

ANEEL - CGRH / CNPq / ORSTOM
HIBAM : Hidrologia da Bacia Amazônica

**Détermination de la hauteur de la Crue de 1953 de l'Amazonie à
ÓBIDOS et retour sur l'Historique
de la Station**

Jacques CALLÈDE & Jean-Loup GUYOT
ORSTOM, CP 7091-Lago Sul, 71619-970 Brasília (DF), Brésil

**Valdemar Santos GUIMARÃES, Eurides de OLIVEIRA
& Naziano PANTOJA FILIZOLA**
ANELL, SGAN 603, 70830-030, Brasília (DF), Brésil

Février 1998

"Une mauvaise mesure est toujours préférable à un très beau calcul"
J.Rodier et M.Roche

Une étude précédente (Callède *et al.*, 1996 et 1997) avait développé l'Historique de la station hydrométrique d'ÓBIDOS et déterminé le décalage altimétrique entre les 2 séries de relevé de hauteur d'eau (1928/1948 et depuis 1968). Un complément dans le nivellement des éléments de détermination de la hauteur de la crue de 1953 et des renseignements complémentaires recueillis sur place amènent à reconsidérer la valeur de ce décalage et à ramener la crue de 1953 en seconde position derrière celle de 1989.

ÓBIDOS est la station hydrométrique de mesure des débits de l'Amazonie la plus aval. A cette station, l'influence de la marée de l'océan Atlantique n'est plus très importante et peut être considérée comme négligeable pour le moment (travaux de recherche en cours). Elle est quand même située à près de 700 km de l'océan.

C'est la station de référence des débits de l'Amazonie. Son bassin versant est de 4.619.000km².

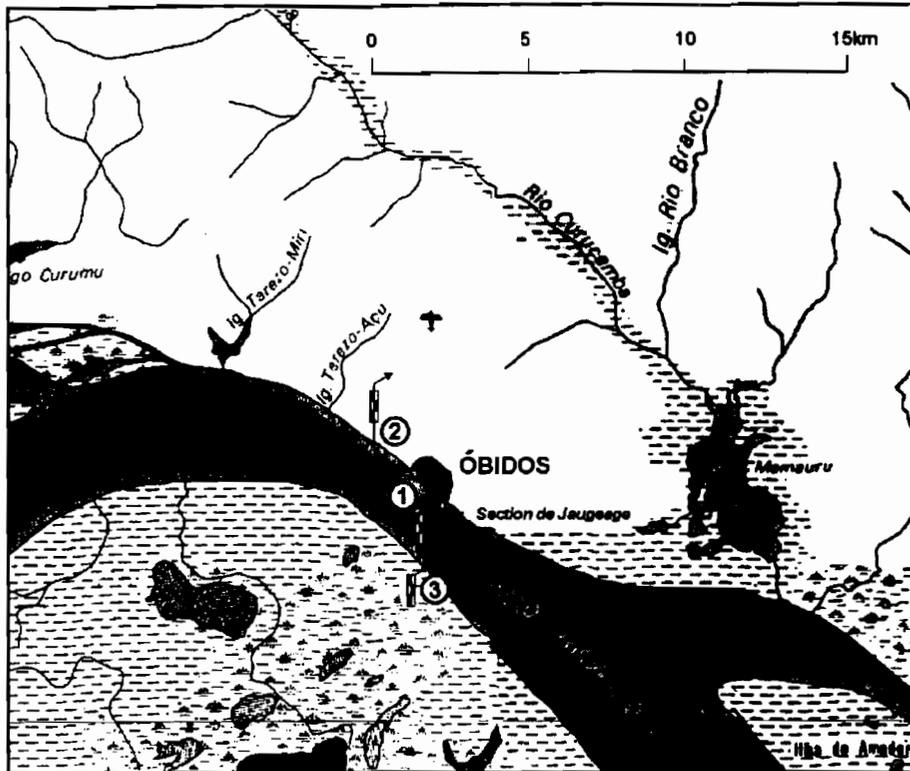
Les coordonnées géographiques sont:

01°56' de latitude Sud

055°30' de longitude Ouest

Pour le moment, l'altitude n'est pas connue de façon précise: la ville serait à 45m environ et la plaine, où coule le fleuve, à une vingtaine de mètres.

1-Historique de la Station



Les diverses stations hydrométriques d'ÓBIDOS

Légende

- 1 : Station du Port
- 2 : Limnigraphe et télétransmission ARGOS
- 3 : Station de la Section de jaugeage

Les Stations hydrométriques successives sont :

1.1. Ancienne échelle

En 1927, une échelle limnimétrique était installée par la Division Hydrographique du Gouvernement brésilien (actuellement Direction de l'Hydrographie et de la Navigation -DHN-) sur un embarcadère du Port d'ÓBIDOS pour les besoins de la navigation. Elle a fonctionné jusqu'en juin 1953, date à laquelle l'embarcadère (et l'échelle) a été détruit par la très forte crue de l'Amazonie.

