tandis que celles de la plaine sont comprises entre 1650 et 2000 mm. La pluviométrie moyenne sur le bassin de la plaine est évaluée à 1800mm, et 1930 mm sur l'ensemble du bassin du Rio Beni.

Le bassin du Rio Madre de Dios reçoit des précipitations importantes, de 2500 mm à 7000 mm sur le versant andin, et de 1800 à 2500 mm dans la plaine.

La distribution spatiale des pluies apparaît très distincte selon les régions, tandis que la distribution temporelle des pluies mensuelles au cours de l'année présente la même forme sur l'ensemble du bassin amazonien.

La 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.

Pendant l'hiver austral, le ZITC atteint les Antilles et les anticyclones tropicaux s'établissent à leurs latitudes les plus septentrionales, voisines du bassin amazonien de Bolivie. C'est la saison sèche, caractérisée par une meilleure stabilité de l'air, avec cependant des

pluies dues aux convections diurnes. Parfois, se produisent des intrusions d'air du Sud (Surazos), d'origine polaire, avec la présence d'un front froid qui rencontre à cette époque une masse d'air peu humide.

En été austral, la Zone de Convergence revient vers la Bolivie puis oscille sur le pays où elle marque une forte inflexion vers le sud. C'est la saison des pluies qui détermine finalement la distribution spatiale. Les Alizés venus du Nord-Est ou du Nord, ainsi que les turbulences de la ZITC (vagadas), 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. Cette masse est formée d'une part d'air du Pacifique, qui paraît avoir perdu une grande partie de son humidité sur les Andes du sud du Chili, puis qui transite sur les zones semi-arides de l'Argentine, et d'autre part, d'air atlantique venu du sud-est en abandonnant une partie de son humidité sur le sud du Brésil et du Paraguay. Cet air du sud s'insinue dans la 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 mm, diminue progressivement vers le nord de la plaine amazonienne où les précipitations atteignent plus de 2000 mm. 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 mm. 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. Lorsque cet air humide passe par dessus les cimes, la descente de l'air dans ces zones déprimées, où il se réchauffe, n'est pas non plus favorable aux précipitations. L'épaisseur du flux amazonien

et son soulèvement éventuel par l'air méridional déterminent l'altitude maximale d'intervention sur le versant andin jusqu'à un éventuel débordement sur l'Altiplano.

FONCTIONNEMENT DU SYSTEME HYDROLOGIQUE

La distribution annuelle des pluies, conditionnée par l'alternance d'une saison des pluies et d'une saison sèche, détermine, dans les Andes et leur piémont, des hydrogrammes à multiples crues qui se fondent vers l'aval pour donner naissance à la grande crue annuelle de type tropical, précédée ou suivie de petites crues bien différenciées. La crue annuelle apparaît ainsi de moins en moins dentelée de l'amont vers l'aval des grands fleuves. Elle est davantage régularisée et aplatie sur le Mamoré et l'Itenez en raison de trajets plus longs et surtout de l'extension de vastes zones d'inondation. Ceci explique également un retard des crues du Mamoré et de l'Itenez par rapport à celles du Beni et du Madre de Dios, lequel peut représenter un décalage de deux mois.

Ces inondations d'une ampleur remarquable, se répandent sur des superficies de l'ordre de 100 000 à 150 000 km², intéressant en particulier les bassins du Mamoré et de l'Itenez. Elles se produisent principalement à partir de la confluence des Rios Chaparé, Ichilo et Grande, jusqu'à celle du Mamoré et de l'Itenez.

Pendant la période d'inondation, il apparaît que les eaux blanches et turbides des formateurs aval suffisent au remplissage du lit majeur du Mamoré, lequel de pente extrêmement faible ne permet pas de surcroît l'évacuation des eaux de la plaine latérale. Celles-ci, originaires des pluies locales et du débordement des affluents, dont les parties amont peuvent se situer sur le flanc oriental des Andes, sont transparentes et de couleur noire rougeâtre. Le mélange entre ces eaux "blanches" et "noires" semble se réaliser progressivement mais la différence de couleur des eaux permet de distinguer des trainées latérales qui dénotent

une composante longitudinale de l'écoulement des eaux d'inondation. L'Itenez, qui ne descend pas de reliefs prononcés et draine également de vastes zones inondées, charrie des eaux claires. Ces inondations se produisent de janvier à mai-juin, leur vidange vers les grands axes de drainage étant plus tardive vers l'aval.

RESSOURCES HYDRIQUES ET COMPARAISON AVEC CELLES DES PLUS GRANDS FLEUVES DU MONDE

Le volume moyen interannuel (1968 ou 70 à 1982) qui transite dans le Rio Madera à sa formation a été évalué à 536.10^9m^3 , soit un module de $17\ 000 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, dont 53,2% sont assurés par le Rio Beni et 47,7% par le Rio Mamoré (tableau 1, fig. 5). Ce débit est nettement supérieur à celui du plus puissant fleuve européen, la Volga (252.10^9m^3), lequel est analogue à celui du Mamoré (256.10^9m^3) et inférieur à celui du Beni (280.10^9m^3). A sa naissance, le Rio Madera reçoit un débit supérieur à celui de l'Ob (390.10^9m^3), du Gange (488.10^9m^3) et approche celui de la Lena (514.10^9m^3), du Ienessi (542.10^9m^3), du Mékong (577.10^9m^3), du Missipi-Missouri (580.10^9m^3), du Bramapoutre (608.10^9m^3). Seuls lui sont nettement supérieurs les débits de l'Orénoque (946.10^9m^3), de La Plata (725.10^9m^3), du Yan Tse Kiang (1104.10^9m^3), et du Congo (1200.10^9m^3) (1).

Cet apport au Madera représente 9,7% de celui assuré à l'océan par l'Amazone (5520.10^9m^3), alors que la superficie en cause représente 13% de la totalité du bassin amazonien.

La contribution moyenne pluriannuelle des Andes boliviennes à l'alimentation du Rio Madera peut être individualisée. Elle représente 132.10^9m^3 soit un module de $4170 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, constituant 25% du débit total du Rio Madera à sa formation. A cette valeur, doit être ajouté l'apport des Andes péruviennes correspondant au bassin du haut Madre de Dios,

(1) Débits et salinités des grands fleuves in GAC, J.Y., 1980.

lequel n'a pu être séparé de l'apport global mesuré dans ce fleuve à proximité de sa confluence avec le Beni (tableau 2, fig. 5).

Le bassin andin du Rio Beni exporte la plus grande quantité (72.10^9 m^3 , soit 13%), suivi par les bassins orientaux (51.10^9 m^3 , soit 10%), bien que le débit spécifique ($56 \text{ l.s}^{-1}/\text{km}^2$) y soit supérieur à celui du Beni ($31 \text{ l.s}^{-1}/\text{km}^2$). Le bassin andin du Rio Grande, en régime semi-aride sur la plus grande partie de sa superficie, avec 8.10^9 m^3 n'apporte que 1,5% des eaux du Madera.

Les quatre grands formateurs participent différemment à l'alimentation du Madera : Les débits sont assurés à 19% par le Beni avec 103.10^9 m^3 , 29% par le Madre de Dios avec 155.10^9 m^3 , 24% par le Mamoré avec 159.10^9 m^3 , et 7% par l'Itenez avec 64.10^9 m^3 . Les 20% complémentaires, soit 55.10^9 m^3 correspondent aux bassins situés entre la confluence de ces fleuves et le débit du Rio Madera. A leur confluence, le Beni et le Mamoré assurent respectivement une exportation hydrique de 280.10^9 m^3 , soit 52,3% et 256.10^9 m^3 , soit 47,7%.

Le Beni et le Mamoré, à leur confluence, ont chacun un débit supérieur à celui du Niger (195.10^9 m^3) et du Zambèze (131.10^9 m^3), lesquels sont les deuxième et troisième fleuves d'Afrique. L'Itenez présente un débit annuel compris entre celui du Chari (50.10^9 m^3 , en "période normale"), et du Nil (89.10^9 m^3). Le Mamoré à sa confluence avec l'Itenez a un débit du même ordre de grandeur que celui du Niger, du Danube (198.10^9 m^3) ou du Zambèze.

Dans l'ensemble du bassin, constitué par le Beni à sa confluence avec le Madre de Dios et par le Mamoré à sa confluence avec l'Itenez, la contribution de la plaine est évaluée à 131.10^9 m^3 , soit 24,5% de l'apport au Madera. Les Andes et la plaine de cet ensemble participent à parts égales aux ressources hydriques aboutissant au Rio Madera, bien que les sous-bassins aient des comportements différents.

Tableau 1 : Salinités et exportations hydriques et ioniques moyennes pluriannuelles.

ENSEMBLE DU HAUT BASSIN DU RIO MADERA		Superficie km ²	HYDRIQUE						SALIN						
			ECOULEMENT						EXPORTATION						
			Ecoulement mm	10 ⁹ m ³	%	%	Module m ³ .s ⁻¹	Module sp. l.s ⁻¹ .km ⁻¹	Cond.pond. US	Salin.pond. mg.l ⁻¹	Exp. sal. 10 ⁶ t.	%	%	Mod. ion kg.s ⁻¹	Mod. ion.sp. t.an ⁻¹ .km ⁻²
PERIODE 1968/70-82															
Beni	Andes	73670	980	72,2	13,5	25,7	2228	31,1	102	72	5,2	16,4	30,4	165	71
Beni	Plaine	48710	626	30,5	5,7	10,9	966	19,8	79	53	1,6	5,0	9,4	52	33
Beni	s/total	122380	839	102,9	19,2	36,7	3261	26,6	95	66	6,8	21,5	39,8	217	56
Madre de Dios	total	125000	1242	155,1	28,9	55,3	4915	39,6	68,8	45,5	7,1	22,3	41,3	224	57
Orthon	total	32360	482	15,6	2,9	5,6	494	15,3	41,2	23,4	0,37	1,2	2,2	11,6	11,3
Beni s.l.	total	283350	990	280,4	52,3	100	8885	31,5	88,1	60,9	17,1	53,9	100	542	60,3
Grande	Andes	59840	137	8,3	1,5	3,2	264	4,4	595	464	3,9	12,3	26,7	123	65
Bassins orientaux	Andes	29000	1767	51,0	9,5	19,9	1617	55,7	106	75	3,8	12,0	26,0	121	132
Andes	s/total	88840	668	59,3	11,1	23,2	1880	21,2	175	130	7,7	24,3	52,7	244	87
Mamoré	Plaine	133230	747	99,6	18,6	39,0	3155	23,7	80	54,2	5,4	17,0	37,0	171	40
Mamoré	s/total	222070	716	158,9	29,6	62,1	5033	22,7	115	82,5	13,1	41,3	89,7	415	59
Itenez	total	303280	211	63,9	11,9	25,0	2021	6,7	34	17,6	1,1	3,5	7,5	35,3	2,8
Mamoré	Guayaramerin	547060	455	248,7	46,5	97,4	7880	14,4	84,6	58,1	14,5	45,7	99,3	459	26,5
Yata + BV.	Brésil	20770	340	7,0	1,3	2,7	222	10,7	37	20	0,14	0,4	0,9	4,4	6,7
Mamoré	total	567830	450	255,7	47,7	100	8105	14,3	83,4	57,2	14,6	46,1	100	463	25,7
Madera	Naissance	851180	630	536	100	-	17000	20	86	59	31,7	100	-	1005	37

Tableau 2 : Salinités et exportations hydriques et ioniques moyennes pluriannuelles.

