

2 HYDROLOGIE DU BASSIN AMAZONIEN

L'ampleur du bassin amazonien, sa situation géographique particulière ainsi que la puissance et les origines diverses des cours d'eau qui le parcourent rendent son étude assez complexe et exigent des moyens humains et matériels importants. Dans ce but, un accord de coopération a été signé entre deux organismes brésiliens (le CNPq et le DNAEE¹) et l'ORSTOM, accord qui a été à l'origine du programme HiBAm² dont l'objectif principal est l'étude de la bio-géo-dynamique de cet immense bassin. Les objectifs secondaires en sont : l'estimation des apports en eau et en matières à l'océan Atlantique, l'étude de la variabilité spatiale et temporaire de ces apports et l'impact des changements climatiques sur ces flux liquides et solides. Cet accord a permis, à partir du réseau hydrométrique classique déjà existant et géré par le DNAEE, de créer un réseau de télétransmission satellitaire de données hydroclimatiques et un

réseau complémentaire de stations permanentes d'échantillonnage avec d'importants moyens de mesures des flux d'eau et de matières.

Ce programme a bénéficié de plusieurs financements tant brésiliens (CNPq, DNAEE, CPRM³) que français (ORSTOM, PEGI, ministère des Affaires étrangères) dans le cadre de l'accord de coopération franco-brésilien cité ci-dessus et du Programme-pilote de Conservation de la forêt tropicale brésilienne (PPG7). Les résultats obtenus à ce jour sont particulièrement importants et satisfaisants et ont permis de mieux connaître l'Amazone et ses affluents. On a pu ainsi déterminer de manière précise les contributions respectives du Solimões et du Rio Negro, formateurs de l'Amazone au Brésil, évaluer les apports totaux de ce bassin à l'océan Atlantique, mettre au point un modèle de prévision de la crue à Manaus, plus grande ville d'Amazonie, et effectuer une première régionalisation des débits des différents cours d'eau de ce bassin.

1. CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

DNAEE: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica.

2. HiBAm: Hidrologia da Bacia Amazônica.

3. CPRM: Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais.

1. L'Amazonie

Avec un bassin de plus de 6 millions de km² (près de 5 % des terres émergées) et un débit moyen de près de 210 000 m³/s (environ 15 % des apports d'eau douce aux océans), l'Amazonie est le premier fleuve de la planète.

Son bassin, situé entre 5° de latitude Nord et 20° de latitude Sud, s'étend sur 7 pays: le Brésil (63 %), le Pérou (16 %), la Bolivie (12 %), la

Colombie (5,7 %), l'Équateur (2,4 %), le Venezuela (0,7 %) et la Guyana (0,2 %). Il est limité au Nord par les reliefs du bouclier guyanais, à l'Ouest par la chaîne des Andes, au Sud par le plateau du bouclier brésilien et à l'Est par l'océan Atlantique. Entre les Andes et les boucliers anciens, les limites du bassin ne sont pas très marquées et des phénomènes de diffifluence sont observés: au Nord avec l'Orénoque et au Sud vers le Rio de la Plata. Le bassin amazonien (carte 1) est divisé en trois



1. Le bassin amazonien.

grandes unités morpho-structurales héritées de l'histoire géologique du bassin: les boucliers, la chaîne des Andes et la plaine amazonienne, qui occupent respectivement 44, 11 et 45 % de la superficie totale du bassin versant. Les principaux formateurs de l'Amazone présentent des caractéristiques hydrographiques liées à ces trois grandes unités. Les deux fleuves d'origine andine (Rio Marañon/Solimões et Rio Madeira) signent leurs apports à l'Amazone par des eaux chargées en matières dissoutes et particulières.

Dans la région de Manaus, la convergence des apports des rios Solimões, Negro et Madeira entraîne une nette augmentation des surfaces drainées et des débits. Cette concentration des apports, associée à une très faible pente hydraulique, va engendrer des perturbations dans l'écoulement de ces fleuves, aggravant la non-univocité des courbes de tarage dans cette région. En effet, si le calcul du débit de l'Amazone et celui de ses principaux tributaires est compliqué par les fortes vitesses observées, il l'est aussi par la très faible pente des cours d'eau qui ne dépasse pas 2 cm/km dans leur partie aval. Il ne s'agit pas seulement d'un écoulement classique d'amont vers l'aval, mais, aussi et surtout, d'une poussée des eaux situées en aval par l'onde de crue des fleuves d'origine andine. De ce fait, les relations hauteurs-débits sont rarement univoques, et présentent des courbes en forme de lasso. Pour cette raison, les apports de certains tributaires importants, comme le Rio Negro, étaient jusqu'à maintenant mal connus.

Le bassin amazonien est soumis à un régime des précipitations essentiellement d'origine atlantique et reçoit en moyenne 2 460 mm/an. Dans la partie brésilienne du bassin, la distribution saisonnière des précipitations montre des différences sensibles entre le Nord et le Sud (carte 2). Au Nord de l'équateur (bassin du Rio Negro), le maximum pluviométrique est observé de mai à juillet alors qu'il apparaît de décembre à mars dans le Sud du bassin. Dans les bassins andins de Bolivie, l'effet du

relief est très marqué, avec des valeurs extrêmes de 6 000 mm/an au pied des Andes, et de 300 mm/an dans certaines vallées abritées.

Les apports combinés des tributaires méridionaux et septentrionaux, aux régimes différents, associés à l'effet régulateur des zones d'inondation (les *varzeas*), engendrent à l'aval de Manaus un hydrogramme de l'Amazone à crue unique et étalée d'avril à juillet.

