

Hydrologie du bassin amazonien

**Rio Zongo à Islani
(1 500 m) en période
de crue. Bassin du Rio
Alto-Beni, Bolivie.**

L'Amazone, le géant des fleuves de la planète, possède des conditions hydrauliques particulières. Bien que des hydrologues du monde entier s'y soient intéressés depuis plus d'un siècle, ce n'est qu'à partir des années 60 que des mesures de débit, d'ailleurs localisées au seul cours principal Solimões-Amazone, ont été effectuées sur le fleuve et ses affluents. Pour combler cette lacune, l'Orstom et ses partenaires boliviens et brésiliens ont engagé, au début des années 80, deux grands programmes hydrologiques sur le bassin amazonien, l'un en Bolivie, l'autre au Brésil.



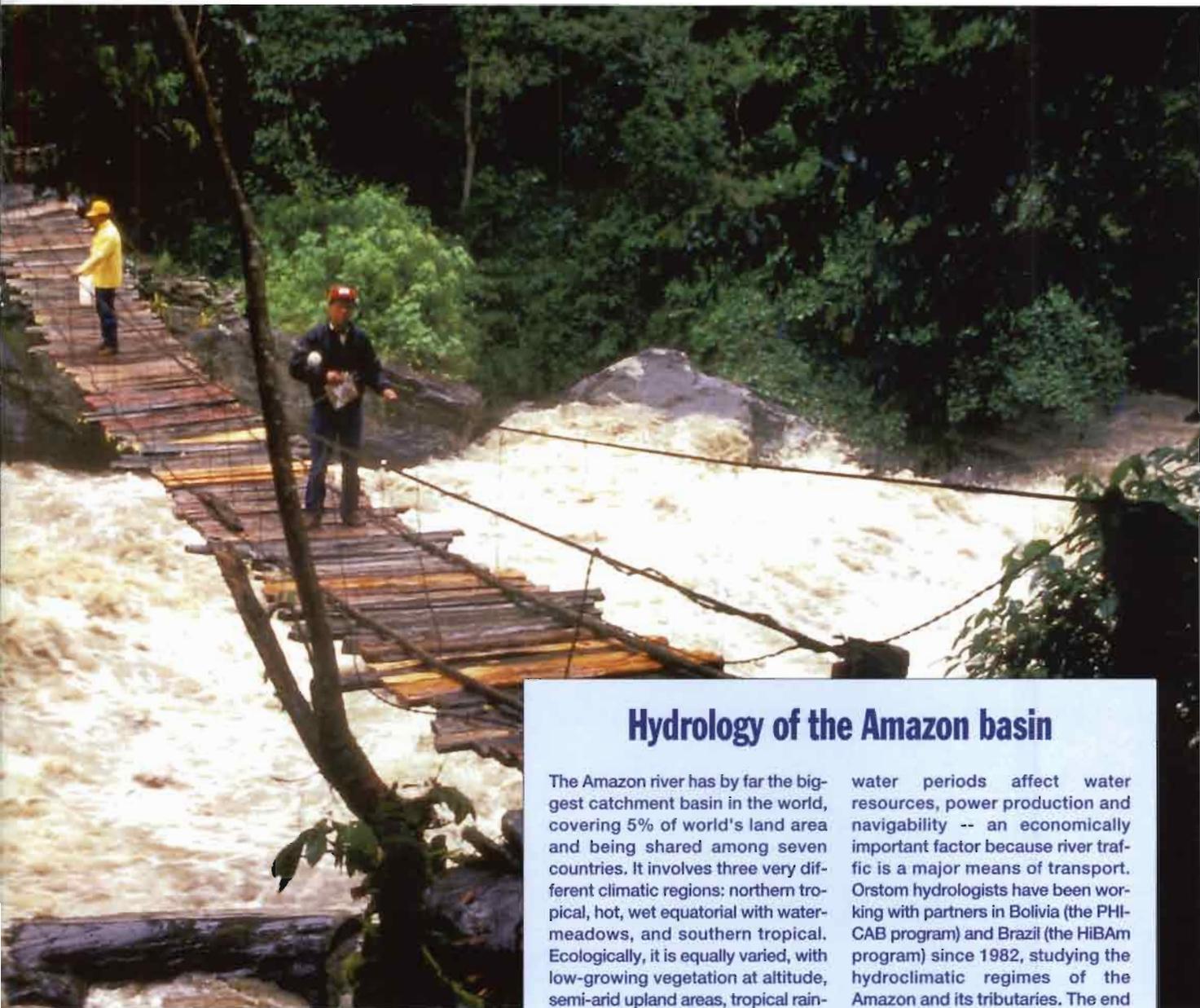
**Inondation à Manaus,
Brésil.**

**Cascade dans la vallée
du rio Coroico, Bassin
du Rio Beni,
Andes de Bolivie.**



Les objectifs des programmes PHICAB¹ en Bolivie et HiBAM² au Brésil, sont multiples (hydrométrie, climatologie, hydrologie, géochimie, érosion), mais se déclinent pour l'hydrologie de la même manière dans les deux pays : étude des régimes hydrologiques et calcul du bilan hydrique par sous-bassins.

Le calcul du bilan hydrique n'est réalisable que si la variabilité dans le temps, saisonnière et interannuelle, de la pluie et des débits est connue. La connaissance des termes du bilan hydrique (pluie, débit, évapotranspiration), calculé sur une assez longue période, permet de distinguer des régions homogènes, présentant le même régime, dans lesquelles le débit d'un cours d'eau pourra être prévu avec une bonne précision. Cette prévision des débits est fondamentale pour une bonne gestion des risques (inondations) et des ressources hydriques (navigation, production hydroélectrique).



LE BASSIN DE L'AMAZONE

Avec une superficie de 6,1 millions de km², le bassin de l'Amazone s'étend sur 7 pays (Brésil : 63%, Pérou : 16%, Bolivie : 12%, Colombie : 5,7%, Équateur : 2,4%, Venezuela : 0,7% et Guyana : 0,2%). C'est, de loin, le plus important bassin hydrographique de la planète, avec près de 5% des terres émergées. Les principaux cours d'eau formateurs de l'Amazone drainent des régions très contrastées, réparties de part et d'autre de l'Équateur (carte page 24).

Au Nord, les affluents du rio Negro sont issus des massifs du bouclier guyanais où culmine le " Pico da Neblina " (3014 m), le plus haut sommet du Brésil.