ANDES AMAZONIENNES EN BOLIVIE		Superficie km ²	HYDRIQUE						SALIN						
			Pluie mm	Evap.réelle mm	ECOULEMENT				Cond.pond. US	Salin.pond. mg.l ⁻¹	EXPORTATION				
					Ecoulement mm	10 ⁹ m ³	t	Module m ³ .s ⁻¹			Module sp. l.s ⁻¹ .km ⁻¹	Exp. sal. 10 ⁶ t.	Exp. sal. t	Mod. ion kg.s ⁻¹	Mod. ion.sp. t.an ⁻¹ .km ⁻²
PERIODE															
Rio Beni		73670	1719	781	980 938	72,2	54,9	2288	31,1	102	72	5,2	40,3	165	71
Bassins orientaux		28870	2984	1224	1767	51,0	38,8	1617	56,0	106	75	3,8	29,5	121	132
Rio Grande		59840	751	614	137	8,32	6,3	264	4,44	595	464	3,9	30,2	123	65
Total Andes Amazoniennes de Bolivia		162380	1587	798	810	131,5	100	4169	25,7	135	98,1	12,9	100	409	80

Le Beni, le Rio Grande, et les autres affluents du Mamoré fournissent, dans leur partie andine, respectivement 14, 1,5 et 10% de l'apport au Rio Madera.

SALINITE DES EAUX ET EXPORTATIONS IONIQUES

Salinités globales

La figure 6 et les tableaux 1 et 2 indiquent les valeurs de salinité globale et leur évolution dans l'ensemble du bassin. En tête de bassins andins, les salinités sont faibles, de l'ordre d'une dizaine de mg.l^{-1} . C'est le cas à l'extrémité des glaciers. Les eaux fluviales acquièrent rapidement leurs salinités maximales peu en aval, dans les Andes mêmes, par lessivage des roches altérées ou de type évaporitique. Ce phénomène engendre ainsi selon la lithologie des bassins des minéralisations de faciès diversifiés. Les plus fortes salinités sont observées à la traversée de terrains riches en inclusions évaporitiques telles que gypse, autres sulfates, carbonates et, secondairement et localement, chlorure de sodium. La minéralisation souvent de faciès sulfaté provient ainsi notamment de la dissolution du gypse contenu dans des argiles rouges ainsi que du lessivage d'efflorescences blanches pelliculaires déposées en zones semi-arides sur différents matériaux, en particulier sur schistes noirs (cf. salinités spécifiques).

Le Rio La Paz, issu des glaciers de Chacaltaya est un exemple typique. A la sortie du glacier, de 20 mg.l^{-1} , les salinités augmentent jusqu'à 300 mg.l^{-1} sur quelques dizaines de kilomètres en aval pour atteindre 430 mg.l^{-1} à l'entrée de la zone tropicale humide où débute la dilution. L'accroissement de la salinité est certainement accentuée par la traversée de la ville de La Paz, où la pollution est mise en évidence par des teneurs anormalement élevées en nitrates.

Le régime de variation des salinités, comparé à celui des pluies et des écoulements, indique que le lessivage des "sels" et leur simple

dilution sont les phénomènes d'érosion chimique prédominants, à l'origine de la minéralisation des eaux fluviales : La tendance générale de la variation de la salinité est inverse de celle des débits (fig. 7) bien qu'il existe parfois des exceptions. La relation conductivité moyenne mensuelle-débit moyen mensuel (fig. 8) s'ajuste à une courbe moyenne de forme hyperbolique. Les points représentatifs de la décrue et de l'étiage se situent au-dessus de la courbe moyenne. Ceux de la période de montée des eaux occupent la partie au-dessous de la courbe. La distribution de ces points suit ainsi un "circuit logique" au cours du cycle annuel, déterminé par les phénomènes de dissolution et de dilution dans le bassin.

Le taux de minéralisation peut être très différent selon la lithologie, le régime climato-hydrologique et la végétation des bassins, caractéristiques elles-mêmes très diversifiées dans l'ensemble de la Bolivie (fig. 9). Deux cas extrêmes se présentent ainsi selon que les bassins s'étendent largement en zone semi-aride tels que ceux des Rios La Paz ou Grande, ou qu'ils "plongent" directement vers la plaine amazonienne, en zone très arrosée, tels que plusieurs formateurs andins du Rio Beni. Il arrive cependant, même dans ce dernier cas, que la minéralisation des eaux soit élevée malgré une forte hydraulité, tel que dans le bassin du Rio Chaparé : La lithologie particulièrement riche en évaporites l'emporte alors sur la pluviosité.

Dans la plaine amazonienne, les effets des régimes climato-hydrologiques et de la végétation prévalent sur celles de la lithologie. La dilution de l'apport andin par les eaux abondantes et moins minéralisées des apports latéraux apparaît nettement de l'amont vers l'aval. Les pluies qui tombent sur les sédiments quaternaires détritiques de la plaine y trouvent moins de sels à dissoudre que dans les terrains andins à lithologie variée et à morphologie très érodable. Le recyclage annuel de mares, dont les eaux isolées se concentrent par évaporation pendant la saison sèche, n'est pas un apport effectif en sels lors du balayage par la crue annuelle. On retrouve ici la notion d'érosion "verticale"

dans les Andes et d'érosion "horizontale" dans la plaine, particulièrement apparente pour les suspensions, mais également applicable pour les matières dissoutes. La diminution des salinités d'amont en aval se révèle la règle sur les grands axes des Rios Mamoré et Beni.

Le type extrême des eaux de plaine est remarquable car sa salinité est parmi les plus faibles du monde (13 à 20 μS). Ce sont des eaux directement accumulées à la suite des pluies, dont le cheminement vers les axes de drainage se produit lentement. Leur pH est nettement acide. Filtrées par la végétation, sans turbulence, elles présentent une grande transparence. Le contact prolongé avec une végétation herbacée dense ou la forêt, qu'elles imbibent sur de faibles épaisseurs, ainsi qu'avec des sols humifères souvent hydromorphes, les colore en brun-rouge et leur donne un reflet noir, d'où leur appellation d'"eaux noires".

Ces eaux sont identifiées par exemple dans les inondations du centre de la plaine de Trinidad. Les lagunes éloignées des grands cours d'eau sont alimentées par ces mêmes eaux, telle que la Laguna Suarez qui présente une conductivité de 18 μS . Elles existent également sous forêt amazonienne dans le nord de la Bolivie, comme dans la zone inondée du Rio Ivon. Les eaux du Rio Itenez, sont d'un type assez proche, bien que moins pures avec une salinité légèrement supérieure (34 μS).

Ce type d'eau a été également rencontré dans les plaines d'inondation herbeuses du Tchad et du Cameroun (ROCHE, M.A., 1973, 1975), ainsi qu'en forêt guyanaise. Il semble très répandu en Amazonie où le nom de Rio Negro se répète dans la plupart des grands bassins. Contrairement à ce qui est en usage en Afrique, notamment en zone sahélienne, la pratique des feux de brousse de grande ampleur n'est pas utilisée en Amazonie. L'obtention des caractéristiques de ces eaux noires ne nécessite donc pas obligatoirement que la végétation soit transformée en cendre.

La particularité de la physico-chimie des eaux noires et les superficies qu'elles couvrent dans la zone intertropicale justifient l'intérêt

de recherches spécifiques sur l'acquisition de telles caractéristiques, en particulier sur les phénomènes d'interactions avec la végétation et les sols.

Par les compositions d'apports diversifiés, à teneurs en ions très variées, fortes (Rio Grande) à faibles (Rio Itenez), le Rio Madera reçoit finalement des eaux de salinité moyenne, comparée à celles d'autres grands fleuves du monde.

Comparaisons des salinités et des exportations ioniques avec celles des grands fleuves du monde

Les salinités interannuelles du Beni (61 mg.l^{-1}) et du Mamoré (57 mg.l^{-1}) à leur confluence, ainsi que du Madera (59 mg.l^{-1}) sont relativement faibles, comparées à celles des grands fleuves européens (180 à 460 mg.l^{-1}) ou de certains fleuves africains tels que le Nil (200 mg.l^{-1}), l'Orange (133 mg.l^{-1}) ou le Zambèze (149 mg.l^{-1}).

Les salinités de ces fleuves amazoniens sont toutefois supérieures à celles du Congo (31 mg.l^{-1}), du Niger (48 mg.l^{-1}), du Sénégal (42 mg.l^{-1}).

Parmi les fleuves d'Amérique et d'Asie, les salinités du Mamoré, du Beni et du Madera sont supérieures à celle de l'Orénoque (52 mg.l^{-1}), mais inférieures à celles des autres grands fleuves qui peuvent atteindre 223 mg.l^{-1} pour le Mississipi-Missouri.

Les salinités du Madera et de ses deux grands formateurs sont légèrement supérieures à celles de l'Amazone, évaluées à 53 mg.l^{-1} .

Les exportations salines interannuelles, de 17.10^6 t pour le Beni, 15.10^6 t pour le Mamoré (tableaux 1 et 2, fig. 9) sont proches de celles du Rhin (15.10^6 t), supérieures à celles du Rhône ($12,5.10^6 \text{ t}$) et du Chari (2.10^6 t). Elles sont inférieures à celles du Nil (18.10^6 t) et du Zambèze ($19,5.10^6 \text{ t}$).

Les exportations salines annuelles, à la formation du Madera atteignent $32 \cdot 10^6$ t, soit $1 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$. Elles sont du même ordre que celles du Congo ($37 \cdot 10^6$ t) et plus nettement inférieures à celles de l'Ob et de l'Orénoque ($50 \cdot 10^6$ t), du Danube ($44,5 \cdot 10^6$ t), du Mississippi ($130 \cdot 10^6$ t) ; ce dernier après l'Amazone, méritant la deuxième place mondiale.

L'exportation saline, à la formation du Madera, représente 10,9 % de celle assurée par l'Amazone ($290 \cdot 10^6$ t).

Les valeurs de salinité et d'exportation relatives aux différents formateurs du Madera depuis les Andes sont indiquées dans les tableaux 1 et 2.