Les relevés, de bonne qualité, commencent le 11 Décembre 1927. Ils se poursuivent sans aucune lacune journalière jusqu'au 30 Septembre 1947, puis de Mai à Juillet 1948, sans savoir pourquoi (les archives sont muettes sur ce sujet) ils n'ont pas été continués de Juillet 1948 à Mai 1953.

Il n'existe malheureusement aucun rattachement altimétrique connu de cette échelle.

A l'occasion des 3 jaugeages effectués en 1963 et 1964, E.Oltman a essayé de reconstituer le zéro de l'ancienne station "par référence à une ancienne photographie (aimable concours du Département National de Production Minière, Division des Eaux) des lieux de l'échelle limnimétrique des hautes eaux primitive. Heureusement, le Marché municipal d'ÓBIDOS, contre lequel l'échelle limnimétrique primitive a été photographiée, existait durant les missions de 1963-64" (extrait de la publication d'Oltman, 1968). Malheureusement ladite photographie est aujourd'hui introuvable...

L'erreur à craindre est estimée, selon lui, à ± 10 cm (Oltman, 1968). Des repères altimétriques ont été installés, dont le "RP3" utilisé en 1967. Les 2 premiers jaugeages sont donnés avec une hauteur à l'échelle au décimètre près. Le troisième (1964) a sa hauteur indiquée au centimètre. Il est peu probable qu'une échelle limnimétrique ait été installée.

1.2 Echelle de 1967 (Veiga, 1968)

Lors de la mesure de débit de mai 1967, une échelle provisoire, de 6,00 à 7,50 m, a été installée, sans qu'il y soit fait de lecture systématique journalière des hauteurs d'eau. Elle a été calée par rapport au repère RP3, installé par Oltman en 1964 sur une partie du quai, mais retrouvé dans un tel état de vétusté que 2 autres références altimétriques ont été déterminées. Seul subsiste, aujourd'hui, celle du Marché municipal. L'hydrologue s'est efforcé de se caler au même niveau que celui d'Oltman, donc de l'ancienne échelle, en principe.

1.3 Echelle actuelle

L'échelle actuelle a été installée, probablement par la Société Hidrologia S.A, en 1967 car le mois de Janvier 1968 est complet. A cette époque, malheureusement, ces relevés sont de mauvaise qualité: l'observateur ne va lire l'échelle que quelques fois par mois, ne lit qu'à 10cm près (les lectures se terminent toutes par "6"). Ils n'ont servi qu'à reconstituer l'année 1969, disparue des archives.

Le 22 Février 1968, une échelle est installée sur un nouvel embarcadère. Les relevés journaliers, de bonne qualité, sont sans aucune lacune jusqu'à aujourd'hui. Seule manquait l'année 1969: cette année de relevés existe, car les débits mensuels correspondant figurent dans une publication concernant la Décennie Hydrologique Internationale (UNESCO, 1969 à 1979). Elle a pu être reconstituée comme indiqué ci-dessus. Le rattachement altimétrique de la CPRM a été effectué sur au moins 3 repères dont 2 ont disparu en Mars 1997 (réfection de l'embarcadère).

L'échelle a été refaite plusieurs fois, dont en 1975 (d'après la DHN), en 1986 et en 1997 à chaque reconstruction de l'embarcadère. Le zéro est, heureusement, toujours pratiquement resté à la même altitude.

Un limnigraphe est installé début 1982, à 3 700 mètres en amont. Il n'existe pas de nivellement entre les repères "Port" et "Limnigraphe". En moyenne, les hauteurs "limnigraphe" seraient à diminuer de 11cm. Ce décalage n'est pas constant durant l'année hydrologique, du fait de la variation de la pente de la ligne d'eau (étude en cours).

De plus le puits du limnigraphe est à sec quand le niveau de l'Amazone descend en dessous de 0,65 m (échelle Port).

Ce limnigraphe est équipé, depuis 1985, d'une télétransmission via satellites (ARGOS et SCD1).

Enfin en 1969, une batterie d'échelles limnimétrique est implantée au droit de la section permanente de jaugeage, en rive droite, 2 kilomètres en aval du Port. Le zéro de cette échelle est théoriquement calé sur celui de l'échelle Port.