Hydrology of the Amazon basin

The Amazon river has by far the biggest catchment basin in the world, covering 5% of world's land area and being shared among seven countries. It involves three very different climatic regions: northern tropical, hot, wet equatorial with water-meadows, and southern tropical. Ecologically, it is equally varied, with low-growing vegetation at altitude, semi-arid upland areas, tropical rain-forest and moist savanna. Its main affluents, the Rio Negro and Rio Madeira, differ widely in their hydrological regimes, and physical and chemical characteristics.

Where it enters Brazil, 3000 km from the sea, the Amazon river already has a discharge of 46,500 m³/s -- about the same as the Congo, its closest rival, at its mouth! But at this stage the Amazon is only 180 feet above sea level, so that its gradient for the remaining 3000 km is a mere 2 cm per km. As a result, the impact of the tides is felt 700 km upstream from the river mouth and affects many tributaries. This, and the sharp seasonal and spatial variations in rainfall, make for major fluctuations in flow rate and water level.

These variations cause problems in both human and economic terms. Floods cause damage in towns and limit agricultural potential; very low

water periods affect water resources, power production and navigability -- an economically important factor because river traffic is a major means of transport. Orstom hydrologists have been working with partners in Bolivia (the PHICAB program) and Brazil (the HiBAm program) since 1982, studying the hydroclimatic regimes of the Amazon and its tributaries. The end purpose is to be able to forecast water levels and flow rates, with a view to sustainable water resource management and hazard control. Among other achievements, they have set up hundreds of rain-gauges and hydrometric stations, have improved methods of data collection and processing and established a system of data transmission by satellite. The results so far are a much better understanding of the river basin's water regime, with reliable data on the volume and fluctuations of discharge in the Amazon and its tributaries and total discharge to Atlantic, a region-by-region breakdown of flow rates in the different rivers, and a model for forecasting high water at Manaus. This model can now easily be applied to other flood-prone towns of the Amazon, and to the region as a whole.