A l'échelle interannuelle, les Andes (60,2% de la superficie) exportent par le Rio Beni $72,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ et $5,2 \cdot 10^6$ t d'ions dissous avec une salinité moyenne de $72 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (102 μS).

La plaine proprement dite (39,8% de la superficie), exporte par le Rio Beni $30,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ d'eau et $1,6 \cdot 10^6$ t d'ions dissous, avec une salinité moyenne de $53 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (79 μS).

L'ensemble du bassin du Beni, à la confluence avec le Rio Madre de Dios, exporte $103 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ d'eau et $6,8 \cdot 10^6$ t d'ions dissous, avec une salinité moyenne de $66 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (95 μS). Dans ce bassin, les exportations hydriques et salines sont assurées respectivement à 70 et 76% par les Andes qui couvrent 60% de la superficie.

L'apport global du Madre de Dios atteint $155 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ d'eau, et $7,1 \cdot 10^6$ t d'ion avec une salinité moyenne de $45,5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (68,8US). A la confluence du Madre de Dios et du Beni, 60% des apports hydriques proviennent de ce premier fleuve, tandis que les apports salins sont mieux équilibrés, approchant 50% pour chacun des deux fleuves.

Le Rio Orthon présente l'intérêt de couvrir presque uniquement une zone de plaine sous forêt amazonienne. Il contribue aux débits

du Beni avant la confluence avec le Madera par un apport hydrique évalué à $15,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, un apport ionique de $0,37 \cdot 10^6 \text{ t}$ et une salinité moyenne de $23,4 \text{ mg.l}^{-1}$ (41 μS).

Teneurs ioniques spécifiques

L'évolution des teneurs ioniques spécifiques d'amont en aval est mise en évidence sur le schéma regroupant les histogrammes des teneurs dans l'ensemble des sous-bassins de l'Amazonie bolivienne (fig. 10). L'évolution longitudinale de l'hydrochimie des grands fleuves est également illustrée par les graphiques indiquant les concentrations des différents ions en fonction de la distance comptée à partir des lignes de crête jusqu'au Rio Madera (fig. 11). Des cartes en couleurs ont été publiées sur ce sujet (ROCHE, M.A. et al., 1986).

L'alcalinité montre, comme la salinité globale, des valeurs variables selon les bassins, échelonnées de 0 à 260 mg.l^{-1} . De très faibles valeurs sont rencontrées en tête de bassins andins. Cependant, les eaux "noires" présentent les alcalinités les plus faibles (6 mg.l^{-1}). Certains auteurs (MEYBECK, M., 1984) mentionnent pour ce type d'eaux tropicales des alcalinités pouvant être nulles. Ces eaux présentent en outre des pH très acides, de l'ordre de $5 \pm 0,5$. Il est à noter, étant donné les faibles salinités globales, que d'autres anions ne sont pas non plus identifiables. Les eaux du Rio Itenez se différencient du type pure des eaux "noires" par une teneur en bicarbonates de 15 mg.l^{-1} et une teneur en calcium de $1,6 \text{ mg.l}^{-1}$. Les eaux du Rio Yata, également proches de celles-ci, qui drainent les lacs Rogagua, ont une alcalinité plus faibles que celles de l'Itenez. Les alcalinités les plus élevées sont celles du Rio Grande. Les eaux du Madera contiennent 28 mg.l^{-1} .

Des teneurs notables en chlorures ($0,7$ à 37 mg.l^{-1}) apparaissent dans de nombreux cours d'eau des Andes, en importance toutefois moindre que celles en sulfates et en alcalinité. Dans la plaine, l'apport en chlorures est dilué. Dans le Rio Mamoré, les valeurs deviennent infé-

rieures à $0,7 \text{ mg.l}^{-1}$ à la confluence des Rios Grande et Ichilo puis, ayant augmenté grâce à l'apport du Securé repassent en dessous de ce seuil à partir de Trinidad. Le Rio Alto-Beni contient des teneurs en chlorures comprises entre $0,7$ et 3 mg.l^{-1} , dues aux apports des Rios La Paz et Consata. Les teneurs du Rio Beni sont diluées à moins de $0,7 \text{ mg.l}^{-1}$ dès la sortie des Andes. Il est à remarquer que ce sont les eaux les plus minéralisées et les plus sulfatées qui présentent les teneurs en chlorures les plus élevées. Les chlorures seraient ainsi associés aux sulfates (gypse) dans les gisements d'évaporites. Les quatre formateurs du Rio Madera, à leur confluence, contiennent moins de $0,7 \text{ mg.l}^{-1}$ de chlorures.

Les teneurs en sulfates sont comprises entre 0 et 355 mg.l^{-1} dans l'ensemble du bassin amazonien de Bolivie. Des concentrations très faibles sont fréquentes en tête des bassins du Rio Beni mais deviennent rapidement élevées, comme la salinité globale, à la suite de la traversée des terrains riches en évaporites ou couverts des efflorescences mentionnées précédemment dont l'analyse a révélé la composition suivante :

SO_4	Mg	Fe	Ca	Mn	Sn	Pb	Zn
78,4	12,5	8,2	0,8	0,1	0,07	0,02	0,03
(% de mg)							

Ces efflorescences doivent provenir en partie de l'altération des pyrites, dont les solutions exudent entre chaque pluie, par remontée capillaire et évaporation à la surface des terrains. Dans le Rio Grande, ce phénomène est accentué par le régime climato-hydrologique de type semi-aride. Dans la plaine, on assiste à une dilution progressive : à leur confluence, les quatre tributaires présentent des teneurs comprises entre 5 et 9 mg.l^{-1} , avec une teneur de 6 mg.l^{-1} pour le Rio Madera.

Les concentrations en nitrates sont inférieures à $1,25 \text{ mg.l}^{-1}$, sauf dans les Andes où apparaissent localement des valeurs comprises entre

1,25 et 15 mg.l⁻¹. Elles sont alors dues à la pollution urbaine car elles n'existent qu'en aval de villes ou villages. La plus forte pollution est celle du Rio La Paz dont l'effet se maintient sur plus de cent kilomètres en aval de la ville de La Paz. En effet, cette ville de plus d'un million d'habitants, n'a pas de système de traitement des eaux usées qui rejoignent intégralement le Rio La Paz. Le même phénomène est mis en évidence dans les vallées très peuplées de Cochabamba où s'ajoute probablement la contamination par les engrais utilisés pour l'agriculture. Dans la plaine amazonienne cette pollution n'est plus mise en évidence. Les eaux du Madera contiennent moins de 0,6 mg.l⁻¹ de nitrates.

Les teneurs en phosphates sont comprises entre des valeurs inférieures à 0,06 mg.l⁻¹ et 0,44 mg.l⁻¹. Les concentrations maximales sont observées dans des cours d'eau très différents des Andes et de la plaine. Les eaux du Rio Madre de Dios et de l'Orthon, avec des teneurs respectives de 0,10 mg.l⁻¹ et 0,25 mg.l⁻¹, contiennent plus de phosphates que celles des trois autres tributaires du Madera, pour lesquelles les teneurs sont inférieures à 0,06 mg.l⁻¹. Les eaux de Madera ont une concentration de 0,06 mg.l⁻¹.

Les valeurs maximales en calcium (41 mg.l⁻¹), rencontrées dans les Andes (Rios Grande, La Paz et Consata), vont de pair avec une minéralisation élevée et de fortes teneurs en sulfates, principalement provoquées par la dissolution de gypse. En aval, des teneurs extrêmement faibles en calcium, de 0,4 à 2 mg.l⁻¹, caractérisent les Rios Rapulo, Itenez et Yata tandis que les eaux "noires" des plaines inondées peuvent être considérées sans calcium, avec des teneurs inférieures à 0,2 mg.l⁻¹. A leur confluence, les Rios Beni et Mamoré ont des concentrations respectives en calcium de 7,5 et 4 mg.l⁻¹ qui déterminent une concentration de 5,5 mg.l⁻¹ pour le Rio Madera. Les teneurs en calcium du Rio Beni sont ainsi deux fois plus fortes que celles du Rio Mamoré où les inondations sont plus importantes.

Les teneurs en magnésium sont comprises entre $0,06 \text{ mg.l}^{-1}$ et 78 mg.l^{-1} . La répartition des teneurs dans l'espace, notamment leur évolution d'amont en aval, apparaît similaire à celle du calcium. Dans les Andes, les teneurs sont parfois supérieures à celles en calcium tel que dans les Rios Kaka ou Grande, probablement en raison du lessivage des efflorescences salines. Il existe également une tendance à un enrichissement relatif dans la plaine, bien que l'on y rencontre aussi les teneurs minimales dans des cours d'eau de forêt. Les Rios Beni et Mamoré confluent avec des teneurs respectives de $2,25$ et $1,95 \text{ mg.l}^{-1}$ et déterminent pour le Madera une teneur de $2,2 \text{ mg.l}^{-1}$. Pour le magnésium, comme pour le calcium les concentrations sont plus importantes dans le Beni que dans le Mamoré, cependant dans un rapport moindre.

Les teneurs en sodium varient entre des valeurs inférieures à $0,2 \text{ mg.l}^{-1}$, dans les cours d'eau de la plaine, et 47 mg.l^{-1} dans les rios andins La Paz et Grande. La similitude de distribution du sodium avec celle des chlorures est l'indice d'une dissolution d'halite dans les terrains à faciès évaporitiques. Dans la plaine, les concentrations minimales en sodium, ainsi que les teneurs non décelables en chlorures, alors que les possibilités de dissolution de tels ions sont réduites, témoignent de l'inexistence d'apports pluviométriques maritimes directs. Bien que les masses d'air humide, portées par les Alizées et déviées vers le nord sur la Bolivie par une inflexion de la Zone Intertropicale de Convergence, proviennent à l'origine de l'Atlantique, les très faibles teneurs en sodium et en chlorures dénotent un recyclage de la vapeur d'eau par évaporation à partir de la végétation et des eaux de surface, au cours de leur trajet sur l'Amazonie. Les apports locaux assurent dans la plaine une diminution des teneurs en sodium issues des Andes. Ces concentrations atteignent ainsi $2,3 \text{ mg.l}^{-1}$ dans les Rios Beni et Mamoré à leur confluence et dans le Rio Madera.

Les teneurs en potassium varient entre $0,35$ et 10 mg.l^{-1} . Ces valeurs extrêmes sont observées pour divers cours d'eau des Andes. La dilution conduit à une valeur de $1,96 \text{ mg.l}^{-1}$ dans les Rios Beni, Mamoré

et Madera, identiques comme pour le sodium pour les deux grands formateurs.

Teneurs ioniques relatives et types d'eau

Les teneurs ioniques relatives ¹ des eaux du bassin amazonien de Bolivie ont été représentées par des diagrammes en pourcentage reportés sur une carte pour les sites les plus représentatifs (fig. 12).