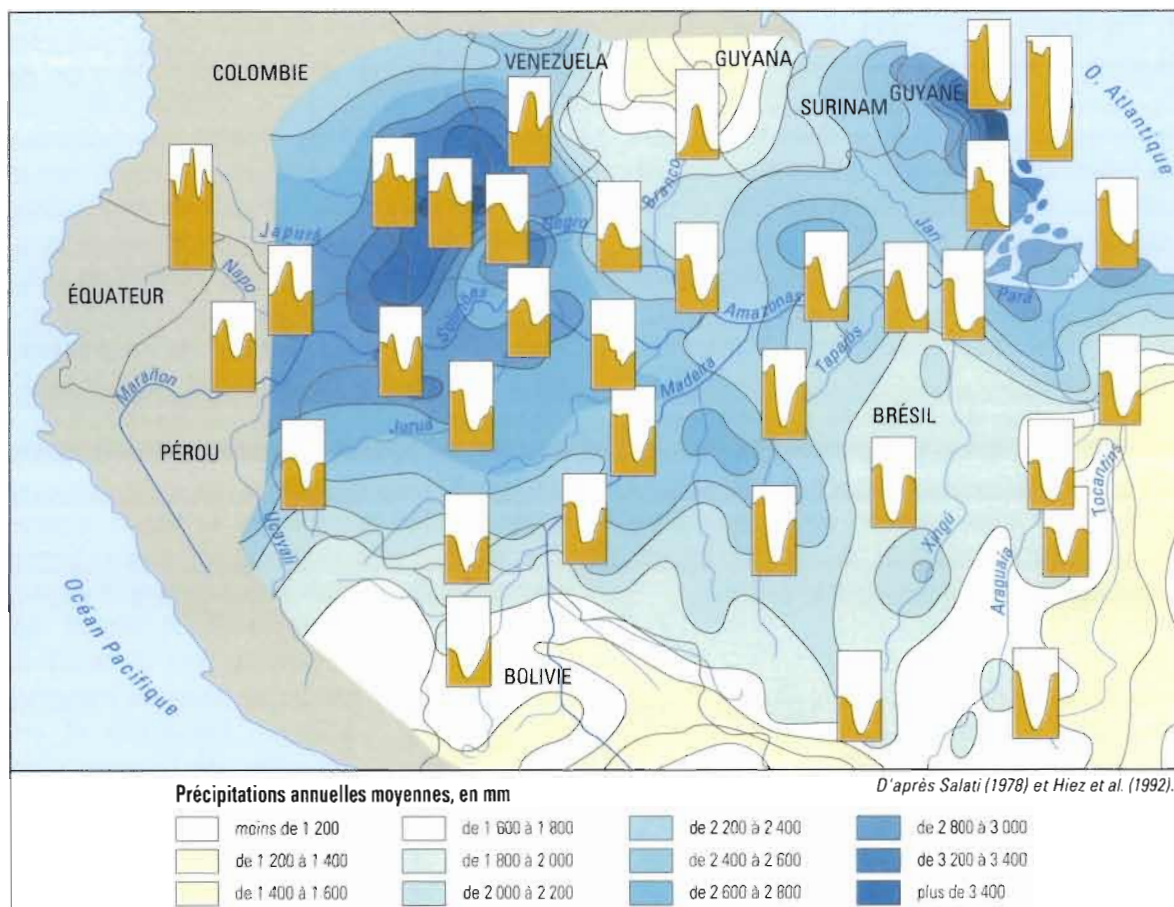
Après les études de Le Cointe en 1935 et de Pardé en 1936 et 1954, l'équipe de Oltman en 1968, puis Rodier et Roche en 1978 ont donné une très bonne approximation de la crue de l'Amazone. Grâce aux récents jaugeages du DNAEE à Óbidos, on peut estimer que les crues record de 1953 et 1989 de l'Amazone ont apporté à l'océan Atlantique des débits instantanés de 360 000 à 380 000 m³/s.

2. Le programme HiBAm

Le programme HiBAm est réalisé en coopération par le DNAEE et l'ORSTOM avec l'appui d'autres organismes brésiliens comme la CPRM, et dans le cadre d'universités et instituts de recherche brésiliens. En plus de son insertion dans le programme PEGI piloté conjointement par l'ORSTOM et l'INSU⁴, ce programme sur les ressources en eau de l'Amazonie constitue une contribution non négligeable de l'ORSTOM au grand programme « Global Change » du PIGB (Programme international géosphère-biosphère); il s'intègre également parfaitement aux objectifs du Programme-pilote de la Conservation de la forêt tropicale brésilienne coordonné par la Banque mondiale tel qu'il a été défini par les pays membres du G7.

Il comprend actuellement les trois sous-projets suivants :

4. INSU: Institut des sciences de l'univers.



2. Distribution de la pluviométrie et isohyètes moyennes annuelles.

a. Bilan hydrique du bassin amazonien

Ce premier sous-projet est en cours depuis 1990 et devrait être achevé en 1995-1996 suivant les moyens financiers et humains mis à sa disposition. Les résultats ont fait l'objet de plusieurs communications à des congrès, d'articles dans des revues et ont permis d'élaborer des cartes thématiques. Des résultats très intéressants et inédits ont pu être obtenus à partir des différents travaux réalisés dans le cadre de ce sous-projet. C'est ainsi que l'on connaît maintenant beaucoup mieux les débits de l'Amazone et de ses principaux tribu-

taires. On a pu définir, avec une assez bonne précision, les valeurs moyennes annuelles de ces grands fleuves amazoniens, notamment pour le Rio Negro dont les débits à Manaus étaient assez mal connus – valeurs qui servent maintenant de référence. A partir de ces résultats, on a pu établir une très bonne relation entre le débit moyen annuel (Q en m^3/s), la superficie du bassin hydrographique (S en km^2) et la pluviométrie moyenne (P en mm/an) et ainsi régionaliser les paramètres hydrologiques annuels pour l'ensemble de ce bassin amazonien.

b. Transports de matières solides et dissoutes dans le bassin de l'Amazone

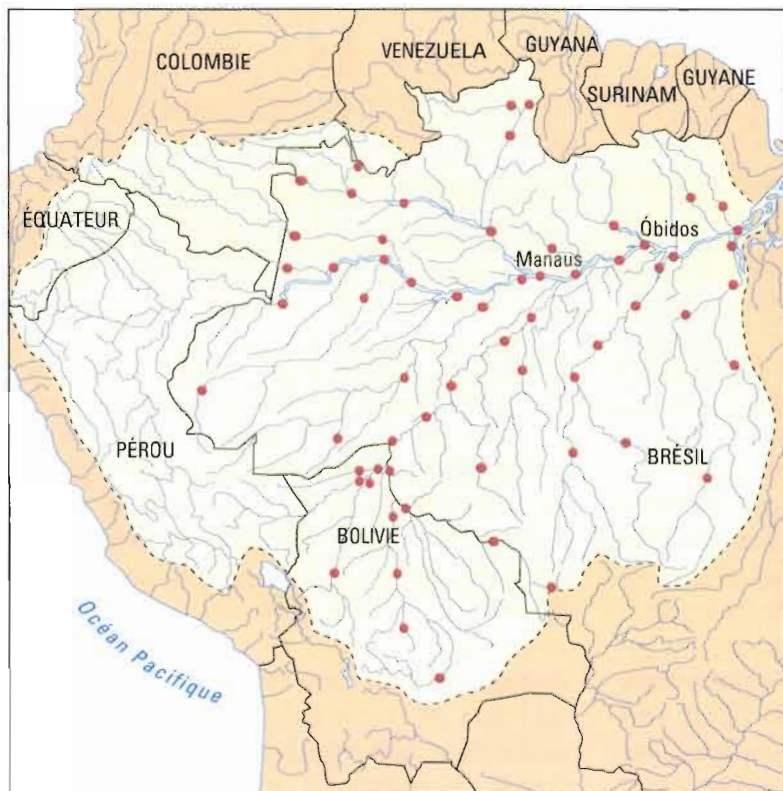
Ce deuxième sous-projet, bien que préparé en étroite collaboration avec le DNAEE dès 1991, n'a vraiment débuté qu'en 1994. Il est une des composantes du programme PEGI et a pour objectifs principaux :

- élaboration du *bilan global précis des exportations*, en direction de l'Atlantique, des matières dissoutes et particulaires transportées par l'Amazone ;
- détermination des *fluctuations saisonnières et inter-annuelles* de ces transports et leur composition en fonction des oscillations hydroclimatiques ;
- recherche d'une *relation entre les régimes d'exportation des matières, le processus biogéodynamique et les régimes hydrologiques*.

c. Télétransmission de données hydrométéorologiques par satellite

Ce troisième sous-projet a effectivement commencé en octobre 1992. Il s'agit de la continuation du programme réalisé en coopération avec le DNAEE de 1983 à 1987 lorsqu'a été mis en place le réseau amazonien de télétransmission de données hydrométriques. En 1993, l'ORSTOM, avec des fonds du ministère français des Affaires étrangères (MAE) destinés à l'appui du Programme-pilote de Conservation de la forêt tropicale brésilienne, a pu mettre en place une nouvelle station de réception à Brasília et fournir quelques balises émettrices supplémentaires pour les stations hydrométriques stratégiques du bassin amazonien. Il est en effet indispensable, pour la bonne marche des deux autres sous-projets et, tout particulièrement, le second sur

l'étude du flux de matières solides et dissoutes transportées par l'Amazone et ses affluents, de disposer d'un réseau de mesure moderne et performant sur l'ensemble du bassin amazonien, y compris dans les régions les plus éloignées et d'accès difficile.