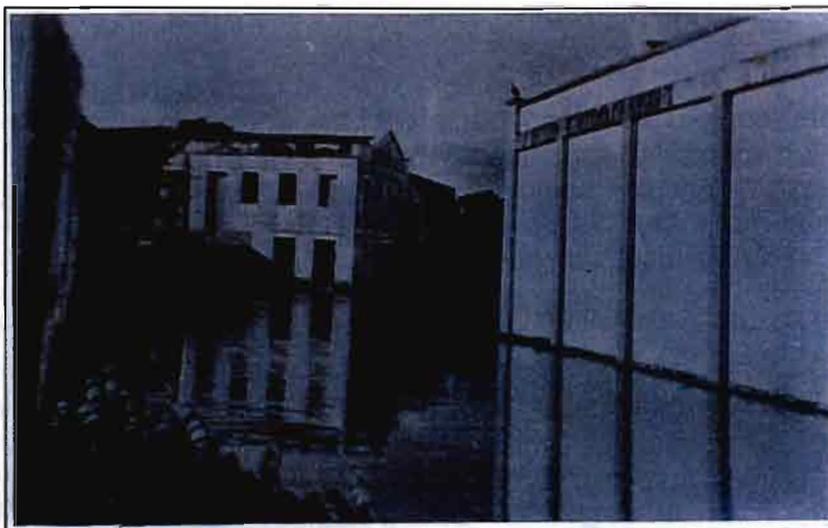
2-La Crue de 1953

Jusque en Mai 1997, tout laissait à penser que la crue de 1953, la plus forte observée à MANAUS, était aussi la plus forte observée à ÓBIDOS. Une enquête sur place a montré que c'était celle de 1989 (8,00m de hauteur à l'échelle).

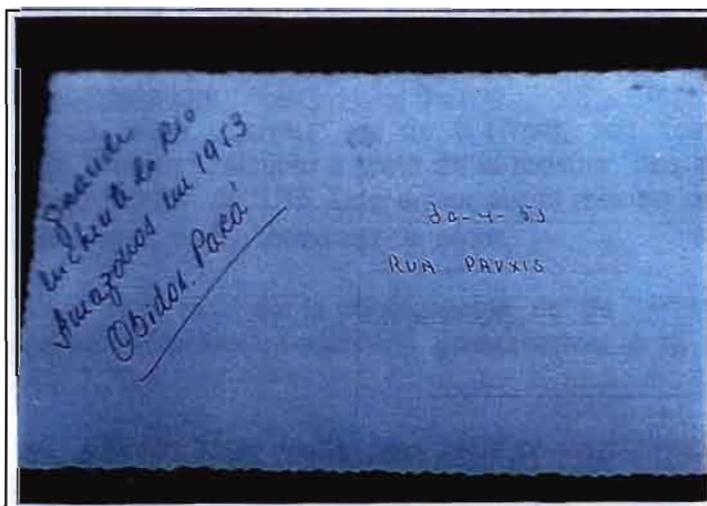
En plus d'indications fournies par l'observateur et d'un niveau de délaissé, il a été possible de disposer d'une photographie de la crue de 1953.

2.1 Exploitation de la photographie de la crue

L'authenticité de cette photographie est certaine: elle porte au verso l'inscription manuscrite "30-4-53 rue Pauxis" et "Grande crue de l'Amazone en 1953. ÓBIDOS. PARÁ".



Sur ce document, deux constructions sont, en Mai 1997, encore dans le même état : au fond la "Farmacia Esculape" (aujourd'hui "Casa das Linhas") et, à droite, le mur de l'usine de sisal ("aniagem"), aujourd'hui arrêtée.



2.1.1 Mesures concernant la "Casa das Linhas"

En s'aidant d'une loupe compte-fils, on mesure:

-niveau de l'eau:	0	pour
-haut de la porte de droite:	7,0mm	(origine trottoir: référence nivelée)
-bas de la fenêtre de droite:	11,6mm	1,87m
-haut de cette fenêtre:	15,5mm	3,55m
-sommet du mur:	19,8 mm	5,30m
		7,02m

Valeurs mesurées sur place avec
la mire de nivellement

La détermination la plus nette concerne la mesure "haut de porte/ haut fenêtre".

Ainsi 8,5mm sur la photographie représente en réalité 3,43m. 1 mm représente 0.403m. Le même calcul sur la hauteur "haut de porte/sommet mur" donne 0,402m. La hauteur "eau/haut de porte" est de 2,82m auquel il faut retrancher 28cm entre niveaux de l'eau et délaissé de crue (0.7mm), soit 2,54m.

Le point nivelé (trottoir) est à 8,28m. En ajoutant la hauteur de la porte (1,87m), l'altitude du sommet de la porte est à 10,15m. Par soustraction des 2,54m, la hauteur de crue est: 7,61m.