Au-delà d'une classification, conforme à Sioli H. (1984), en eaux "blanches" (Grands cours d'eau des Andes, grands axes d'écoulement), en eaux "noires" (inondations et cours d'eau associés), en eaux "vertes" (Rio Itenez), les eaux sont caractérisées par des faciès hydrochimiques ², très différents selon les bassins et leur situation.

Dans les Andes, les eaux sont en général bicarbonatées ou sulfatées, soit calciques, soit magnésiennes. Ainsi l'évolution des faciès hydrochimiques de l'amont vers l'aval de la cordillère est déterminée par les mélanges d'apports successifs de compositions différentes à chaque confluent, conduisant à des modifications plus ou moins accentuées du faciès hydrochimique.

Par contre, dans les grands fleuves de la plaine, l'évolution des faciès est peu marquée, la dilution étant le phénomène prédominant en raison des apports latéraux et locaux peu minéralisés.

Plusieurs grands types hydrochimiques peuvent être ainsi distingués:

- Les eaux des Andes :

- . Sulfatées calciques : Rios Consata, Kaka, Alto Beni, Chimoré, Ichilo
- . Sulfatées magnésiennes, puis calciques vers l'aval : Rios La Paz-Boopi,

1. Teneur en un ion, en meq.l^{-1} , par rapport à la somme des teneurs ioniques.
2. Classement des teneurs en ions, en meq.l^{-1} , par ordre décroissant.

Grande

- . Bicarbonatées calciques : Rios Unduavi, Rocha, San Mateo, Espiritu Santo.
- Les eaux de la plaine orientale :
 - . Bicarbonatées calciques : Grands fleuves tels Beni, Chaparé, Mamoré, Madre de Dios
 - . Bicarbonatées calci-magnésiennes : Rio Orthon
 - . Faciès anioniques souvent indéterminables à cause des très faibles teneurs, mais à faciès cationiques mieux identifiables : Inondations de plaines herbeuses ou forestières par les eaux "noires"
 - + sodiques puis potassiques et magnésiennes, sans calcium: Inondations de Trinidad
 - + potassiques puis magnésiennes, avec de faibles teneurs en calcium : Rio Yata
 - + très fortement potassiques puis sodiques, sans calcium et très faibles teneurs en magnésium : Rio Ivon.

Essai d'évaluation des exportations d'ions spécifiques

Un essai d'évaluation des exportations moyennes annuelles de chaque ion est tenté en multipliant les teneurs relatives disponibles (en poids) par le tonnage global transporté. En l'attente de teneurs relatives moyennes pondérées par les débits, les valeurs obtenues ne peuvent représenter que des ordres de grandeurs provisoires.

On retiendra ainsi, à l'échelle moyenne interannuelle, que les bicarbonates représentent les plus forts tonnages exportés : $3,6 \cdot 10^6$ t des Andes par le Beni et le Grande réunis, $10 \cdot 10^6$ t, $9 \cdot 10^6$ t et $19 \cdot 10^6$ t respectivement par le Beni, le Mamoré et le Madera.

Les sulfates viennent ensuite : $2,8 \cdot 10^6$ t des Andes par le Beni et le Grande réunis, $2,3 \cdot 10^6$ t, $2,0 \cdot 10^6$ t et $4,3 \cdot 10^6$ t respectivement pour le Beni, le Mamoré et le Madera.

Les quantités respectives sont pour le calcium $1,1 \cdot 10^6$ t, $2,2 \cdot 10^6$ t, $1,4 \cdot 10^6$ t et $3,6 \cdot 10^6$ t, le sodium $0,5 \cdot 10^6$ t, $0,8 \cdot 10^6$ t, $0,9 \cdot 10^6$ t et $1,7 \cdot 10^6$ t, le magnésium $0,8 \cdot 10^6$ t, $0,8 \cdot 10^6$ t, $0,7 \cdot 10^6$ t et $1,5 \cdot 10^6$ t, et le potassium $0,12 \cdot 10^6$ t, $0,6 \cdot 10^6$ t, $0,7 \cdot 10^6$ t et $1,3 \cdot 10^6$ t.

CONCLUSION

Les exportations hydriques et salines ont été pour la première fois mesurées dans l'ensemble du haut bassin du Rio Madera qui constitue l'Amazonie bolivienne, dans les Andes et la plaine. Ce système hydrologique apparaît remarquable par ses dimensions et sa puissance hydrologique.

Ce fleuve, à sa formation, se situe parmi les plus grands du monde par ses exportations en eaux, $17\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et en ions, $1\ \text{t} \cdot \text{s}^{-1}$: La moitié du débit du Congo, un débit ionique analogue.

Il en est de même pour ses deux tributaires, le Beni avec $8890\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $0,54\ \text{t} \cdot \text{s}^{-1}$, et le Mamoré avec $8100\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $0,46\ \text{t} \cdot \text{s}^{-1}$. La contribution aux exportations de l'Amazone ($174\ 800\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ $9,2\ \text{t} \cdot \text{s}^{-1}$) est de 9,7% pour les eaux et de 10,9% pour les ions alors que la superficie en cause représente 13,5% de la totalité du bassin amazonien.

Les salinités, avec des valeurs respectives de 59, 61 et 57 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le Madera, le Beni et le Mamoré sont relativement faibles pour des fleuves de cette importance, mais un peu plus élevées que celle de l'Amazone, évaluée à 53 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

Les eaux du haut Madera évacuent principalement des bicarbonates (61%), puis des sulfates (14%), du calcium (11%), du sodium (5%), du magnésium (5%) et du potassium (4%). Les eaux "noires" de la plaine constituent le type d'eau le plus original qui justifie par les superficies couvertes une étude approfondie de sa géochimie et des interactions

avec la végétation et les sols.

Le bassin du haut Madera, dans sa partie andine et de plaine, contribue ainsi pour une part importante aux transferts de matières en Amazonie et dans le monde. De telles masses d'eau mises en jeu, et les inondations engendrées sur des dizaines de milliers de kilomètres carrés durant plusieurs mois de l'année, mettent en évidence l'importance du phénomène de recyclage de la vapeur d'eau en Amazonie, même en l'absence de forêt dense. Ces conditions climato-hydrologiques doivent être prises en considération pour appréhender les déterminations météorologiques sur le continent sud-américain.

BIBLIOGRAPHIE

- ABASTO, N., HOORELBECKE, R., ROCHE, M.A., RUBIN, L., 1985 - Alturas de agua y caudales, limnigramas e hidrógramas de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. PHICAB, 70 p.
- BAUMGARTNER, A. and REICHEL, E., 1975 - The World Water Balance. Elsevier, Amsterdam, 179 p.
- DURUM, W.H., HEIDEL, S.G., TISON, L.J., 1960 - World wide runoff of dissolved solids. A.I.H.S. Ass. Gen. Helsinki, Publ. 51, pp. 618-628.
- FERNANDEZ, C., 1986 - Perfil ambiental de Bolivia. In los recursos hídricos. PHICAB-IHH-CONAPHI, Bolivia, La Paz, 138 p.
- FERNANDEZ, C., ALIAGA, A., 1986 - Directorio actualizado sobre los recursos hídricos de Bolivia. IHH, CONAPHI, CEPAL.
- FERNANDEZ, C., GORFIAS, J., 1987 - Cálculo de las crecidas según diferentes métodos, en la cuenca del Pirai. IHH, HBWM, SEARPI, La Paz.
- GAC, J.Y., 1980 - Géochimie du bassin du Lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation, ORSTOM, 251 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. Geol.Soc.Amer.Bull., 78, 10, pp. 1203-1232.
- GIBBS, R.J., 1972 - Water chemistry of the Amazon River. Geochim.Cosmochim. Acta, 36, p. 1061-1066.
- LIVINGSTONE, D.A., 1963 - Chemical composition of rivers and lakes. Date of geochemistry, US.Geol.Survey,Prof.Paper, 440 G. 64 p.
- LVOVITCH, M.I., 1970 - World water balance, General Report, Publ.93, pp. 401-415, AIHS, Reading, U.K., 1970.
- LERMAN, A., 1979 - Geochemical processes. Water and Sediment Environment, Wiley, New York, 482 p.
- MARTIN, J.M. and MEYBECK, M., 1979 - Elemental mass-balance of material carried by world major rivers. Marine Chem., 7, 173-206.
- MARTIN, J.M., WHITFIELD, M., 1983 - The significance of the river in sea water. Ed. Wong, Plenum Publishing Corporation.
- MAYNAR, J.B., 1981 - Chemical mass-balance between rivers and oceans. Proc.Symp. on "Chemical Cycles in the Evolution of the Earth", Yellow Springs, Ohio, sept. 1980.

- MEADE, R.H., NORDIN, C.F., CURTIS, W.F., COSTA-RODRIGUEZ, F.M., DOVALE, C.M. and EDMOND, J.M., 1979 - Sediment loads in the Amazon river. Nature, 278, 161-163.
- MEYBECK, M., 1984 - Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse Sci., Univ. Paris VI, 554 p.
- OLTMAN, R.E., 1966 - Reconnaissance investigation of the discharge and water quality of the Amazon. Paper presented at Asociacion de Biologia Tropical. Simposio nobre a Biota Amazonica, June 7, Belem, Para, Brazil, p. 1-20.
- ROCHE, M.A., 1975 - Geochemistry and Natural Ionic and Isotopic Tracing: Two Complementary Ways to Study the Salinity Regime of the Hydrological System of Lake Chad. Journal of Hydrology, 26 pp. 153-171, présenté Coll. Hydrochimie des eaux naturelles, Burlington (Canada), août 1975.
- ROCHE, M.A., 1967 - Premières estimations des apports en sels au lac Tchad par le Chari. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., V, 1, 1968, pp. 55-89.
- ROCHE, M.A., 1977 - Hydrodynamique et évaluation du risque de pollution dans un estuaire à marées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIV, n° 4, 36 p.
- ROCHE, M.A., 1978 - Etude hydrologique du Sinnamary à Petit-Saut et Saut Tigre en vue de l'implantation d'un barrage hydroélectrique. ORSTOM, 22 p.
- ROCHE, M.A., 1981 - Watershed Investigations for Development of Forest Resources of the Amazon Region in French Guayana. In Tropical Agricultural Hydrology. Ed. R. Lal and E.W. Russel. John Wiley and Son Ltd., pp. 75-82.
- ROCHE, M.A., 1982 - Evapotranspiration de la forêt amazonienne en Guyane. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XVI n° 1, pp. 37-44.
- ROCHE, M.A., 1982 - Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème tropical humide à Ecerex, en Guyane. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., pp. 81-114.
- ROCHE, M.A., 1984 - Programa Hidrológico y Climatológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia. Plaquette de présentation du PHICAB, 4 p.
- ROCHE, M.A., ROCHA, N., 1985 - Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4 000 000. PHICAB, 1 hoja offset.
- ROCHE, M.A., ABASTO, N., TOLEDE, M., CORDIER, J.P., POINTILLART, C., 1986 - Mapas de las salinidades ionicas de los ríos de la Cuenca Amazónica de Bolivia. PHICAB, 3 hojas offset.