3. Les outils et les méthodes

Pour mener à bien une telle étude sur les flux d'eaux et de matières, il est nécessaire de disposer d'un réseau de stations hydrométriques, sur lesquelles des mesures de débits

3. Les stations hydrométriques et sédimentométriques.



4. Distribution des vitesses et des matières en suspension.

et un échantillonnage régulier sont organisés. Le réseau de base utilisé est celui du DNAEE. Cependant, un réseau opérationnel plus réduit a été défini pour ce programme. Il comprend une douzaine de stations sur le bassin bolivien (réseau PHICAB – Programme hydrologique et climatologique du bassin amazonien de Bolivie) et une soixantaine de stations au Brésil (réseau sédimentométrique du DNAEE) (carte 3). Certaines stations

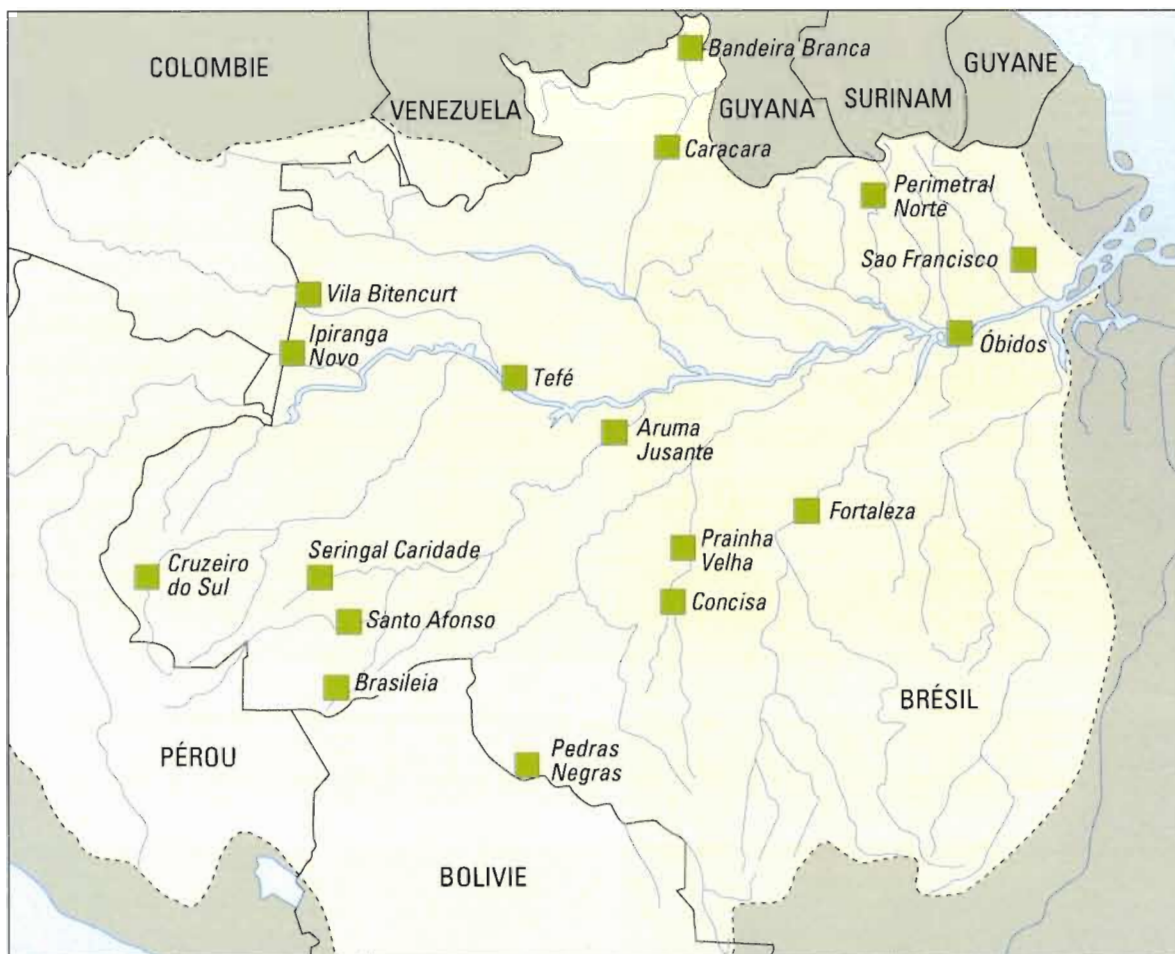
hydrométriques de ce réseau sont équipées de balises de télétransmission par satellite avec acquisition des données, en temps réel, grâce à une station réceptrice installée dans les locaux du DNAEE à Brasília.

Lors de campagnes réalisées trimestriellement sur ce réseau, les mesures du débit, de la température, de la conductivité, de la turbidité et du pH de l'eau sont effectuées. Un échantillonnage d'eau, de matières en suspension et de sédiments de fond est également réalisé à chaque station. La filtration des échantillons et leur conditionnement pour le transport sont effectués sur place. Les mesures de débit sont effectués par exploration du champ des vitesses dans la section, par mesure au moulinet sur les plus petits cours d'eau, et par courantométrie à effet Doppler (ADCP) sur les principaux fleuves. Cet équipement ADCP, acquis sur financement MAE/ORS-TOM, permet de connaître précisément la distribution des vitesses et des matières en suspension dans la section de mesure (document 4). L'échantillonnage et les mesures physico-chimiques sont effectués depuis la berge ou à partir de bateaux, suivant la taille des cours d'eau.

4. Le réseau de télétransmission satellitaire

a. Historique

Les difficultés d'exploitation du réseau hydrométrique amazonien ont tout naturellement amené les hydrologues du DNAEE à rechercher une solution de transmission des données par voie satellitaire simple et efficace. A la suite de différents congrès et séminaires et de nombreux contacts avec l'ORSTOM, le DNAEE opte, en 1982, pour le système français ARGOS. En 1983, le gouvernement brésilien sollicite et obtient l'aide de la France pour équiper 23 stations du bassin



5. Les stations de télétransmission par satellite.

amazonien avec une station de réception à Brasília. L'installation en est confiée à l'ORSTOM. L'ensemble de ce réseau de télétransmission satellitaire est remis officiellement au Brésil en 1986.