Précision de la détermination:

La mesure sur la photographie est faite à $\pm 0.1\text{mm}$. 3 mesures ont été faites, plus 2 autres du délaissé. L'erreur résultante est de 0,22mm (Théorie des Erreurs) sur la photographie, ce qui représente, en cm, une valeur de 9cm. La détermination de la hauteur "eau/haut de porte" (2,82m) est de même ordre de grandeur que la mesure "haut de porte/haut de fenêtre" (3,43m): en admettant une erreur de 1cm sur cette mesure, l'erreur sur la détermination "eau/haut de porte" est de même grandeur. L'erreur totale sera toujours de $\pm 9\text{cm}$.

2.1.2 Mesures concernant l'Usine de sisal

On mesure, près de l'angle de la construction (à cause du risque de distorsions dues à la perspective et aux objectifs):

- délaissé de crue : 0
- bas du bandeau : 57,0mm
- sommet du mur : 72,2mm

soit 15,2mm entre bas du bandeau et le sommet du toit, dont la mesure est de 1,27m. 1mm représente donc 0.083m et la hauteur « délaissé/bas du bandeau » est : 4,76m.

L'altitude du bas du bandeau a été déterminée 4 fois par nivellement: 12,55m.

Le niveau de la crue est : 7,79m

Précision de la détermination:

3 mesures ont été faites. L'erreur est de 0.17mm sur la photographie, soit 1cm en réalité. Mais la hauteur "délaissé/bas du bandeau" (4,76m) est calculée à partir de la mesure "bas du bandeau/sommet du mur" (1,27m), soit une amplification de 3,75. Une erreur sur la mesure de 1cm entraîne une erreur de 4cm sur la détermination. L'erreur totale est de $\pm 4\text{cm}$.

La hauteur estimée de la crue, sur la photographie, est de 7,61m (Casa das Linhas) et 7,79m (Usine). En donnant un poids inversement proportionnel à la précision, la valeur moyenne ainsi pondérée est : 7,73m.

Mais le problème se complique par la date de la photographie: 30 Avril 1953. Sur toute la série des 48 crues observées à ÓBIDOS, la plus précoce a eu lieu le 03 Mai.

En 1953, le maximum de la crue a eu lieu:

- le 09 Juin à MANAUS
- le 04 Juin à PARENTINS
- le 19 Mai à SANTARÉM
- le 15 Mai à TAPERINHA

Il est illusoire d'essayer d'utiliser ces stations pour obtenir la date de la crue de 1953: la crue à ÓBIDOS est souvent plus tardive qu'à SANTARÉM et plus précoce qu'à PARINTINS !

Oltman parle de la crue de "Juin 1953" (Oltman, 1964).

Dans ces conditions, il faut considérer que cette photographie a été prise lors de montée des eaux. Le délaissé correspond à une première pointe de la crue. Cette valeur de 7,73m est une valeur minimale qui a dû être légèrement dépassée quelques semaines plus tard.

2.2 Le niveau du délaissé (nivelé en 1994 et 1997)

Il a été indiqué un niveau du délaissé de la crue de 1953, au droit de la "casa n°152", située "Travessa Siqueira Campos".

Un nivellement, de Juin 1994, donne la hauteur du délaissé à : 7,87m

Le nivellement de Mai 1997 donne 7,87m également.

Précision de l'estimation: de l'ordre de ± 10 cm

2.3 Indication de l'Observateur de la Station hydrométrique

D'après l'Observateur, la crue la plus importante qui se soit produite à ÓBIDOS est celle de 1989 (8,00m). Celle de 1953 vient en second: elle aurait été une dizaine de centimètres plus basse, soit 7,9m.

2.4 Conclusion

Toutes ces indications et estimations permettent d'établir le niveau de la crue comme étant celui du délaissé de la Travessa Siqueira Campos, soit 7,87cm. La précision de la détermination devrait être d'environ ± 5 cm.

3-Les stations hydrométriques en corrélation avec celle d'ÓBIDOS

Avant de définir les diverses altitudes des échelles de la Station hydrométrique d'ÓBIDOS, il est nécessaire de se préoccuper des stations voisines (!) qui vont servir aux corrélations de niveau. La critique de la qualité des observations a été faite. Les fichiers originaux (fichier "en l'état") sont vérifiés année par année (hydrologique) par visualisation graphique en couleurs sur l'écran du micro-ordinateur. Les erreurs grossières de saisie sont éliminées sur ce fichier. Dans le cas de décalages accidentels du zéro des stations, un fichier "opérationnel" est créé (sans modifier pour autant le fichier "en l'état"), en vérifiant son exactitude par corrélations avec la station la plus voisine.

Les stations traitées sont: MANAUS (bien lointaine mais ayant une longue série d'observations), TAPERINHA (pour le même motif), SANTARÉM et PARINTINS.