¹ PHICAB : Programme Hydrologique et Climatologique du Bassin Amazonien de Bolivie

² HiBAm : Programme Hydrologique du Bassin Amazonien du Brésil



Vallée du Rio La Paz à La Plazuela (800 m). Bassin du Rio Alto-Beni, Bolivie.

La ville de Sorata (2 500 m) et la vallée du Rio San Cristobal, au pied de l'illampu (6 420 m). Bassin du Rio Alto-Beni, Bolivie.



Cette région est caractérisée par un climat tropical boréal à alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies (de mai à juillet).

Entre l'Équateur et 4 degrés de latitude Sud, au Brésil, le cours principal de l'Amazone (rio Solimões puis Amazonas), issu des Andes du Pérou et d'Equateur (rios Marañón, Ucayali et Napo), étale ses méandres dans une région soumise à un climat équatorial chaud et humide, domaine des prairies inondables³. Sur ce tronçon, l'Amazone reçoit de nombreux affluents méridionaux dont le rio Madeira qui prend sa source dans les Andes de Bolivie, et plus en aval les rios Tapajós et Xingu en provenance du bouclier brésilien.

³ Voir article " Les prairies aquatiques de l'Amazonie brésilienne " Orstom actualités n°49.

⁴ Voir article "Les glaciers tropicaux andins" Orstom actualités n°50.

Le bassin du rio Madeira, soumis à un régime tropical austral caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et une saison des pluies (de décembre à mars), est l'un des sous-bassins les plus contrastés de l'Amazone.

A l'amont, les rivières andines drainent des régions montagneuses, aux sommets couverts de glaciers⁴ et à végétation rase d'altitude, qui passe progressivement à la forêt tropicale humide de piedmont puis à la savane humide, alors que certaines régions andines australes sont soumises à un climat semi-aride.

Sigles

CNPq : Conseil National de Développement Scientifique et Technologique du Brésil.

DNAEE : Département National des Eaux et de l'Energie Electrique du Brésil.

HiBAm : Programme Hydrologique du Bassin Amazonien du Brésil.

PHICAB : Programme

Hydrologique et Climatologique du Bassin Amazonien de Bolivie.

SENAMHI : Service National de Météorologie et Hydrologie de Bolivie.

UMSA : Universidad Major de San Andrés, La Paz, Bolivie.

USGS : United States Geological Survey - USA

LE RÉGIME HYDROLOGIQUE DE L'AMAZONE

L'Amazone est un fleuve singulier. Lorsqu'il entre au Brésil, à Tabatinga, il lui reste encore près de 3 000 km à parcourir ; son débit est déjà de 46 500 m³/s, c'est-à-dire l'équivalent de celui du Congo, le deuxième fleuve du monde à son embouchure. Sur cette distance, la dénivelée totale, avant de rencontrer les eaux de l'Atlantique, n'est que de 60 mètres. La très faible déclivité du cours d'eau (environ 2 cm/km), confère à l'hydrologie de l'Amazone des caractéristiques propres : les eaux ne s'écoulent pas d'amont en aval mais sont poussées par l'onde de crue.



Photo: Jean Louis Guyot

Pour en savoir plus

Bourges J., Hoorelbecke R., Cortez J., Carrasco L.M. 1993. Los regimenes hidrológicos de la cuenca amazónica de Bolivia, 125-134. *In* Seminario sobre el PHICAB, La Paz, Nov. 1992.

Callède J., Claudino L.J., Fonseca V. 1986. Transmission par satellite des hauteurs d'eau de l'Amazone et de ses affluents. *Hydrologie Continentale*, 1(2) : 95-110.

Cappelaere B., Lubes H., Guyot J.L., Berkhoff C., Thepaut H., Molinier M., Oliveira E. 1996. Prévission des crues de l'Amazone. *In* L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement, Paris, Mai 1995. IAHS

Publication n°238 . pp 355-366.

Guimarães V., Cudo K.J., Callède J. 1995. Os avanços da gestão da rede hidrométrica Brasileira através da telemetria por satélite. *A Água em Revista*, 3(4) : 21-25. CPRM, Rio de Janeiro.