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

SIOLI H., 1984 - The Amazon. Junk, 672 p.

STUMM, W., MORGAN. J.J., 1970 - Aquatic Chemistry. Wiley Interscience,
New York.

UNESCO, 1969 - Discharge of selected rivers of the world. Vol. I-III,
séries on studies and reports in Hydrology.

UNESCO, 1979 - World Register of Rivers discharging to the oceans. Divi-
sion of Water Sciences. Techn. Paper.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Salinités et exportations hydriques et ioniques moyennes pluriannuelles des sous-bassins du haut Madera.

Tableau 2 : Salinités et exportations hydriques et ioniques moyennes pluriannuelles des sous-bassins andins du haut Madera.

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 : Les stations hydrométriques (réseau PHICAB) et de prélèvements périodiques dans le bassin amazonien de Bolivie. 11: Angosto del Bala; 2 : Puerto Villarroel; 3 : Abapo; 4 : Puerto Ganadero; 5 : Puerto Almacen; 6 : Miraflores; 7 : Portachuelo; 8 : Caracoles; 9 : Cachula Esperanza; 10 : Puerto Siles; 11 : Campamento More, Vuelta Grande; 12 : Guayaramerin; 13, 14, 15 : Puerto Villa.
- Fig. 2 : Précipitations moyennes annuelles sur les bassins (réduction de la carte offset au 1/4000 000).
- Fig. 3 : Forme des hydrogrammes depuis le pied des Andes jusqu'à la formation du Rio Madera. Exemple du Rio Mamoré.
- Fig. 4 : Hydrogrammes comparés des Rios Beni, Madre de Dios et Orthon en 1984.
- Fig. 5 : Les exportations hydriques moyennes pluriannuelles des fleuves du haut bassin du Rio Madera.
- Fig. 6 : Evolution des concentrations ioniques spécifiques dans les fleuves du bassin amazonien de Bolivie.
- Fig. 7 a : Conductivités et débits journaliers du Rio Beni à Cachuela Esperanza, en 1985.
- Fig. 7 b : Conductivités et débits journaliers du Rio Mamoré à Guayaramerin, en 1985.
- Fig. 8 : Relation entre la conductivité et le débit moyen mensuel du Rio Madre de Dios à Miraflores.
- Fig. 9 : Les salinités hydriques moyennes pluriannuelles des fleuves du haut bassin du Rio Madera.

- Fig. 10 : Evolution de la salinité ionique globale des eaux d'amont en aval dans le bassin amazonien de Bolivie.
- Fig. 11 a : Profil d'évolution des salinités des eaux du Rio Beni, depuis la "source" andine jusqu'au Rio Madera.
- Fig. 11 b : Profil d'évolution des salinités des eaux du Rio Mamoré depuis la "source" andine jusqu'au Rio Madera.
- Fig. 12 : Carte des concentrations relatives en ions des eaux des fleuves de l'Amazonie bolivienne.