3.1 Rapide Historique de ces Stations

3.1.1 MANAUS

La station est située à 567km en amont d'ÓBIDOS. Compte tenu de l'influence du Rio Solimões, elle contrôle le bassin versant du Rio Negro et celui du Solimões, soit quelque 2 850 000km².

Installée par l'ancienne Division Hydrographique (aujourd'hui DHN) en 1902, les relevés sont toujours effectués par la Marine brésilienne. Ils sont sans aucune lacune depuis le 15 Septembre 1902 et sans la moindre erreur depuis cette date. Le zéro de l'échelle limnimétrique n'a pas varié depuis 1902.

C'est, sans aucun doute, une des meilleures stations hydrométriques d'Amérique du Sud, par sa grande période d'observations, la qualité de celles-ci et l'intangibilité du zéro de l'échelle. Ceci mérite d'être souligné ici.

3.1.2 TAPERINHA

Elle se situe 46km en aval de SANTARÉM, sur un bras de l'Amazone, en rive droite. Sa distance à ÓBIDOS est 175km. Le bassin versant est 5 165 000km².

Installée et exploitée aussi par la DHN, les relevés y commencent le 01 Décembre 1927. Ils sont, eux aussi, sans aucune lacune et paraissent de bonne qualité. Cependant, la fin d'Octobre 1957 est bizarre: il y a une brusque diminution de niveau de 26cm entre le 31 Octobre et le 01 Novembre. Ce décalage va à l'encontre de celui d'ÓBIDOS. A part cet incident, le zéro de l'échelle limnimétrique n'aurait pas varié de 1927 à fin 1974, date à laquelle cesse la collecte pour les besoins de la DNAEE. Il ne semblerait pas qu'ils continuent pour la DHN (aucun relevé existant dans les archives de la DHN à NITEROI).

3.1.3 SANTARÉM

La station, qui contrôle un bassin versant de quelque 5 100 000km², se trouve à 129km en aval d'ÓBIDOS, à la confluence avec le Rio Tapajós (490 000km²).

-une première station est installée et exploitée par la DHN en 1930, à un emplacement inconnu avec précision. Les relevés commencent le 01 Septembre et se terminent le 31 Mai 1954. L'unique lacune existante se situe entre le 08 Novembre 1941 et le 27 du même mois (et de la même année). Les relevés sont de bonne qualité.

-la station est réinstallée (emplacement inconnu) en 1965, probablement par la Société Hidrologia S.A. Les relevés commencent le 23 Septembre. Mis à part les observations de Mai à Septembre 1966 qui n'existent pas en archives, les relevés sont sans lacune jusqu'au 30 Septembre 1991. Les archives indiquent une autre installation le 07 Avril 1967 (bien que les relevés soient indiqués commençant le 01 Mars 1971), sur l'embarcadère de la CELPA.

Le zéro de cette station est calé à une altitude différente de la précédente. Une excellente corrélation avec TAPERINHA (voir plus loin) indique que ce décalage est de **1,47m**. La station de 1965 est calée plus haute que celle de 1930 (donc donne des observations plus faibles).

Le 29 Septembre 1988, par suite de vandalisme constant, la station est installée sur l'embarcadère du terminal de PETROBRAS (par la suite SHELL), avec un niveau du zéro donnant des lectures sans aucun décalage avec la précédente.

Le 07 Novembre 1994, la station est une nouvelle fois transférée au Port de SANTARÉM - Docks du PARÁ (PORTOBRAS), dans les mêmes conditions (aucun décalage). L'échelle est installée, côte à côte, sur le même pilier qu'une autre observée par la DHN!

Les relevés sont de bonne qualité de 1965 à 1991. Ils sont fragmentaires de 1992 à Septembre 1994, complets et de bonne qualité depuis.

-une station limnimétrique, exploitée par la DHN, fonctionne au Port de SANTARÉM depuis une date inconnue. L'exploitation des périodes communes de relevés (soit 1994 à 1997) permet de donner le décalage entre les 2 échelles: **1,83m** (la station de la DHN donnant des valeurs plus fortes que l'autre station). Ceci a permis de reconstituer les relevés manquants.

En définitive, il a été possible d'établir un fichier "opérationnel" sur la période 1965/1997, contrôlé avec les corrélations de crue, d'étiage et de module annuel (en hauteur) entre SANTARÉM et TAPERINHA, puis ÓBIDOS.

3.1.4-PARINTINS

La station se situe à 157km en amont d'ÓBIDOS. Elle contrôle un bassin versant de 4.447. 000km²

-une première station a été installée et exploitée par la DHN, en 1927. Les relevés sont fractionnaires, avec de fréquents décalages incompréhensibles, ce qui les rendent inexploitable.

-une seconde station est installée et fonctionne depuis Août 1967, probablement par la Société Hidrologia S.A. Mais une fiche d'installation indiquerait la date du 31 Mars 1973...