Afin de s'adapter aux nouvelles techniques développées au cours des dernières années, le ministère français des Affaires étrangères finance, en 1993, dans le cadre du Programme-pilote de Conservation de la forêt tropicale brésilienne, une nouvelle station de réception installée à

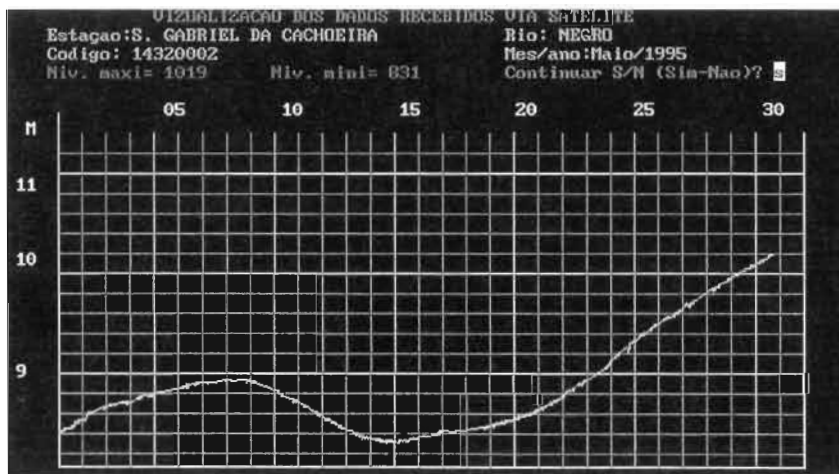
Brasília dans les locaux du DNAEE (document 6) et trois nouvelles stations modernes de télétransmission des données hydroclimatiques; l'ORSTOM se chargeant, pour sa part, en coopération avec le DNAEE, de la mise en place et de la maintenance du réseau (carte 5) et du développement des logiciels associés. Les données sont reçues en temps réel (document 8) et sont directement utilisables pour des applications diverses, comme la prévision des crues par exemple.



6. Station de réception des données satellitaires.



7. Réception en temps réel des données hydrométriques.



8. Visualisation des données reçues à la station de Sao Gabriel da Cachoeira sur le Rio Negro.

b. Prédiction des crues du Rio Negro à Manaus

La ville de Manaus, située en rive gauche du Rio Negro, juste en amont de sa confluence avec le Solimões où se forme l'Amazone, compte 2,5 millions d'habitants. Une partie de son agglomération souffre périodiquement des inondations qui sont parfois catastrophiques. La crue à Manaus est assez complexe puisqu'elle résulte des apports conjugués des rivières d'origine andine à l'ouest et au sud (Solimões et Madeira) et du Rio Negro issu du bouclier guyanais au nord.

Alors que le Brésil dispose d'une information hydrologique de qualité et d'un réseau hydrométrique moderne, il n'existe pas de système de prévision de crue de l'Amazone. L'équipe d'hydrologues DNAEE-ORSTOM a donc décidé, en 1994, de développer un outil performant des prévisions des niveaux d'eau à Manaus avec possibilité d'extension à tout le bassin amazonien. Cet outil est maintenant opérationnel à Manaus; il est couplé avec les informations provenant du réseau satellitaire qui va permettre de mettre au point un système d'annonce de crue, dans un premier temps à Manaus et ensuite sur l'Amazone et ses principaux affluents.

5. Les régimes hydrologiques

a. Les apports

Le « Rio Amazonas » se forme au Pérou avec la rencontre des rivières andines Ucayali et Marañón et, un peu plus en aval, du Napo qui vient de l'Équateur. En entrant au Brésil ce fleuve change de nom pour prendre celui de Solimões. Il ne retrouvera

ce nom d'Amazone qu'après avoir reçu, au Brésil, les eaux du Rio Negro. A la frontière entre le Pérou et le Brésil, à Tabatinga, il lui reste encore près de 3 000 km à parcourir et son débit est déjà de 46 000 m³/s, c'est-à-dire l'équivalent de celui du Congo (deuxième fleuve du Monde) à son

embouchure. Cependant, malgré cette distance, la dénivelée totale, avant de rencontrer les eaux de l'Atlantique, n'est que de 60 mètres, ce qui explique la particularité de la propagation de l'onde de crue, comme indiqué précédemment. Sur cette distance, son volume va être multiplié

9. DÉBITS MOYENS ANNUELS DU BASSIN AMAZONIEN BRÉSILIEN

BASSIN DU SOLIMÕES - AMAZONE				
Nom de la rivière	Localisation de la station	Superficie du bassin (km ²)	Débit moyen annuel (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
Solimões	S. P. de Oliv.	990 780	46 500	46,9
	Iça Confluence	143 760	8 800	61,2
Solimões	Sto A. do Iça	1 134 540	55 300	48,7
Jutai	Confluence	85 000	5 200	61,2
Juruá	Confluence	173 500	6 600	38,0
Japurá	Confluence	288 000	19 300	67,0
Téfé	Confluence	27 960	1 350	48,3
Coari	Confluence	37 500	1 850	49,3
Solimões	Itapeua	1 746 500	89 600	51,3
Piorini	Confluence	21 740	1 700	78,2
Purus	Confluence	370 000	11 000	29,7
Manacapuru	Confluence	9 500	700	73,7
Solimões	Manacapuru	2 147 740	103 000	48,0
Sol. jusante	Confluence	9 750	200	20,5
Rio Negro	Manaus	696 810	28 400	40,8
Amazonas	Jatuarana	2 854 300	131 600	46,1
Madeira	Confluence	1 420 000	31 200	22,0
Uatumá	Confluence	105 350	1 710	16,2
Maués	Confluence	86 400	1 125	13,0
Nhamundá	Confluence	24 700	510	20,6
Trombetas	Confluence	128 000	2 555	20,0
Amazonas	Óbidos	4 618 750	168 700	36,5
Coruá	Confluence	56 280	2 900	51,5
Tapajos	Confluence	490 000	13 500	27,6
Maicuru	Confluence	6 200	240	38,7
Coruá Una	Confluence	47 000	2 520	53,6
Paru	Confluence	65 000	1 660	25,5
Xingu	Confluence	504 300	9 700	19,2
Jari	Confluence	76 000	1 880	24,7
Araguari	Confluence	89 570	2 100	23,4
Marajó + Pará	Embouchure	158 900	5 800	36,5
Amazonas	Embouchure	6 112 000	209 000	34,2
Tocantins	Embouchure	757 000	11 800	15,6
Total	Embouchure	6 869 000	220 800	32,1

BASSIN DU RIO NEGRO				
Nom de la rivière	Localisation de la station	Superficie du bassin (km ²)	Débit (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
Rio Negro	Cfl R. Branco	386 000	20 250	52,5
Rio Branco	Cfl R. Negro	185 000	3 850	20,8
Jauaperi	Confluence	48 000	1 300	27,1
Unini	Confluence	27 000	1 050	38,9
Jau	Confluence	19 000	720	37,9
Rio Negro	Partie Aval	31 810	1 230	38,7
Rio Negro	Manaus	696 810	28 400	40,8

BASSIN DU MADEIRA				
Nom de la rivière	Localisation de la station	Superficie du bassin (km ²)	Débit (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
Mamoré	Confluence	590 000	8 660	14,7
Beni	Confluence	310 000	10 140	32,7
Madeira	Abuná	900 000	18 800	20,9
Madeira	Intermédiaire	303 000	7 540	24,9
Madeira	Mont Aripuaná	1 203 000	26 340	21,9
Aripuaná	Confluence	120 000	3 720	31,0
Madeira	Aval Aripuaná	1 323 000	30 060	22,7
Madeira	Partie Aval	97 000	1 140	11,8
Madeira	Embouchure	1 420 000	31 200	22,0



10. Les régions du bassin amazonien.

par 4,5 pour déverser, en moyenne, près de 6 600 milliards de m^3 par an à l'océan Atlantique, soit $209\,000\ m^3/s$.