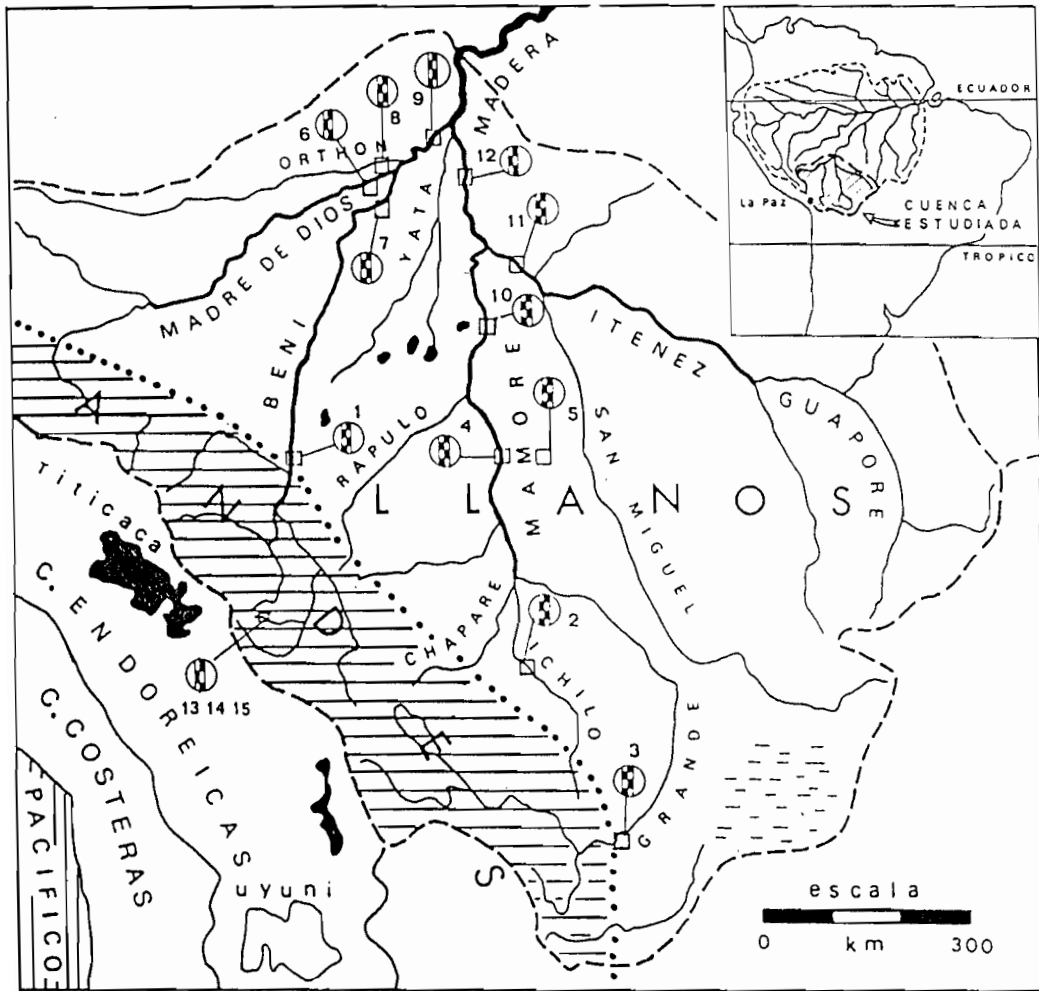


Fig.1

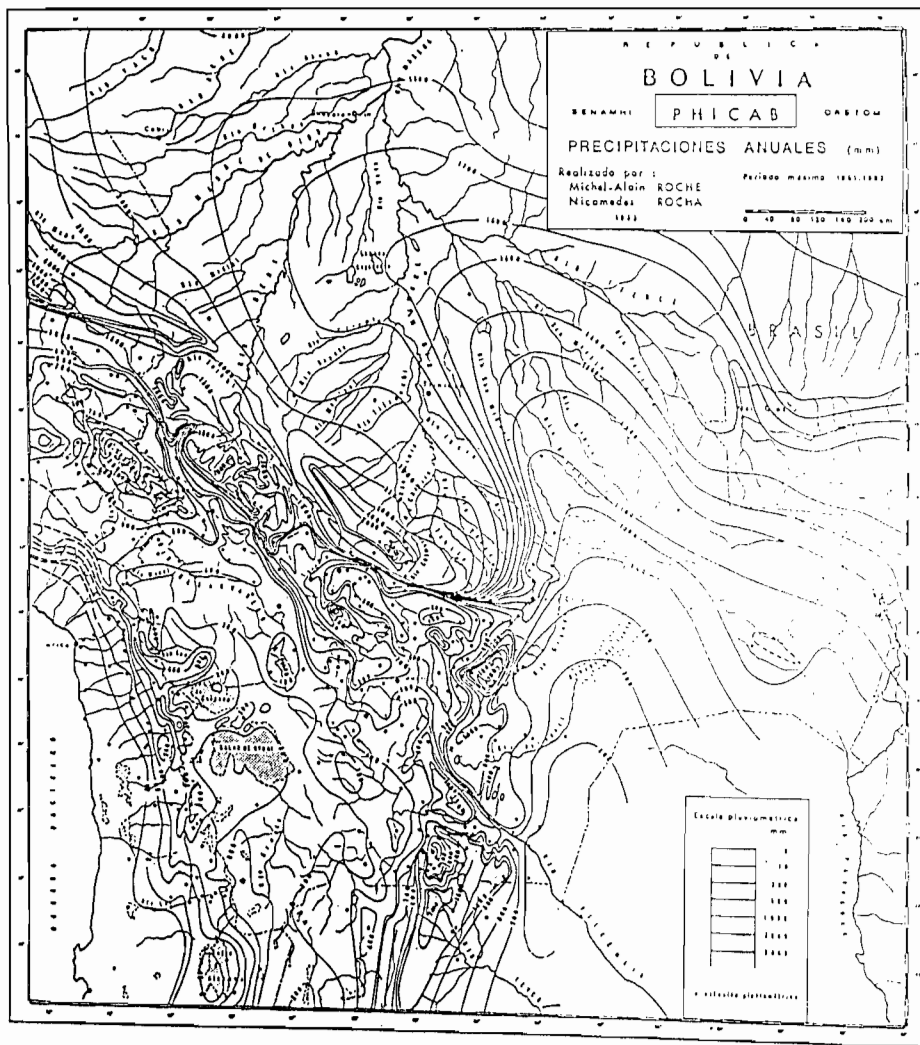


Fig. 2

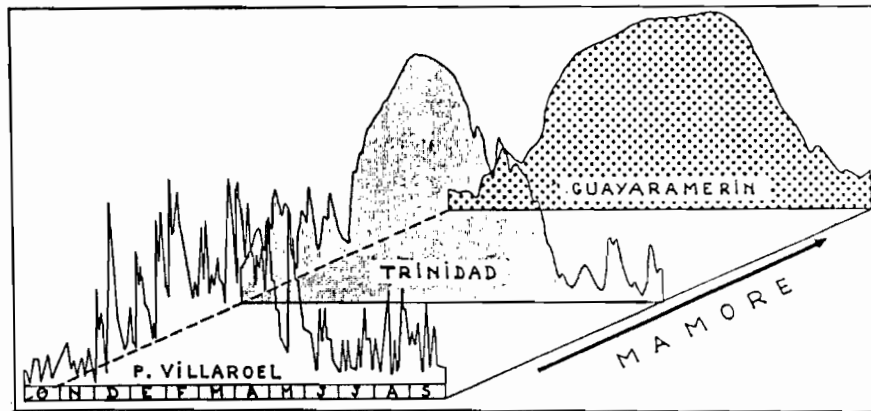


Fig. 3

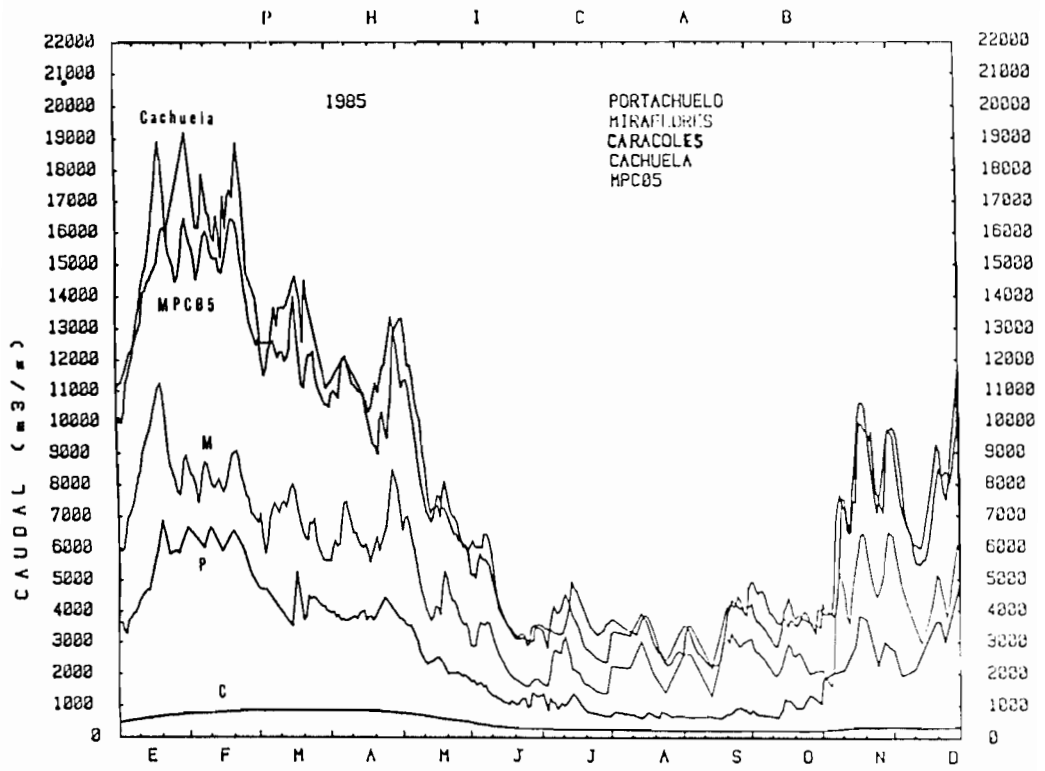


FIG. 4

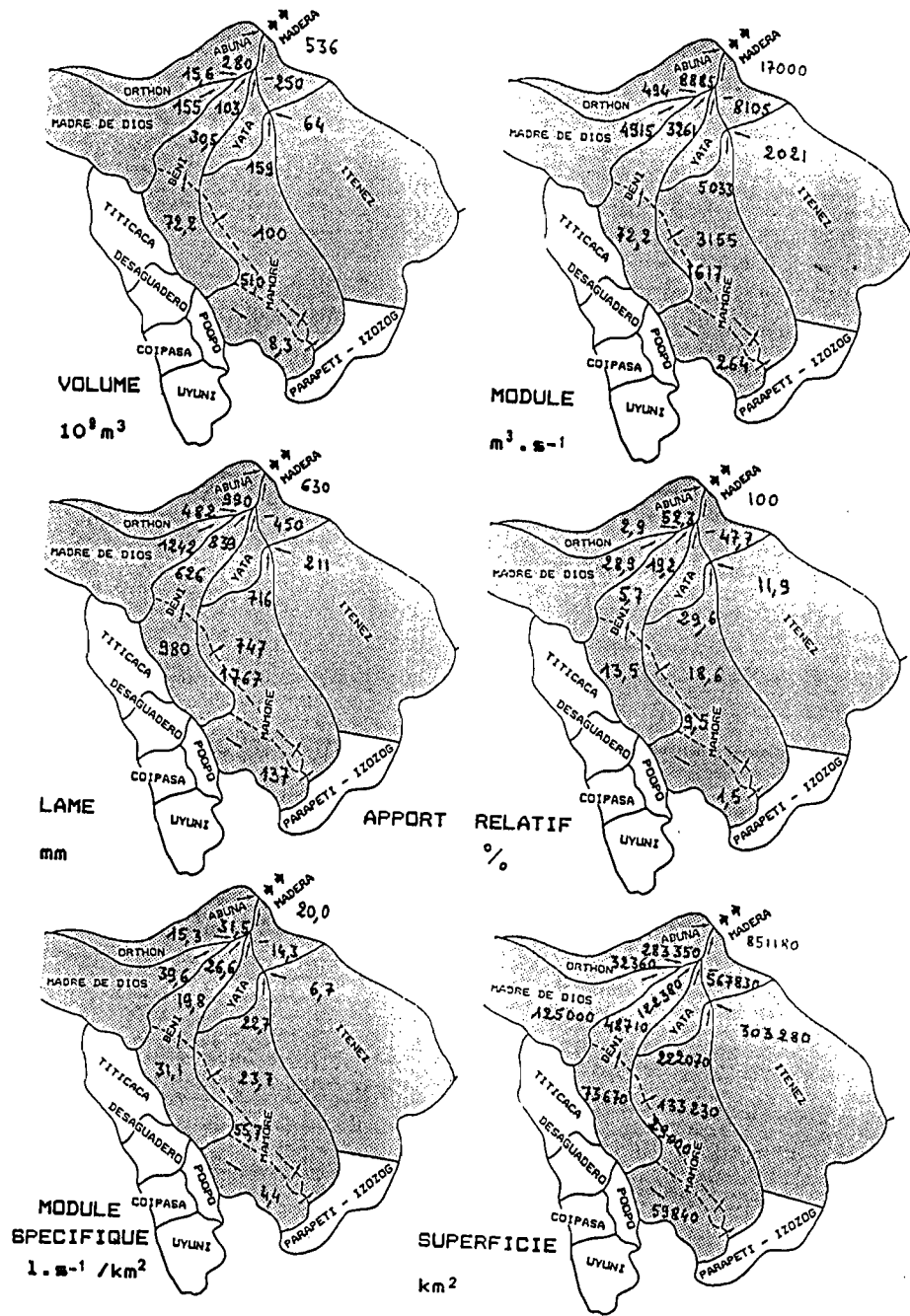


Fig. 5

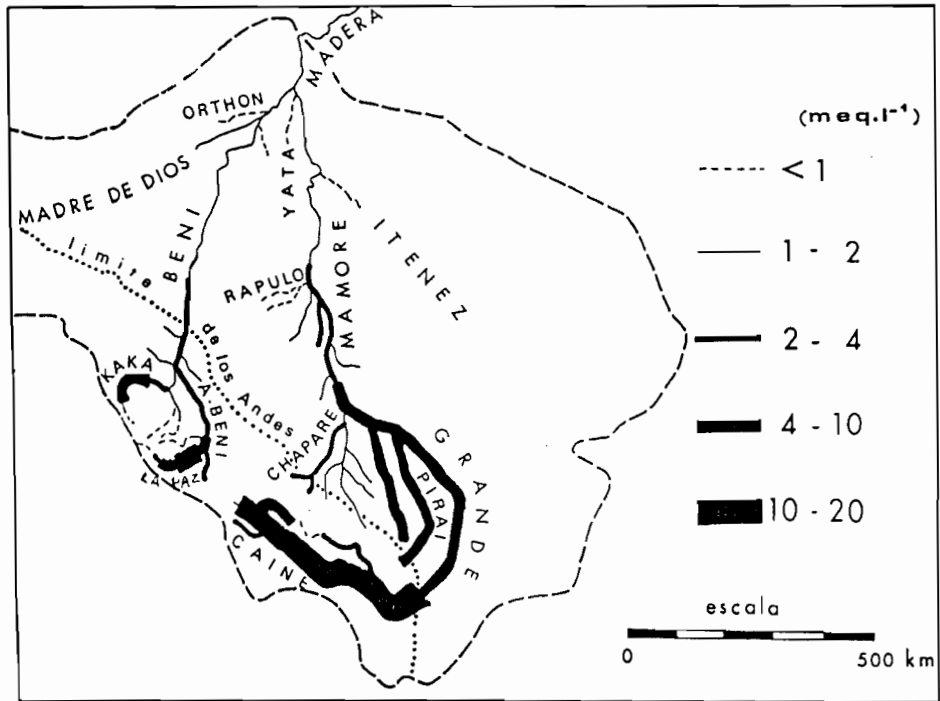


Fig. 6

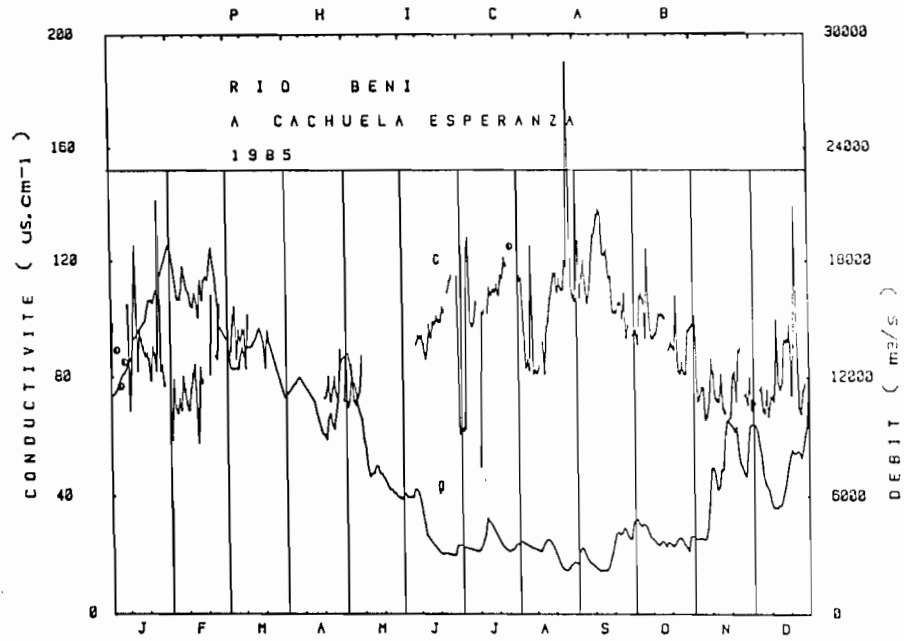


Fig. 7a

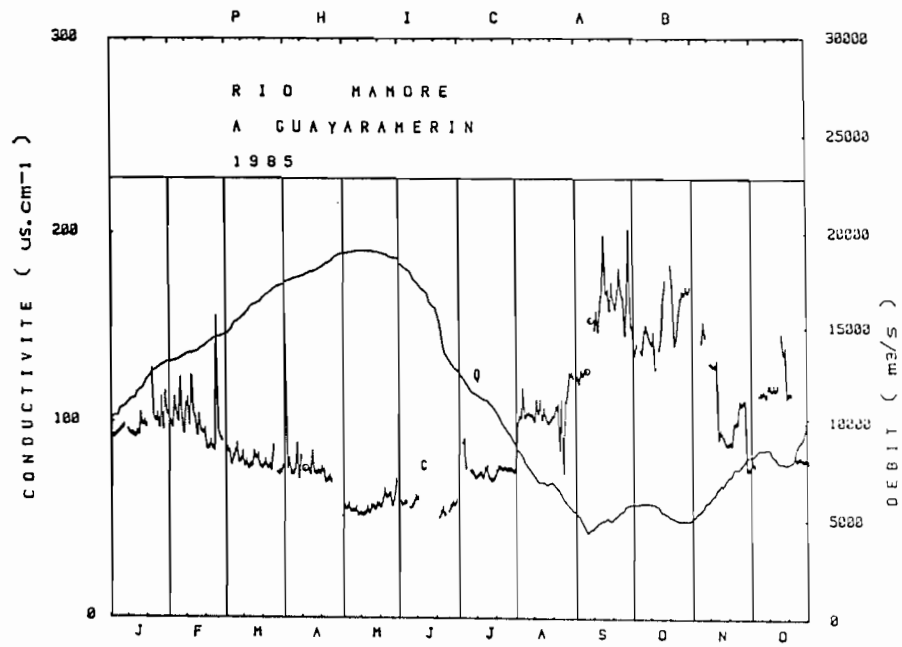


Fig. 7b

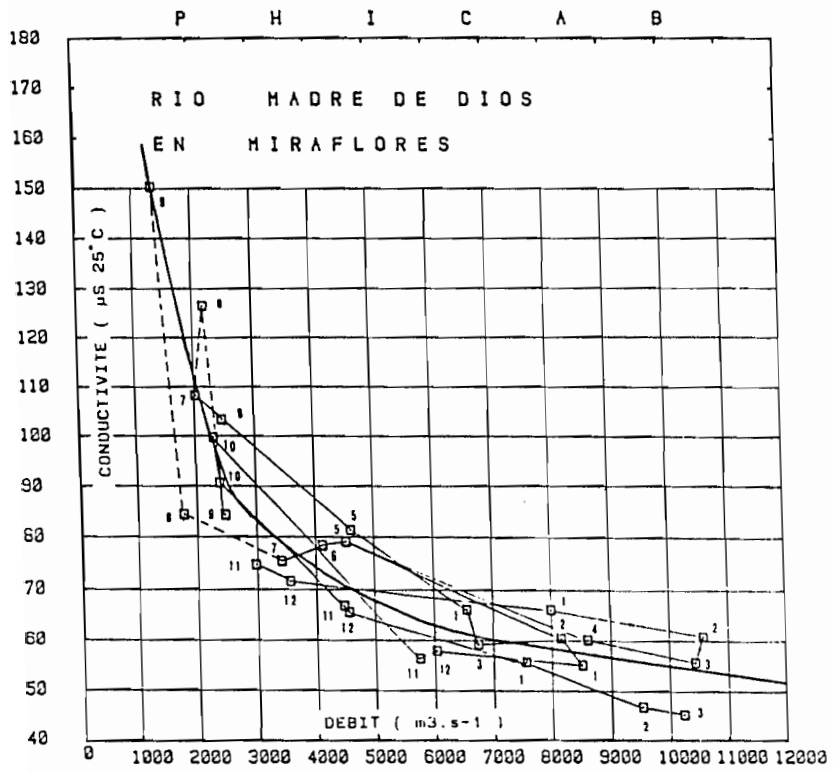


FIG. 8

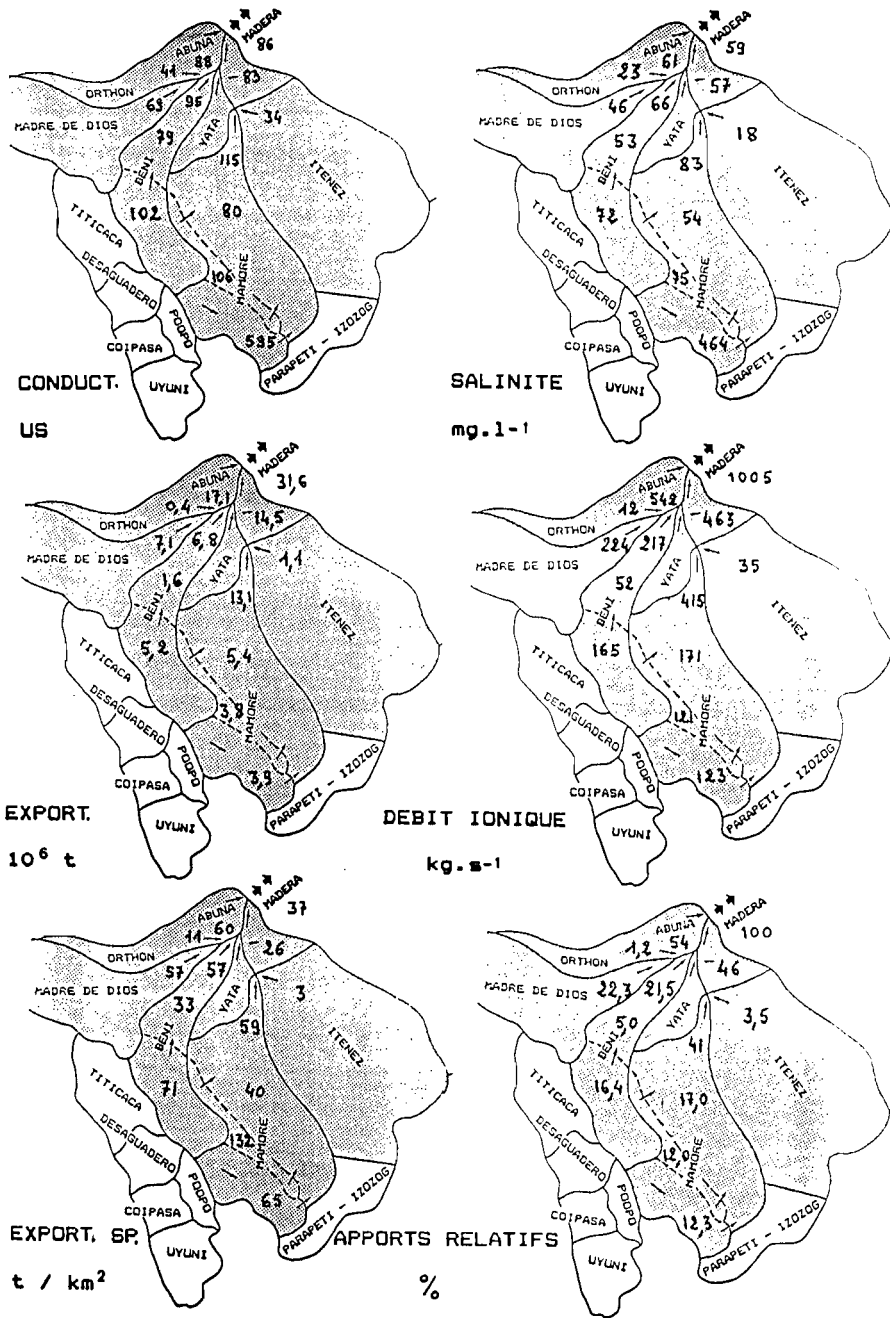


Fig . 9

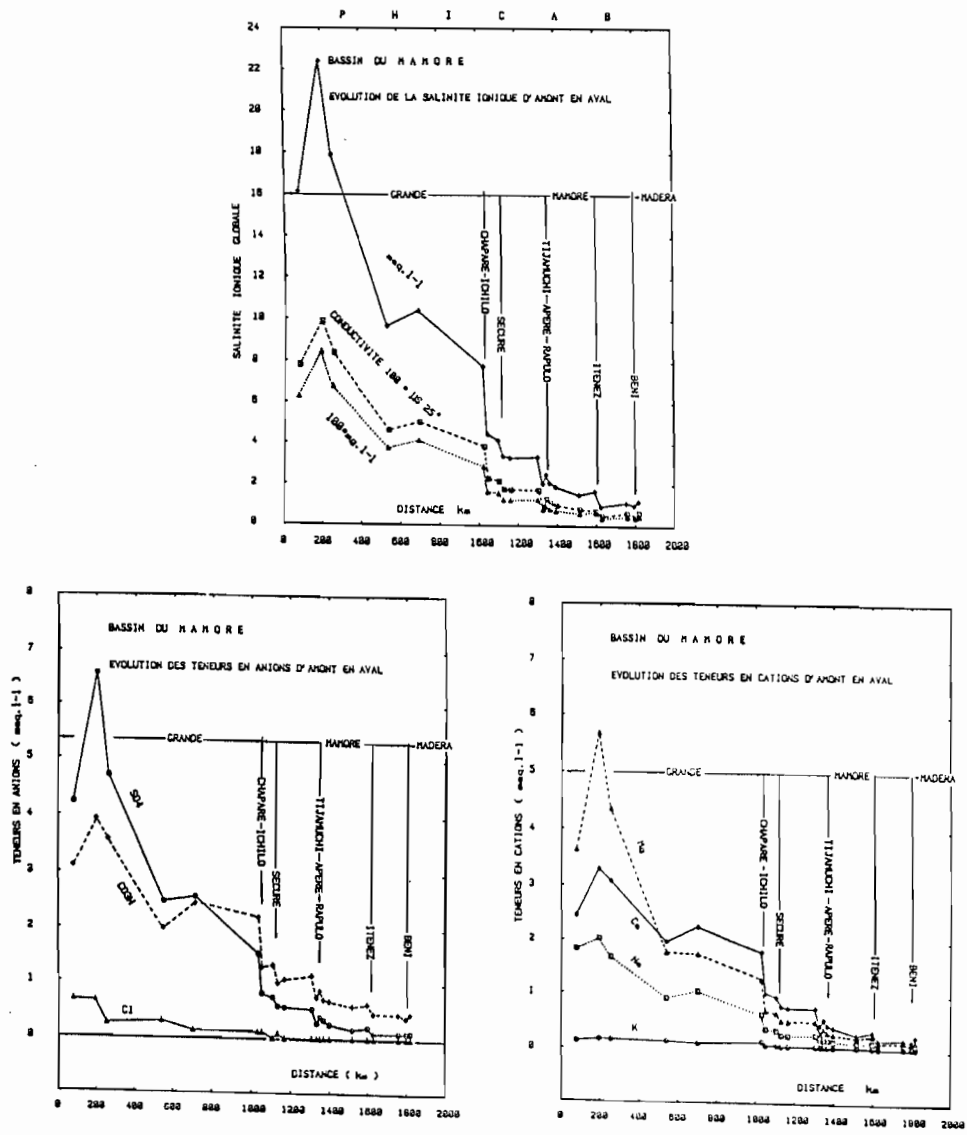


Fig. 11 b

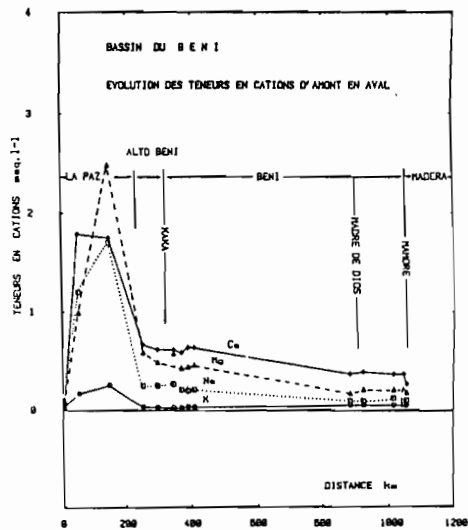
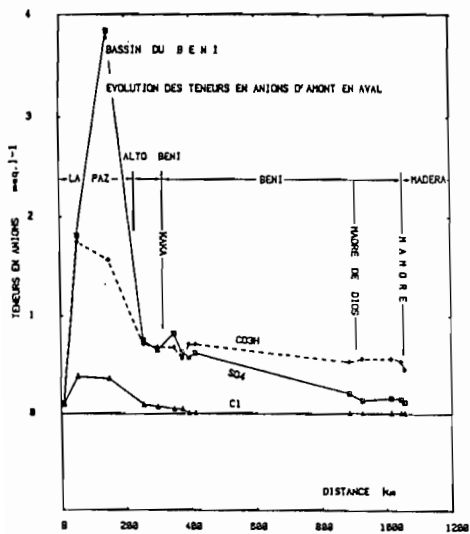
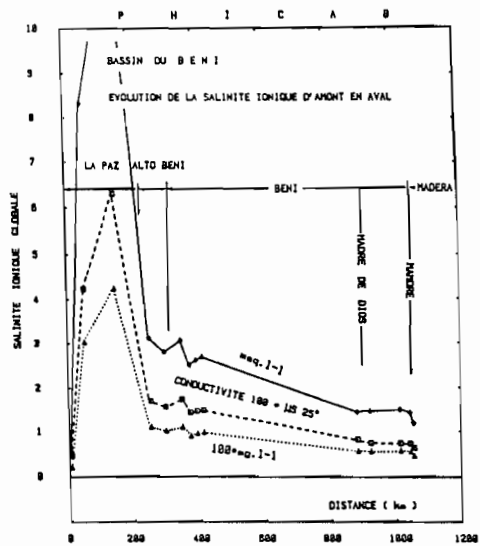


Fig. 11a

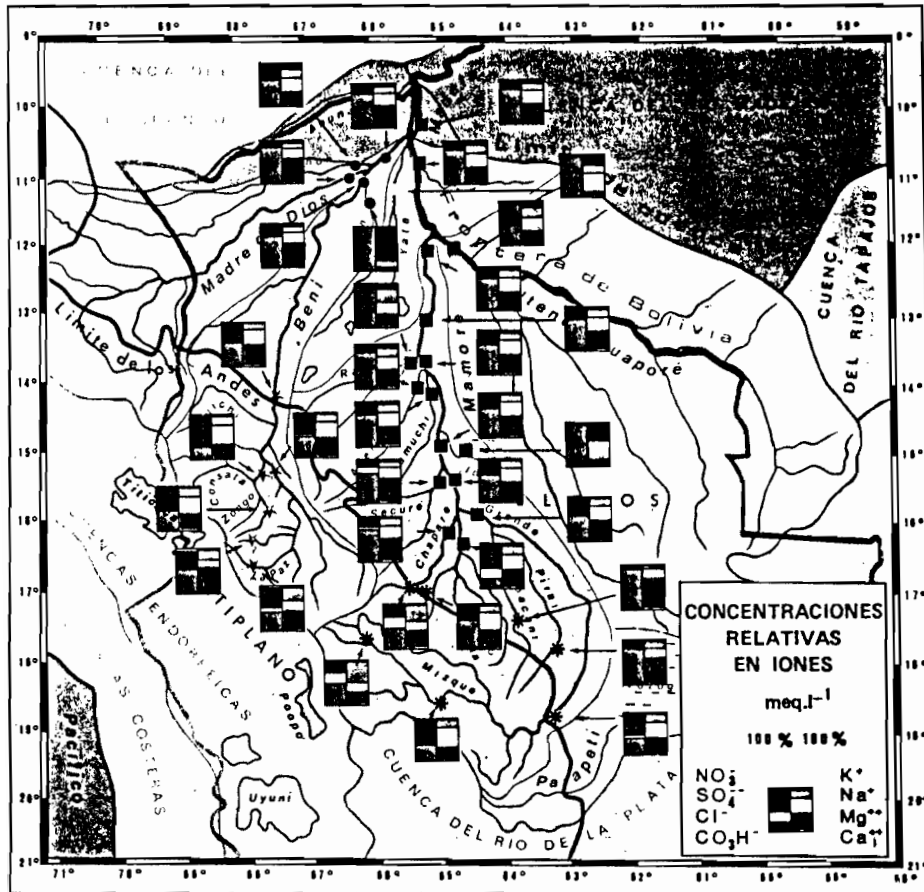


Fig. 12

P H I C A B

LISTE DE TRAVAUX

MARS 1987

- ABASTO N, HOORELBECKE R, ROCHE MA, et al (1985). Características y calibración de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM, 120 p.
- ABASTO N, HOORELBECKE R, ROCHE MA, RUBIN DE CELIS L (1985). Alturas de agua y caudales, limnigramas y hidrógramas de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM, 70 p.
- APOTEKER A, ROCHE MA, RUBIN DE CELIS L (1985). Programas informáticos para el procesamiento de datos de conductividad de agua, PHICAB. Goupil 3 Flex 9 Basic 8" ploter. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM, 21p.
- ESPINOZA OF (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Beni. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IHH Tesis UMSA, 181 p.
- GARCIA WA (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Mamoré. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IHH Tesis UMSA, 110 p.
- GOUZE PH, FERHI A, FONTES J-CH, ROCHE MA, (1987). Composition isotopique (180) de la matière organique des tourbières actuelles et holocènes en Bolivie. Résultats préliminaires et perspectives d'application en paléoclimatologie. Séminaire "Paléolacs-Paléoclimats", ORSTOM, Bondy, 29-30, janvier 1987.