Les relevés sont complets

De nombreux décalages ont été corrigés sur le fichier "opérationnel" et vérifiés par corrélations (crue, étiage, module) avec ÓBIDOS, avec 2 mois reconstitués (relevés faux)

La période 1967/1996 est pleinement utilisable.

3.2 Corrélations entre les stations

Pour ce travail, les fichiers de hauteur d'eau "opérationnels", c'est-à-dire vérifiés et parfois complétés (SANTARÉM, PARINTINS) ont seuls été utilisés.

Le coefficient de corrélation linéaire r est calculé pour:

-les hauteurs d'eau maximales annuelles (crues)

-les hauteurs d'eau minimales annuelles (étiages)

-les hauteurs d'eau moyennes annuelles (improprement appelées ici "modules", ce mot étant réservé au débit moyen annuel).

Certes, il eut été préférable de travailler en débits, car la relation hauteur-débit est loin d'être linéaire. Mais le résultat sur les hauteurs est bien proche de celui sur les débits et nous n'avons pas le choix pour MANAUS, PARINTINS, SANTARÉM et TAPERINHA.

Rappelons que $r = \frac{\sum(x-x_m)(y-y_m)}{N \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}$

où x et y sont un couple de 2 valeurs correspondant à 2 stations pour la même année, x_m et y_m la moyenne de ces valeurs, N le nombre de couples xy et enfin σ_x et σ_y les écarts-type en x et y .

De même, r varie de -1 (corrélation parfaite mais de sens inverse) à +1 (corrélation parfaite de même sens) en passant par 0 (aucune corrélation entre x et y). Une corrélation commence à être bonne à partir de $r = 0,7$, serrée à partir de $r = 0,8$ et excellente au-dessus de $r = 0,9$ (valeur absolue de r).

Il a été aussi déterminé, pour les corrélations avec ÓBIDOS:

- a , b : coefficients de la droite de régression $y=ax+b$,

- c : intervalle de confiance à 90%,

- d : moyenne de la dispersion entre un couple xy et sa valeur correspondante en y sur la droite de régression.

3.2.1 Corrélations entre MANAUS et TAPERINHA

L'échantillon est de 45 valeurs, sur la période 1928/1974.

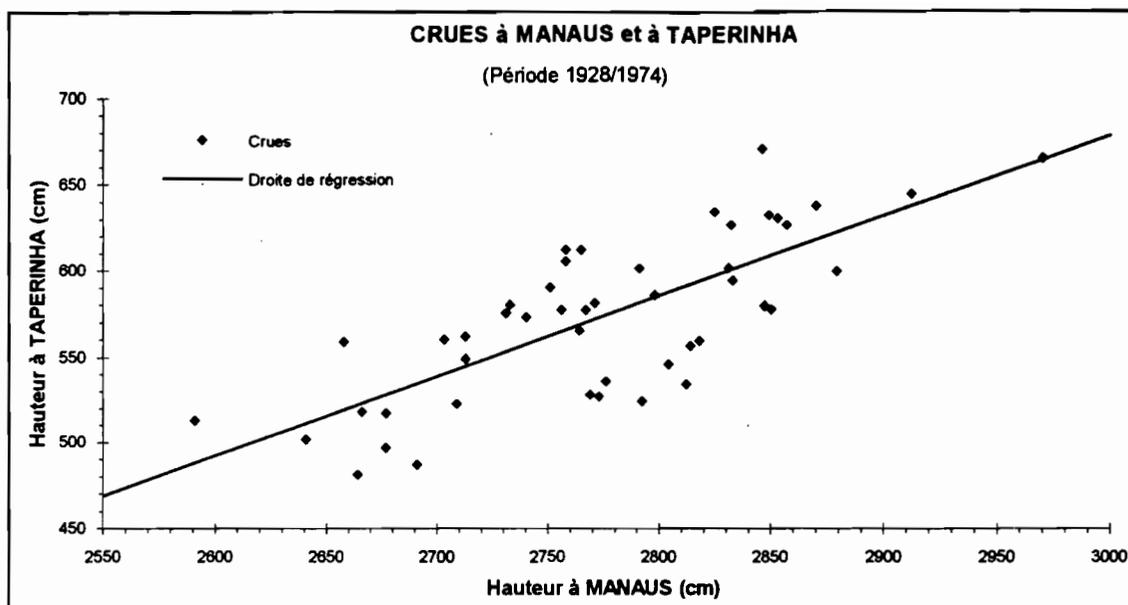
Ces corrélations ne sont qu'indicatives: sur les 742km séparant les 2 stations, il y a les apports non négligeables du Rio Madeira, du Rio Trombetas et du Rio Tapajos. De ce fait, la superficie du bassin versant passe de 2 850 000 à 5 165 000km².