Guyot J.L., da Conceição S., Guimarães V., dos Santos J.B., Longuinhos R. 1995. Medição de vazão com ADCP - Primeiros resultados na bacia Amazônica. *A Água em Revista*, 3(4) : 26-30. CPRM, Rio de Janeiro.

Hiez G., Cochonneau G., Séchet P., Fernandes U.M. 1992. Application de la méthode du vecteur régional à l'analyse de la

pluviométrie annuelle du bassin amazonien. *Veille Climatique Satellitaire*, 43 : 39-52.

Jaccon G. 1987. Jaugeage de l'Amazone à Obidos par les méthodes du bateau mobile et des grands fleuves. *Hydrologie Continentale*, 2(2) : 117-126.

Meade R.H., Rayol J.M., da Conceição S.C., Natividade J.R.G. 1991. Backwater effects in the Amazon river basin of Brazil. *Environ. Geol. Water Sci.*, 18(2) : 105-114.

Molinier M., Guyot J.L., Oliveira de E., Guimarães V. 1996. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. *In* L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développe-

ment, Paris, Mai 1995. IAHS Publication n°238. pp 209-222

Oliveira E., Guimarães V., Molinier M., Guyot J.L. 1995. Pesquisa aplicada ao gerenciamento de recursos hídricos na região amazônica, 2-19. *In* Primeiro Seminário de avaliação e perspectivas da Cooperação CNPq/ORSTOM, Brasília, Maio de 1995.

Roche M.A., Fernandez C., Aliaga A., Peña J., Salas E., Montaña J.L. 1992. Balance hídrico superficial de Bolivia. *Publ. PHICAB, La Paz*, 29 p.

Sioli H. 1984. The Amazon. *Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. Monographiae Biologicae, 56. Dr. W. Junk Publ., Dordrecht, 763 p.

Tournée hydrologique en voiture. Bassin du Rio Mamoré, Bolivie.

.....

Positionnement du bateau hydrométrique dans la section de jaugeage à l'aide de théodolites pour la méthode des "grands fleuves". Station de Obidos, Amazone, Brésil.



Photo: Jean Louis Guyot

Bateau hydrométrique
" Evandro III " du
DNAEE sur l'Amazone,
Brésil.



Photo : Jean-Louis Dauvin

Mélange des eaux.
Amazone à l'aval de
la confluence des rios
Solimões et Negro,
Brésil.



Photo : Jean-Louis Dauvin

Hidrología de la cuenca amazónica

El río Amazonas representa, por mucho, la mayor cuenca colectora del mundo, abarcando 5% de tierras emergentes. Comprende siete países y tres regiones climáticas muy distintas: tropical al norte, caliente y húmeda hacia el Ecuador con praderas inundables, y tropical austral. Su ecosistema es variado, con vegetación de lento crecimiento en altitud, áreas semiáridas en tierras altas, bosque tropical con lluvias todo el año y sabana húmeda. Sus principales afluentes, el Río Negro y el Madeira, difieren enormemente en su régimen hidrológico y en sus características físicas y químicas.

Al entrar en Brasil, a 3 000 Km del mar, el Amazonas ya lleva una descarga de 46, 500 m³/s (similar a la de la desembocadura del Congo, su rival más cercano). No obstante, en esta fase, el río se encuentra a sólo 60 m. del nivel del mar, por lo que la pendiente de los 3 km restantes apenas es de 2 cm/Km. Como consecuencia, el impacto del torrente se siente a 700 km río arriba desde la desembocadura del Amazonas, afectando a muchos tributarios.