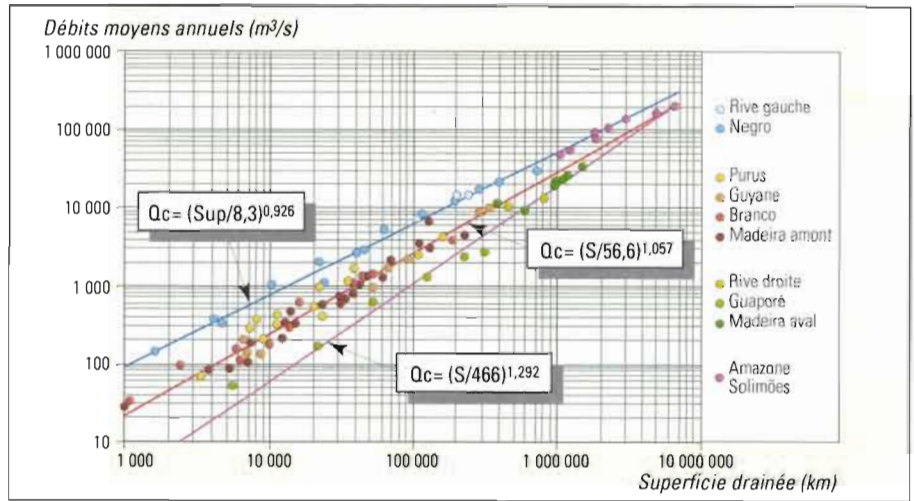
Cette grande quantité d'eau est le résultat de plusieurs facteurs, et en particulier de l'alimentation très diversifiée de ce bassin situé à cheval sur l'équateur, dans une des zones les plus pluvieuses du Monde, et de l'immense superficie de son bassin hydrographique.

Tout au long du parcours brésilien, les apports se répartissent à peu près à égalité entre les affluents de rive gauche et de rive droite (respectivement 46

et 54 %). Le régime saisonnier évolue au fur et à mesure de son cours en fonction de ces apports.

On peut distinguer, tout d'abord, deux grandes catégories d'apports correspondant à l'origine rive gauche ou rive droite des affluents. Les apports de rive gauche proviennent d'une région, en moyenne, plus pluvieuse avec un maximum de pluviométrie centré sur les mois de mai à juillet, ce qui explique que le débit spécifique moyen de ces affluents soit en général plus élevé. En revanche, les affluents de rive droite qui viennent du Sud du bassin, moins arrosés et où la plus forte pluviosité se situe de janvier à mars,

11. Débit moyen annuel et superficie (Amazone et tributaires).



ont une hydraulité plus faible ; le mois le plus abondant est celui de mars, avril ou mai.

Il y a cependant une exception à cette distinction : les affluents de rive gauche descendant du bouclier guyanais ont un débit spécifique comparable aux affluents de rive droite. Ceci est dû, principalement, à une pluviométrie inférieure, surtout sur les bassins du Rio Branco (moyenne pluviométrique de 1 650 mm) et du Rio Trombetas (moyenne pluviométrique de 1 800 mm).

Le maximum mensuel moyen des affluents de rive droite a toujours lieu avant le mois de juin, alors que celui des affluents de rive gauche se situe invariablement après ce mois de juin. Pour le Solimões-Amazone, le mois le plus abondant est, en général, le mois de juin.

Le tableau 9 donne les débits moyens inter-annuels de l'Amazone et de ses principaux affluents ainsi que ceux des bassins du Rio Negro et du Madeira.

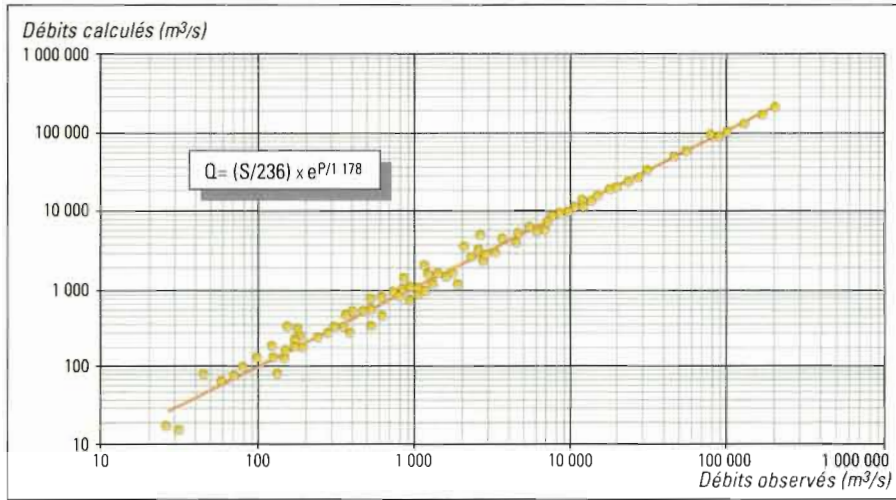
b. Variabilité régionale

Pour mieux appréhender la variabilité régionale des écoulements, 109 bassins hydrographiques de l'Amazonie brésilienne et bolivienne ont été rete-

nus. Leurs superficies varient de 1 000 à 6 112 000 km² et la pluviométrie moyenne annuelle de 1 400 à 3 400 mm.

L'étude de la variation des débits en fonction de la superficie du bassin drainé (figure 11) semble indiquer qu'il existe une très nette tendance régionale. Il est ainsi possible de distinguer, tout au moins pour la partie brésilienne, cinq régions différentes du bassin amazonien (carte 10) :

- le Rio Negro et les affluents rive gauche du Solimões en amont de Manaus, où les débits spécifiques varient entre 50 et 90 l/s/km² (zone 1) ;
- les affluents issus du bouclier guyanais, comme le Rio Branco, le Trombetas, le Jari, etc., pour lesquels les débits spécifiques sont compris entre 15 et 40 l/s/km² (zone 2N) ;
- dans la même gamme de débits spécifiques, on retrouve les affluents rive droite du Solimões en amont de Manaus (Purus, Juruá) et la partie amont du bassin du Madeira, y compris les tributaires boliviens (zone 2S) ;
- la partie aval du Madeira et les autres affluents rive droite en aval de Manaus dont les débits spécifiques sont compris entre 5 et 25 l/s/km² (zone 3) ;



12. Débits calculés et débits observés (Amazone et tributaires).

● enfin le *Solimões/Amazone*, à partir de son entrée au Brésil (São Paulo de Olivença), qui est la résultante de toutes ces composantes régionales et dont les débits spécifiques vont de 34 (embouchure) à 50 l/s/km² (zone 4).

En réalité, si l'on observe la distribution pluviométrique (carte 2) et la répartition des coefficients de ruissellement ou des débits spécifiques en fonction de la pluviométrie moyenne du bassin, on s'aperçoit que ces tendances régionales sont fortement liées à cette pluviométrie moyenne. On obtient ainsi une très bonne corrélation entre les écarts [Qc-Qo] entre les débits calculés [Qc = (S/56,6)^{1.057} de la figure 11] et des débits observés [Qo] et la pluviométrie. La combinaison des deux relations obtenues permet de déterminer une relation unique entre les débits moyens annuels (Q en m³/s), la pluviométrie annuelle moyenne (P en mm) et la superficie drainée par chacun des bassins hydrographiques (S en km²) pour tout le bassin amazonien dont l'équation est :

$$Q = (S/236) \times e^{P/1.178}$$

Comme le montre la figure 12, il existe une très forte corrélation entre les débits moyens annuels observés et les débits moyens annuels calculés par la relation précédente sur chacun des 109 bassins hydrographiques choisis. Cette relation peut donc permettre d'estimer les apports annuels d'une vitesse amazonienne dont le bassin hydrographique a une superficie supérieure à une centaine de km². Cependant, il convient d'être très prudent dans l'utilisation de cette relation, notamment en ce qui concerne les bassins andins dont le régime est différent.