De plus le marnage (écart de hauteur d'eau entre l'étiage et la crue) est bien plus grand à MANAUS qu'à TAPERINHA:

-MANAUS: valeur moyenne 9,89m variant entre 6,21m et 13,67m,

-TAPERINHA: valeur moyenne 4,66m, variant entre 3,16m et 6,11m.

Rappelons que ce marnage tend vers la valeur 0, à l'arrivée dans l'Océan.



Les corrélations sont:

-Crues: $r = 0,759$. Il y a une certaine corrélation, mais un peu lâche pour les raisons évoquées ci-dessus. La dispersion est d'une bonne cinquantaine de centimètres.

-Etiages: $r = 0,933$

-Modules: $r = 0,893$

3.2.2 Corrélations entre MANAUS et ÓBIDOS

L'échantillon porte sur les périodes 1928/1948 et 1968/1992

Le marnage, à ÓBIDOS, est de 5,57m, variant entre 3,99m et 7,02m, de grandeur intermédiaire entre MANAUS et TAPERINHA. La superficie du bassin versant passe de 2.850.000 à 4.619.000km².

-Crues: il apparaît un décalage entre les hauteurs de crues à ÓBIDOS observées de 1928 à 1948 (ancienne échelle) et celles de 1968 à 1992 (échelle actuelle).

Pour la période 1928/1948, $r = 0,809$

Pour la période 1968/1992, $r = 0,965$, ce qui montre une corrélation serrée entre les 2 stations.

Le décalage entre les 2 séries serait de 43cm. L'échelle actuelle d'ÓBIDOS donne des hauteurs plus fortes que l'ancienne: elle a un zéro calé plus bas.

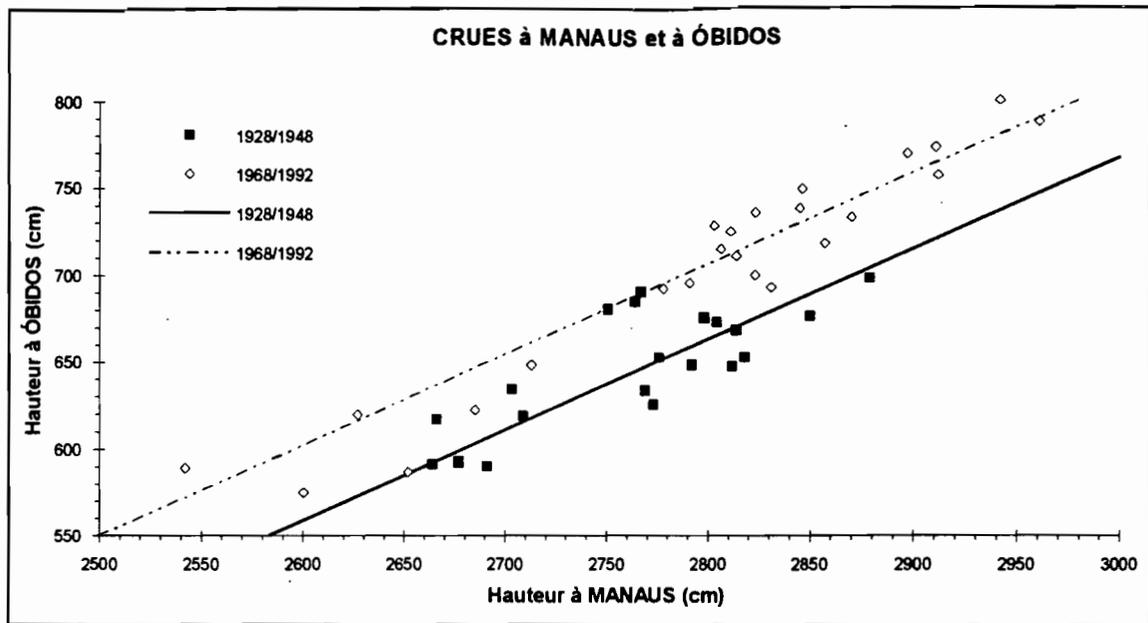
Pour la période 1928/1948, la droite de régression est:

$$HCO = 0,519.HCM - 790,4$$

avec HCO: hauteur de la crue (en cm) à ÓBIDOS et HCM: hauteur de la crue à MANAUS (en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -24 et +30 cm. La dispersion, d , est de 28cm (20 couples xy).

Cette corrélation permet d'évaluer la crue de 1953 (29,70m à MANAUS) à ÓBIDOS: 7,51m (ancienne échelle).



-Étiages: la corrélation en basses eaux devient excellente. Il existe aussi un décalage entre les observations sur l'ancienne échelle et sur l'actuelle.