Esto, aunado a los severos temporales y a las variaciones espaciales de las lluvias, provoca importantes fluctuaciones en el nivel de las aguas, con repercusiones en términos humanos y económicos : las inundaciones causan daños

a las poblaciones y limitan el potencial agrícola, mientras que, durante los periodos en que se registra un nivel bajo de agua, se ven afectados los recursos hídricos, la producción y la navegación (factor relevante de la economía pues el río es un valioso medio de transporte). Desde 1982, los hidrólogos de Orstom junto con sus homólogos bolivianos (del programa PHICAB) estudian los regímenes hidroclimáticos del Amazonas y sus tributarios. Su objetivo es prever el nivel de las aguas y los caudales a fin de administrar de manera sostenible los recursos hídricos y controlar los riesgos. Entre otras cosas, se han instalado cientos de estaciones hidrométricas y pluviométricas, un sistema de transmisión de datos por satélite y se han perfeccionado métodos de recopilación y procesamiento de datos. Hasta ahora, el logro es un mejor conocimiento del régimen hídrico de la cuenca del río y la obtención de información confiable sobre el volumen y las fluctuaciones de descarga en el Amazonas y sus tributarios y sobre su descarga total en el Atlántico, un análisis por regiones de los caudales en los distintos ríos y un modelo de previsión de crecientes en Manaus, aplicable desde ahora a otras poblaciones del Amazonas que padecen inundaciones, así como a la región en su conjunto.

Aussi, la variation des niveaux d'eau à une station n'est-elle pas liée de manière simple aux débits mesurés à cette station. De même, les affluents sont largement influencés par la variation des hauteurs d'eau de l'Amazone, comme le rio Negro à Manaus, où le niveau varie de plus de 15 mètres au cours du cycle hydrologique, indépendamment du débit. Par ailleurs, l'influence de la marée océanique est enregistrée jusqu'à Óbidos, soit 700 km à l'amont de l'estuaire.

Après avoir parcouru 1 500 km en territoire brésilien et reçu de nombreux affluents tel le rio Japurá (19 300 m³/s), l'Amazone va recevoir, en moins de 150 km deux contributions majeures, le rio Negro (28 400 m³/s), en rive gauche, et le rio Madeira (31 200 m³/s), en rive droite. Ces deux affluents, aux régimes et caractéristiques biogéochimiques différents, figurent parmi les fleuves les plus puissants du monde.

Le rio Negro, dont la pointe de crue arrive en juin-juillet, apporte des " eaux noires ", acides, riches en matières organiques, et à faible teneur en matières minérales, tant dissoutes que particulières.

(Suite page 23)



En revanche, les tributaires andins, aux "eaux blanches", fortement chargées en matières en suspension arrachées à la chaîne andine, présentent leur maximum hydrologique en janvier-février dans les Andes, puis en mars-avril au niveau de l'Amazone. La même période de maximum hydrologique est observée sur les cours d'eau issus du bouclier brésilien (rios Tapajós et Xingu) qui apportent à l'Amazone des "eaux claires", aux faibles teneurs en matières en suspension. Les apports combinés de ces différents tributaires, associés aux temps de transfert dans la plaine amazonienne, génèrent vers l'aval un hydrogramme de l'Amazone à crue unique et étalée d'avril à juillet. Les apports de l'Amazone à l'Atlantique sont estimés à 209 000 m³/s, soit environ 15% des apports mondiaux en eau douce aux océans.

A Óbidos, la station de jaugeage située la plus en aval, la section de mesure présente une largeur de 2 500 m, une profondeur de 70 m, et une vitesse moyenne de 2 m/s en crue. Des techniques de jaugeage des "grands fleuves" ont dû être spécialement développées, avant que l'utilisation d'un courantomètre à effet Doppler (ADCP, encadré ci-dessous) ne vienne révolutionner ce type de mesure. En juin 1994, le record du monde des jaugeages a été enregistré avec un débit de 279 000 m³/s.

LES PROGRAMMES DE RECHERCHE EN BOLIVIE ET AU BRÉSIL

Depuis 1982, les hydrologues de l'Orstom sont présents dans le bassin amazonien, tant en Bolivie qu'au Brésil (programmes PHICAB et HiBAM) avec un objectif commun : l'étude des régimes hydroclimatiques des fleuves amazoniens. Mais, à cette époque, au regard de ce type de projets, la situation dans les deux pays était assez différente.