Quelques bassins s'écartent sensiblement de cette courbe moyenne. En particulier le bassin du Guaporé/Itenez dont la partie amont est constituée de zones inondées qui ne contribuent pas, ou très peu, à l'écoulement et où l'on observe, en outre, des défluences vers la bassin du Paraguay.

c. Variabilité saisonnière

La variabilité saisonnière étant liée aux régimes climatiques, donc à la pluviométrie, il n'est pas surprenant que l'analyse régionale de celle-ci mette de nouveau en évidence les différentes zones précédemment déterminées (carte 10).

Suivant la classification établie par Jean Rodier, on distingue 4 types de régime (figure 13) :

- *Le régime tropical austral*, à un seul maximum qui survient au cours du premier semestre de l'année calendaire. Ce régime est représenté par les rivières originaires de l'hémisphère Sud comme le Purus, le Madeira et ses affluents, le Xingu, le Tapajos, etc.
- *Le régime tropical boréal* (Rio Branco en particulier) dont le maximum est bien marqué et survient au cours du deuxième semestre.
- *Le régime équatorial*, représenté par le Rio Negro mais aussi par les rivières Içá et Japurá, pour lequel le maximum est moins accentué (on peut même souvent observer deux maxima) et survient en milieu d'année.
- *Le régime équatorial altéré*, représenté par le Solimões et l'Amazone, qui est sous l'influence des trois régimes cités précédemment.

6. Les apports de matières

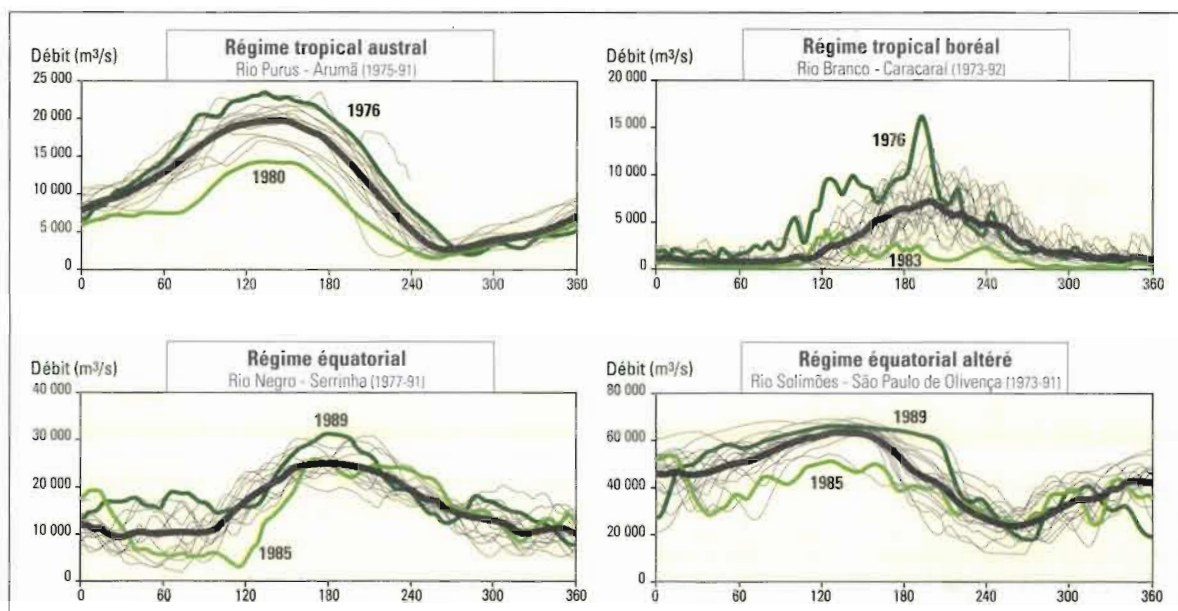
Les apports de matières à l'océan Atlantique par l'Amazone sont estimés à 270 millions de tonnes par an pour les matières dissoutes, et à 1 200 millions de tonnes par an pour les matières particulaires. L'essentiel des apports en solution et la quasi-totalité des apports en suspension proviennent des hauts-bassins andins des Rio Madeira et Solimões, originaires de Bolivie et du Pérou.

La connaissance des transports de matières par l'Amazone est fondamentale pour la compréhension des cycles biogéochimiques à l'échelle de la Planète (cycle du carbone). De même, l'impact de l'activité anthropique (déforestation, activité minière) sur l'érosion, la modification des sols, la qualité de l'eau, ne peut être appréhendé que par la mesure des flux biogéochimiques dans les fleuves. Afin de préciser ces valeurs, et surtout d'en connaître la variabilité saisonnière et inter-annuelle, l'ORSTOM en collaboration avec ses

partenaires boliviens et brésiliens, a lancé un programme d'étude des flux de matières dans le bassin amazonien, des Andes de Bolivie à l'Amazonie brésilienne. Quelques résultats obtenus en Bolivie sont présentés ci-dessous.

Les résultats acquis par le Programme hydrologique et climatologique du bassin amazonien de Bolivie (PHICAB: ORSTOM/SENAMHI/UMSA) de 1983 à 1990, ont permis de connaître le régime des apports en eau et en matières dans le bassin du Rio Madeira, des Andes jusqu'à la frontière brésilienne.

Le régime des flux de matières particulaires a pu être étudié en détail dans les Andes de Bolivie, et a montré l'existence d'une forte variabilité régionale des taux de transport en suspension (Ts) de 20 à 18000 t/km²/an, liée à des conditions topographiques, géologiques et climatologiques contrastées. Pour la première fois à cette échelle, les flux de matières particulaires exportés par un grand bassin andin (173 000 km²) ont été mesurés, permettant d'estimer un taux d'érosion mécanique théorique moyen de cette partie de la chaîne andine (3 200 t/km²/an). Le taux de transport en solution (Td) moyen exporté des bassins andins (40 t/km²/an) est environ 80 fois plus faible que le taux de transport en suspension. Dans les Llanos, plus de 60 % du flux de matières particulaires d'origine andine va se déposer lors de la traversée de la plaine d'inondation. Le dépôt de 75 millions de tonnes par an de sédiments dans le bassin du Rio Béni, et de plus de 150 millions de tonnes par an dans celui du Rio Mamoré, s'effectue essentiellement dans les zones de piedmont où une forte subsidence, liée à la géodynamique de l'avant-pays andin, est observée. Le taux de transport en solution varie suivant les bassins de 5 à 30 t/km²/an. Pour le bouclier brésilien, les données obtenues indiquent un taux de transport en suspension de 15 à 20 t/km²/an pour un taux de transport en solution de l'ordre de 4 t/km²/an.