- GUZMAN WD, ROCHE MA (1985). Programas de análisis pluviométricos (consistencia de datos mensuales para 50 estaciones, hietógramas mensuales de series de 30 años, análisis mensuales de la estación seca y húmeda para series mensuales de 30 años). Flex 9 BASIC GOUPIL 8" ploter. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IHH, 24 p.
- HERBAS C (1987). Climatología de la cuenca andina y amazónica del Río Grande, Bolivia. PHICAB: IHH-CONAPHI-ORSTOM, 240 p.
- LOZADA GA (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Lago Titicaca. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IHH. Tesis UMSA, 158 p.
- MARIACA JJ (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Lago Poopo y los salares de Uyuni y Coipasa-Bolivia. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IHH. Tesis UMSA 203 p.
- ROCHE MA (1982). Les conditions d'une étude hydrologique en Amazonie Bolivienne. PHICAB: ORSTOM, 31 p.

- ROCHE MA, CANEDOM(1984). Programa Hidrológico y Climatológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia. Plaquette de présentation du PHICAB: SENAMHI-ORSTOM, Folleto 4 p.
- ROCHE MA, ROCHA N (1985). Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4 000 000. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM, 1 hoja offset.
- ROCHE MA, ABASTO N, TOLEDE M, CORDIER JP, POINTILLART C (1986). Mapa de las salinidades iónicas de los ríos de la Cuenca Amazónica de Bolivia. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-LHM, 1 hoja offset.
- ROCHE MA, ABASTO N, TOLEDE M, CORDIER JP, POINTILLART C (1986). Mapa de las concentraciones en aniones de los ríos de la Cuenca Amazónica de Bolivia. PHICAB: ORSTOM-SENAMHI- LHM, 1 hoja offset.
- ROCHE MA, ABASTO N, TOLEDE M, CORDIER JP, POINTILLART C (1986). Mapa de las concentraciones en cationes de los ríos de la Cuenca Amazónica de Bolivia. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-LHM, 1 hoja offset.