En Bolivie, le réseau d'observation du Service National de Météorologie et Hydrologie (SENAMHI) était essentiellement localisé dans les Andes. Il n'existait pas de station hydrométrique en plaine amazonienne. Le programme PHICAB a donc dû installer et gérer un réseau d'une quinzaine de stations hydrométriques, depuis le piedmont andin jusqu'à la frontière brésilienne, soit un bassin de 740 000 km² (1.4 fois la France) dans un pays aux voies de communication rudimentaires et impraticables en saison des pluies. Le réseau du PHICAB a fonctionné de 1983 à 1990. La Bolivie a ainsi été le premier pays à terminer et publier l'étude du bilan hydrique de son bassin amazonien. A l'issue du programme PHICAB, un réseau hydrométrique minimum a été maintenu en Amazonie bolivienne, grâce à la collaboration de l'Orstom. Ce réseau est aujourd'hui associé à celui du programme HiBAM au Brésil pour l'étude des régimes hydrologiques, des Andes à l'Océan Atlantique.

Le Département National des Eaux et de l'Energie Electrique du Brésil (DNAEE) a fait un effort considérable au début des années 70 en installant dans le bassin amazonien de ce pays (3 900 000 km², soit 7,2 fois la France) près de 200 stations hydrométriques et plus de 400 stations pluviométriques. Avant la mise en place du programme HiBAM, les données hydroclimatiques étaient donc déjà nombreuses, mais leur qualité très variable exigeait qu'elles soient analysées et critiquées.

Jaugeage du rio Beni à Augusto del Bala - Amazonie bolivienne.



Plateforme de télétransmission satellitaire de données hydrologiques. Station de Arumá Jusante, Rio Purus, Brésil.

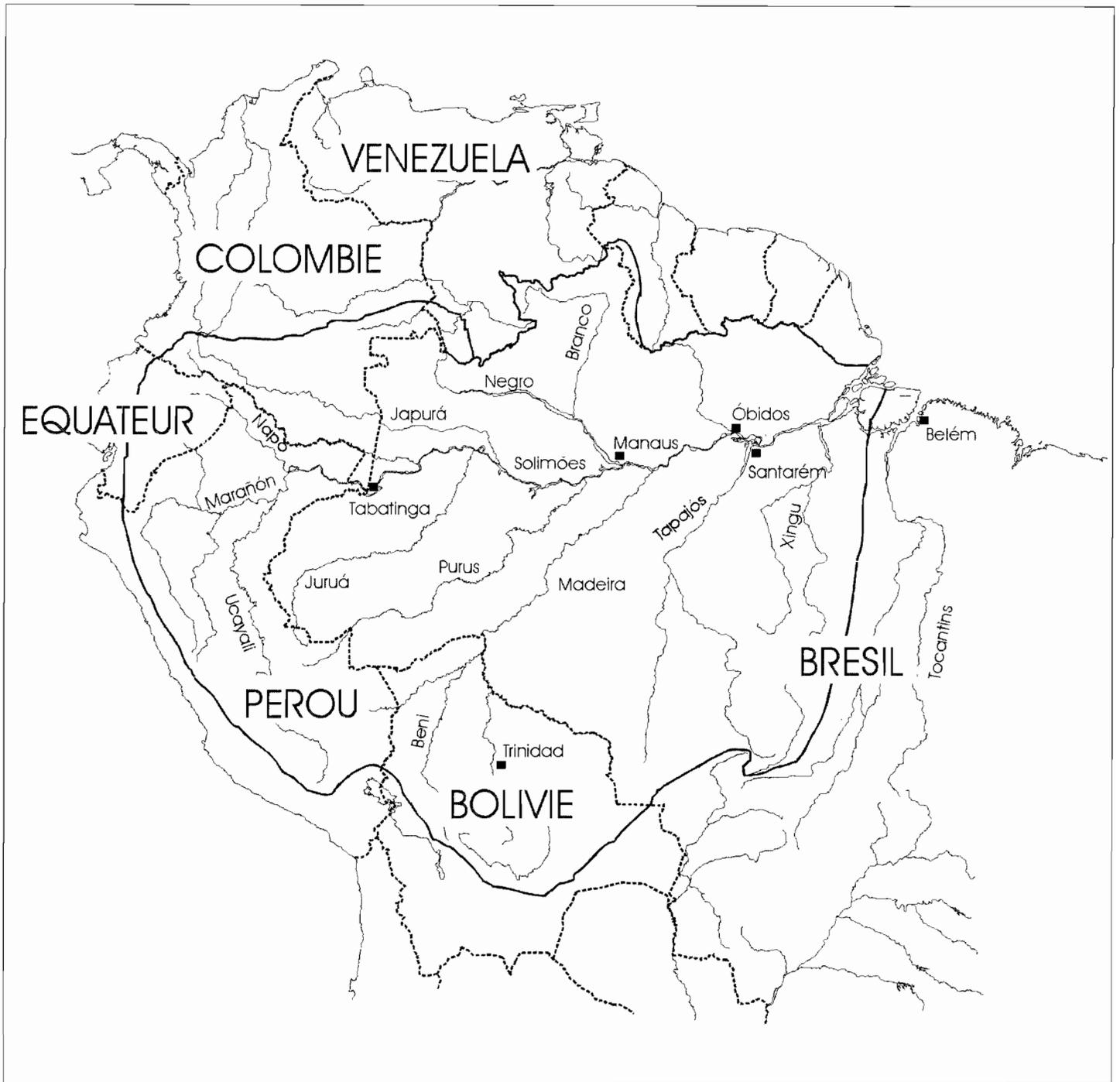
Fonctionnement du profileur de courant à effet Doppler (ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler)