13. Variabilité saisonnière.

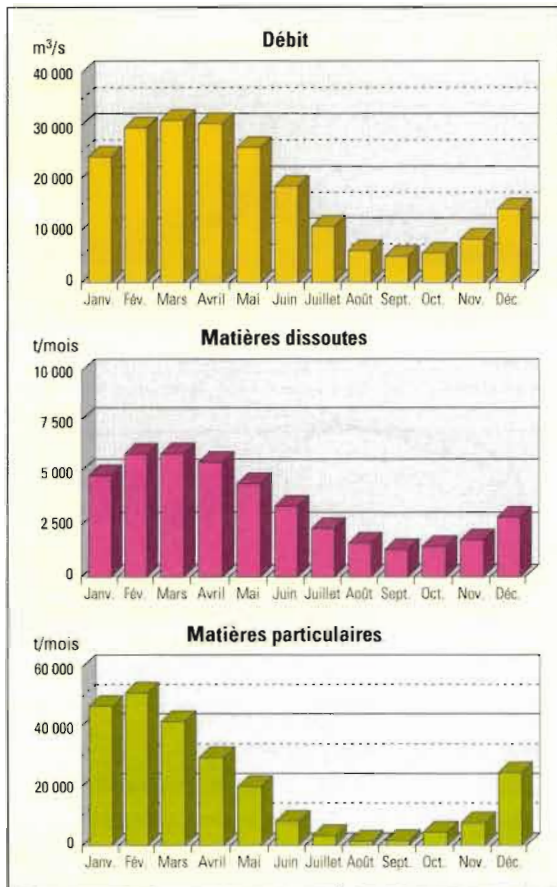
Ainsi, le flux de matières particulaires exporté par le Rio Madeira à Villabella (sans compter le Rio Madre de Dios pour lequel les apports andins ne sont pas connus) provient pour 99 % des bassins andins, qui fournissent également 48 % des matières dissoutes et 32 % des apports hydriques, alors qu'ils n'occupent que 22 % de la superficie totale du bassin. A l'échelle du bassin amazonien, le Rio Madeira est donc considéré comme un fleuve andin. A Villabella, le Rio Madeira présente un flux global de 270 millions de tonnes par an, dont 15 % sous forme dissoute et 85 % sous forme particulaire.

L'étude qualitative du matériel transporté par les fleuves de l'Amazonie bolivienne a montré une grande constance régionale et temporelle de la géochimie des matières en suspension. La minéralogie des argiles et la chimie des solutions présentent quelques tendances régionales liées à la nature lithologique des séries rencontrées. Ainsi, les cours d'eau drainant les séries sédimentaires tertiaires

situées dans les Andes (bassin de l'Alto-Béni), dans les zones de piedmont, ou dans les Llanos (bassin du Rio Orthon) présentent des caractéristiques minéralogiques (argiles) et hydrochimiques particulières. De même, certaines séries andines très altérées du Paléozoïque sont à l'origine de fortes teneurs en matières dissoutes et particulaires.

Les fortes variations des teneurs globales en matières en solution et en suspension, observées au cours du cycle hydrologique, n'affectent que très peu les concentrations relatives des éléments de la phase dissoute et particulaire. Ces résultats ont permis le calcul de bilans élémentaires. SiO_2 (dont 4 % sous forme dissoute), Al_2O_3 , et Fe_2O_3 représentent 75 % du flux total de matières exportées par le Rio Madeira à Villabella.

Le suivi en continu, à partir d'un double échantillonnage, journalier et décadaire (période de 10 jours), a permis de connaître le régime de ces flux de matières. Du fait d'une forte variabilité saisonnière des teneurs en matières en suspension,



14. Débit et flux moyens mensuels de matières particulières et dissoutes du Rio Madeira à Villabella.

l'exportation de matières particulières s'effectue essentiellement lors des trois mois de hautes eaux, qui peuvent totaliser dans les Andes plus de 90 % de l'exportation sédimentaire annuelle. Ce pourcentage varie de 60 à 80 % pour les stations du piedmont andin, pour une valeur moyenne de 50 % dans les Llanos.

Les matières en solution présentent des variations de concentrations plus faibles au cours du cycle hydrologique, et le flux de matières dissoutes s'apparente au régime hydrologique (figure 14). Malgré l'étendue du bassin versant drainé (903 500 km²), le Rio Madeira à Villabella pré-

sente un régime saisonnier du flux de matières particulières très marqué.

Une étude identique est actuellement en cours sur le bassin amazonien brésilien où l'utilisation de techniques et de matériels plus modernes (courantométrie à effet Doppler-ADCP en particulier) va permettre d'obtenir des résultats beaucoup plus précis et surtout, inédits.

Conclusion

Cette coopération très étroite et très fructueuse entre la France et le Brésil a donc donné des résultats particulièrement intéressants et prometteurs. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses principaux affluents sont maintenant beaucoup mieux connus, ce qui va permettre de développer des outils efficaces et indispensables pour une meilleure mise en valeur de cette immense région. Ainsi, l'expérience de prévision des crues à Manaus couplée avec les informations provenant du réseau de transmission satellitaire des données hydrométéorologiques sera utilisée pour mettre au point un système d'annonce de crues performant sur l'Amazone et ses principaux tributaires. De même, les mesures de flux liquides et solides des différents cours d'eau permettra de mieux appréhender l'impact des activités humaines sur les sols et la qualité des eaux.

Ce programme HiBAM doit encore être poursuivi afin d'obtenir des données plus nombreuses et fiables, notamment en ce qui concerne les transports de matières solides et dissoutes. Il est, en outre, envisagé de confronter l'expérience et les résultats acquis par cette équipe franco-brésilienne à ceux obtenus par des équipes ayant travaillé sur d'autres grands fleuves. Par exemple, la prise en compte des études déjà réalisées sur le Congo et leur comparaison avec celles effectuées en Amazonie devraient créer une forte dynamique de coopération tripartite entre l'Amérique du Sud, l'Afrique et l'Europe.

BIBLIOGRAPHIE

GIBBS R.J. (1967), « The Geochemistry of the Amazon River System », Part I. « The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids », *Geological Society of America Bulletin*, n°78, pp. 1203-1232.

GUIMARÃES V., GUYOT J.L. ET CONCEIÇÃO S.C. (1993), *Medição de descarga líquida no Rio Amazonas em Óbidos*, Publ. DNAEE-CGRH, Brasília.

GUIMARÃES V., GUYOT J.L. ET CONCEIÇÃO S.C. (1994), *Medição de descarga líquida em grandes rios. Rio Amazonas em Óbidos. Relatório Técnico da maior medição de descarga líquida realizada no mundo: 279 000 m³/s*. Publ. DNAEE-CGRH, Brasília.

GUYOT J.L., MOLINIER M., OLIVEIRA E. de, CUDO K.J. ET GUIMARÃES V.S. (1993), « Balanço hídrico do Rio Negro », dans *X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Gramada, novembro de 1993, Anais 2, pp. 535-544.

JACCON G., CUDO K.J., (1987), « Medições de descarga líquida dos rios Solimões a Amazonas pelo método do barco em movimento », dans *IIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Rio de Janeiro, pp. 358-369.

HIEZ G., COCHONNEAU G., SÉCHET P. ET MEDEIROS FERNANDES U. (1992), « Application de la méthode du vecteur régional à l'analyse de la pluviométrie annuelle du bassin amazonien », *Veille climatique satellitaire*, n°43, pp. 39-52.

LE COINTE P. (1935), « Les crues annuelles de l'Amazone et les récentes modifications de leur régime », *Annales de Géographie*, n°44, pp. 614-619.

MOLINIER M., DA SILVA MAIA A.C. ET DOS SANTOS D.F. (1991), « Balanço hídrico da bacia amazônica. Metodologia e primeiros resultados » dans *IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, novembro 1991.

MOLINIER M. (1992), « Régionalisation des débits du bassin amazonien » dans *VIII Journées Hydrologiques, Régionalisation en hydrologie et application au développement*, ORSTOM, Montpellier.

MOLINIER M., CUDO K.J. ET GUIMARÃES V. (1992), « Disponibilidade de água na bacia amazônica », dans *Simpósio Int. de Estudos Ambientais em Florestas Tropicais Úmidas, Forest'92*, Rio de Janeiro.