- ROCHE MA, FERNANDEZ C, APOTEKER A, ABASTO N, CALLE H, TOLEDE M, CORDIER J.P., POINTILLART C (1986). Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IHH-LHM, 257 p.
- ROCHE MA, FERNANDEZ C, RONCHAIL J, BOURGES J, GUYOT JL (1986). Participación del PHICAB al simposio de la investigación francesa en Bolivia. PHICAB: IHH-ORSTOM-SENAMHI-IFEA-AASANA-IBTEN, 35 p.
- ROCHE MA, FERNANDEZ C (1987). Ressources hydriques, salinités et exportations salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. PHICAB: IHH-CONAPHI-ORSTOM, 30 p.
- RONCHAIL J (1985). Situations météorologiques et variations climatologiques en Bolivie (Situations météorologiques - Analyses de séries climatiques - Inventaire de saisons exceptionnelles). PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IFEA-AASANA, 60 p.
- RONCHAIL J (1985). Relations de saisons remarquables avec la structure de l'atmosphère et les situations météorologiques sur l'Altiplano péruano-bolivien. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IFEA-AASANA, 38 p.
- RONCHAIL J (1986). Variations climatiques hivernales à Santa Cruz de la Sierra. Amazonie bolivienne. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IFEA-AASANA. Communication au Symposium Ecologique-Impacto del Desarrollo en la Ecología del Trópico Boliviano, Santa Cruz 1986, 16 p.
- RONCHAIL J (1986). Situations atmosphériques et précipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie - Bolivie. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IFEA-AASANA, 36 p.
- RONCHAIL J (1986). Situations atmosphériques et températures comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie - Bolivie. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM-IFEA-AASANA
- RUBIN DE CELIS L, ROCHE MA (1985). Programas informáticos para el procesamiento de datos hidrométricos básicos PHICABHQ. Goupil3 Flex9 BASIC 8" ploter. PHICAB: SENAMHI-ORSTOM, 58 p.