Le profileur de courant à effet Doppler (ADCP) mesure des profils verticaux de la vitesse de l'eau, en utilisant l'énergie acoustique. Une impulsion d'énergie acoustique, appelée "ping", est transmise dans l'eau comme le ferait un sonar de sous-marin, mais à une fréquence plus élevée. L'énergie de cette impul-

sion est réfléchiée sur les particules en suspension et en déplacement dans l'eau, et une partie de cette énergie est retournée à l'ADCP. L'ADCP mesure le glissement de fréquence de l'énergie réfléchiée (l'effet Doppler) et de là, calcule la vitesse relative de l'eau par rapport à l'ADCP, et la direction de l'écoulement. L'ADCP mesure

également sa propre vitesse et direction de déplacement par rapport au fond de la rivière en employant la même technique que celle utilisée pour la mesure de la vitesse de l'eau. La vraie vitesse de l'eau par rapport au fond est obtenue par différence entre la vitesse apparente de l'eau et le déplacement de l'ADCP.

L'ADCP mesure également l'intensité de l'énergie acoustique réfléchiée et reçue à partir des particules en suspension dans l'eau. L'étalonnage de la relation concentration en matières en suspension - intensité acoustique reçue est à l'étude au sein du programme HiBAM.



Le bassin de l'Amazone et de ses affluents

L'Amazone, plus d'un siècle d'hydrologie

Les premières observations sur le régime de l'Amazone, ses affluents, et sur les différents types d'eaux, sont dues aux expéditions historiques de Francisco de Orellana (1541-1542), Pedro de Ursúa (1560-1561) et Pedro Teixeira (1637-1639). Un siècle plus tard, de nombreux naturalistes européens

" voyageront " sur l'Amazone ou ses tributaires, apportant leur lot d'observations : La Condamine (1743), Humboldt (1799), Spix et Martius (1817-1820), d'Orbigny (1831-1832), Adalbert de Prusse (1842-1843), Wallace (1848-1852), Bates (1848-1859), Marcoy (1848-1860),

Avé-Lallemand (1859), Agassiz (1865-1866), Keller-Leuzinger (1874), Wiener (1879-1882), Coudreau (1883-1885, 1895-1897). C'est seulement en 1954, que le précurseur de l'hydrologie moderne, Maurice Pardé, décrit précisément le régime hydrologique de l'Amazone et de ses

principaux tributaires, à partir des enregistrements des niveaux d'eau établis par le service de la navigation brésilien. Mais il faudra attendre 1963 pour que les premières mesures de débit de l'Amazone soient réalisées par les hydrologues américains de l'USGS*.

De plus, l'information arrivait au service centralisateur de Brasilia avec plusieurs mois de retard, ce qui empêchait toute prévision et gestion efficace des crues et étiages.