MOLION L.C.B. (1991), « Climate variability and its effects on Amazonian hydrology », dans *Water Management of the Amazon Basin*, Braga B.P.F. & Fernandez-Jauregui C. (eds.), Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo. pp. 261-274.

OLIVRY J.C., BRICQUET J.P. ET THIEBAUX J.P. (1989), « Bilan annuel et variations saisonnières des flux particuliers du Congo à Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui », *La Houille blanche*, n° 3-4, pp. 311-315.

OLTMAN R.E. (1968), « Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon river », *US Geological Survey Circular*, 552, 16 pages.

PARDÉ M. (1936), « Les variations saisonnières de l'Amazone », *Annales de Géographie*, n°45, pp. 502-511.

PARDÉ M. (1954), « Sur le régime et spécialement sur les variations saisonnières des cours d'eau brésiliens », *La Houille blanche*, n°6, pp. 823-846.

ROCHE M.A., JAUREGUI C.F., RIVERA A.A., MENDEZ J.P., RADA E.S. ET VARGAS J.L.M. (1992), *Balance Hídrico Superficial da Bolivia*, PHICAB, ORSTOM, SENAMHI, UNESCO.

RODIER J. (1964), « Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'Ouest du Congo », *Mémoires ORSTOM* 6, ORSTOM, Paris.

RODIER J.A. ET ROCHE M. (1978), *World catalogue of maximum observed flood*, IAHS-AIHS Publication, 143.

SALATI E., MARQUES J. ET MOLION L.C.B. (1978), « Origem e distribuição das chuvas na Amazônia », *Interciencia*, 3(4), pp. 200-205.

RÉSUMÉ

Le bassin amazonien s'étend sur plus de 6 millions de km² et apporte 209 000 m³/s en moyenne à l'océan Atlantique, près de 6 600 milliards de m³ par an. Les apports de matières à l'embouchure sont estimés à 270 millions de tonnes par an de matières dissoutes et 1,2 milliard de matières particulaires. L'équipe du programme HiBAM (*Hidrologia da Bacia Amazônica*) a utilisé des techniques nouvelles comme la transmission des données hydrométéorologiques par satellite ou les mesures de débits par courantométrie à effet Doppler (ADCP). Elle contribue à la modélisation des grands écosystèmes intertropicaux et à l'évaluation des ressources en eau des grands bassins, qui facilitera l'élaboration de bases de données régionales pour la gestion intégrée des ressources en eau.

A bacia Amazônica estende-se por mais de 6 milhões de km² e despeja no oceano Atlântico 209 000 m³/s, em média, cerca de 6 600 bilhões por ano. As substâncias trazidas até a embocadura, são estimadas em 270 milhões de toneladas por ano, para as dissolvidas, e à 1 bilhão e meio para as carregadas. A equipe do programa HiBaM (Hidrografia da bacia Amazônica) utilizou novas técnicas como a transmissão de dados hidrometeorológicos por satélite, as medidas de quantidade foram feitas por *courantométrie* à efeito Doppler (ADCP). Este estudo contribui para a modelização dos grandes eco-sistemas intertropicais e a avaliação das reservas de água das grandes bacias, o que facilitará a elaboração de bases de dados regionais, para uma gestão integrada das reservas em águas.

The Amazon basin covers an area of more than 6 million sq.km. and pours an average of 209,000 cu.m. of water per second into the Atlantic, i.e. nearly 6,600 billion cu.m. per year. It is estimated that over 270 million tons of dissolved matter flow out of the river mouth every year, as well as 1.2 billion tons of solid matter. The team from the HiBAM program (*Hidrologia da Bacia Amazônica*), used new techniques such as satellite transmission of hydrometeorological data and flow measurement by Doppler effect (ADCP). The results are important in constructing models of the great intertropical ecosystems and in calculating the water resources of the great basins, which will enable regional data bases to be created for water resource management.

LES AUTEURS

■ **MICHEL MOLINIER**, hydrologue, directeur de Recherche, actuellement représentant de l'ORSTOM au Cameroun, a été, jusqu'en 1995, représentant de l'ORSTOM au Brésil et coordinateur français de la convention DNAEE-CNPq-ORSTOM et du Programme HiBAm (Hidrologia da Bacia Amazônica). Spécialiste de l'hydrologie des grands fleuves, avant de se consacrer à l'étude des régimes hydrologiques du bassin amazonien, il a travaillé plusieurs années en Afrique où il a, notamment, coordonné un programme de recherche sur le fleuve Congo-Zaïre. Il partage son temps entre des activités de recherche en hydrologie (les grands systèmes d'eau, d'une part, et l'étude des mécanismes hydrologiques sur bassins versants représentatifs et expérimentaux d'autre part), l'administration et l'animation de la recherche.

■ **JEAN-LOUP GUYOT**, hydrologue à l'ORSTOM, docteur en Sciences de l'Eau (Montpellier) et en Géologie Géo chimie (Bordeaux), est actuellement coordinateur français de la convention DNAEE-CNPq-ORSTOM et du Programme HiBAm. Après des expériences variées, tant en France qu'à l'étranger, en hydrogéologie et en hydrogéochimie, il s'est consacré, depuis 1985, à l'étude de l'hydrologie et de la géochimie des fleuves amazoniens, d'abord en Bolivie puis au Brésil. Il est devenu l'un des grands experts de cette région. En 1995, il a obtenu l'Habilitation à Diriger des Recherches.

■ **JACQUES CALLEDE**, ingénieur hydrologue à l'ORSTOM, docteur ingénieur en Géologie dynamique (UPMC – Paris) est un spécialiste de l'élaboration des techniques et des matériels pour la mesure des débits des rivières et des grands fleuves. Il est expert international pour la télétransmission par satellite des données hydrométéorologiques. Il se consacre actuellement à l'installation et au développement d'un réseau de télétransmission par satellite dans le bassin amazonien.

■ **VALDEMAR GUIMARÃES**, ingénieur hydrologue au Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), titulaire d'une pós-graduação en Hydrologie appliquée à l'Institut de recherche hydraulique (IPH) de Porto Alegre (Brésil), est responsable de la gestion du réseau hydrométrique national brésilien. Antérieurement, il s'est consacré, au sein de plusieurs entreprises brésiliennes, nationales ou privées, à l'étude des fleuves et rivières amazoniens dont il est devenu un grand spécialiste.

■ **EURIDES DE OLIVEIRA** est le chef du service hydrologique du DNAEE et coordinateur brésilien de la convention DNAEE-CNPq-ORSTOM. Depuis ses débuts comme ingénieur à l'université fédérale du Paraná, en passant ensuite par l'Institut de recherche hydraulique (pos-graduação en Hydrologie) de Porto Alegre, il s'est toujours consacré, soit comme ingénieur, soit comme professeur, à l'hydrologie et aux problèmes d'homogénéisation des données hydrométéorologiques.

■ **NAZIANO FILIZOLA**, géologue, spécialiste en hydrochimie, est responsable du Réseau Qualité des Eaux du DNAEE. Il est étudiant à l'université de Brasília où il prépare un DEA sur l'hydrogéologie et les flux sédimentaires dans le bassin amazonien brésilien.

Molinier Michel, Guyot Jean-Loup, Callède Jacques,
Guimaraes V., Oliveira E. de, Filizola N. (1997)

Hydrologie du bassin amazonien

In : Théry H. (ed.). *Environnement et développement en Amazonie brésilienne*. Paris : Belin, p. 24-41

ISBN 2-7011-1532-9