Pour mener à bien l'étude des régimes hydrologiques, le programme HiBAM a développé des outils de critique et d'homogénéisation des données hydroclimatiques, amélioré les méthodes de jaugeage des "grands fleuves", et installé un réseau de 20 stations à télétransmission satellitaire des données hydrologiques. Ce réseau était le premier de ce type installé en Amérique du Sud. Toujours en fonctionnement, il permet de recevoir en temps réel à Brasilia les hauteurs d'eau des principaux affluents de l'Amazone. La banque de données hydroclimatiques du DNAEE, analysée et homogénéisée, est devenue la référence pour toutes les études hydroclimatiques du bassin de l'Amazone. En couplant les données de cette banque avec celles du réseau de télétransmission satellitaire, un modèle de prévision des crues à Manaus a été mis au point pour répondre à la demande de la protection civile brésilienne.

Les résultats obtenus permettent de mieux connaître l'Amazone et ses affluents en fournissant des estimations fiables sur le volume et les fluctuations de leurs apports. On a pu ainsi déterminer de manière précise les contributions respectives des rios Solimões et Negro, formateurs de l'Amazone au Brésil, évaluer les apports totaux du bassin amazonien à l'océan Atlantique, effectuer une première régionalisation des débits des différents cours d'eau de ce bassin et, comme cité précédemment, mettre au point un modèle de prévision de la crue à Manaus. Cette méthode pourrait être facilement étendue à l'ensemble du bassin et appliquée à d'autres villes amazoniennes qui sont, elles aussi, éprouvées par les inondations.

Les ressources hydriques du bassin amazonien sont considérables et le réseau hydrographique, largement navigable, joue un rôle déterminant pour le développement économique de la région. La variabilité climatique régionale modifie le régime hydrologique de l'Amazone : des basses eaux excessives perturbent la navigation et affectent les réserves hydriques ; les grandes crues entraînent des inonda-



Photo - Jean-Loup Guyot

Cours d'eau à eaux noires dans le bassin du Rio Negro, Brésil.

tions qui causent des préjudices aux centres urbains et limitent le développement agricole. La connaissance des régimes hydrologiques des fleuves du bassin amazonien, et de leur variabilité spatio-temporelle, est donc fondamentale pour une gestion durable des ressources hydriques. Tel est le cas de la région "Norte" du Brésil (États de Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima et Tocantins) dont la croissance économique (6% par an) est l'une des plus fortes du Brésil, ainsi que de la plaine d'inondation de Trinidad, où chaque année, les crues provoquent des dégâts irréversibles dans une région qui fournit plus de la moitié du cheptel bovin bolivien ■

Jean Loup Guyot, Michel Molinier, Jacques Callède et Laurence Maurice

Orstom - "Département Eaux Continentales"
UR "Dynamique, enjeux et usages des hydrosystèmes régionaux"

Eurides de Oliveira et Valdemar Guimarães
DNAEE "Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica do Brasil"

José Cortez
SENAMHI "Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia"

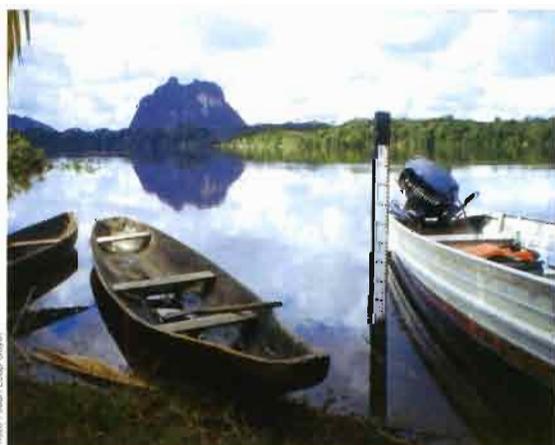


Photo - Jean-Loup Guyot



Photo - Jean-Loup Guyot

Tournée hydrologique en pirogue. Bassin du Rio Alto-Beni, Bolivie.

Echelle limnimétrique de la station de Cucuí sur le Rio Negro, Brésil.

Guyot Jean-Loup, Molinier Michel, Callède Jacques, Maurice Laurence, Oliveira E. de, Guimaraes V., Cortez J.

Hydrologie du bassin amazonien

ORSTOM Actualités, 1997, (53), p. 10-14; p. 23-25. ISSN 0758-833X