-ancienne échelle: $r = 0,932$

-échelle actuelle: $r = 0,970$

Le décalage ne serait plus que de 26cm.

Pour la période 1928/1948, la droite de régression est:

$$HEO = 0,517 \cdot HEM - 824,4$$

avec HEO: hauteur de l'étiage (en cm) à ÓBIDOS et HEM: hauteur de l'étiage à MANAUS (en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -30 et +38 cm. La dispersion, d , est de 24cm (17 couples xy).

-Modules:

-ancienne échelle: $r = 0,975$

-échelle actuelle: $r = 0,979$

La corrélation est encore bien meilleure !

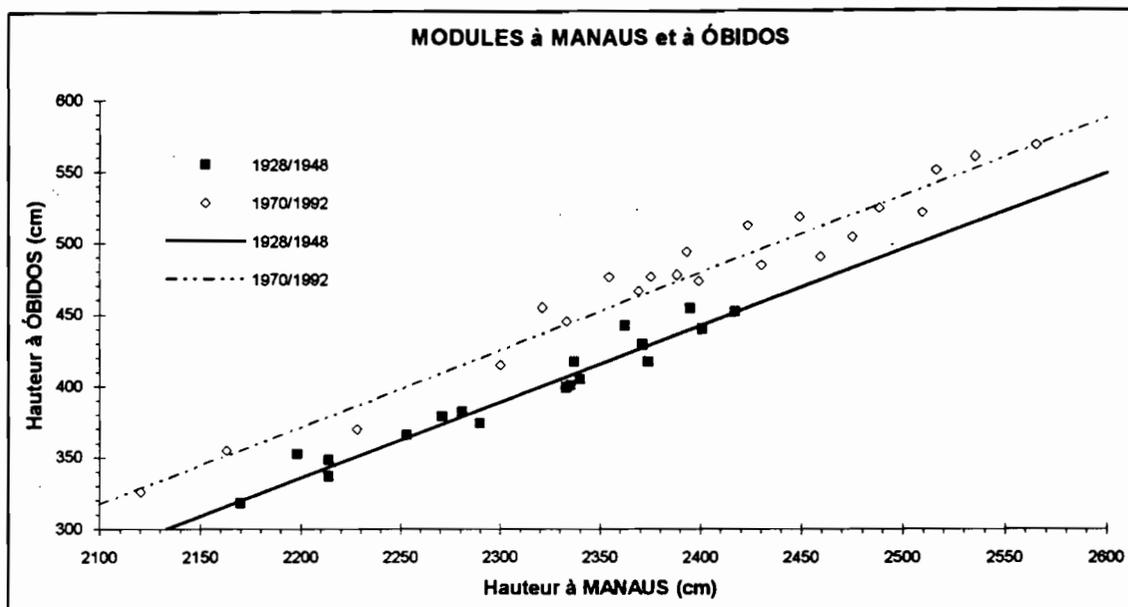
Ecart entre échelles ancienne et actuelle: 36cm.

Pour la période 1928/1948, la droite de régression est:

$$HMO = 0,527 \cdot HMM - 821,6$$

avec HMO: hauteur du module (en cm) à ÓBIDOS et HMM: hauteur du module à MANAUS (en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -12 et +11 cm. La dispersion d n'est plus que de 12cm (17 couples xy).



3.2.3 Corrélations entre TAPERINHA et ÓBIDOS

L'échantillon correspond aux périodes 1928/1948 et 1968/1974.

Rappelons que le marnage moyen est de 4,66m à TAPERINHA et 5,57m à ÓBIDOS. La superficie du bassin versant est de 5 165 000km² à TAPERINHA et 4 619 000km² à ÓBIDOS.

-Crues:

On ne retrouve plus la différence entre la série 1928/1948 et celle de 1968/1974. L'échantillon 1968/1974 n'est que de 6 valeurs. La seule explication pourrait provenir d'un décalage non décelé sur le zéro de l'échelle de TAPERINHA.

La corrélation pour la période 1928/1948 est très bonne: $r = 0,917$.

La droite de régression est:

$$HCO = 0,957.HCT + 125,8$$

avec HCO: hauteur de la crue (en cm) à ÓBIDOS et HCT: hauteur de la crue à TAPERINHA (en cm).

Cette droite pourrait s'appliquer à l'échantillon complet.

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -20 et +18 cm. La dispersion, d , est de 6cm (21 couples xy).

A partir de la crue de 1953 de TAPERINHA (6,65m), celle d'ÓBIDOS est estimée à 7,62m (ancienne échelle).

-Étiages:

Ici non plus, il n'y a pas de différence entre séries 1928/1948 et 1968/1974.

La corrélation pour la période 1928/1948 est excellente: $r = 0,972$.

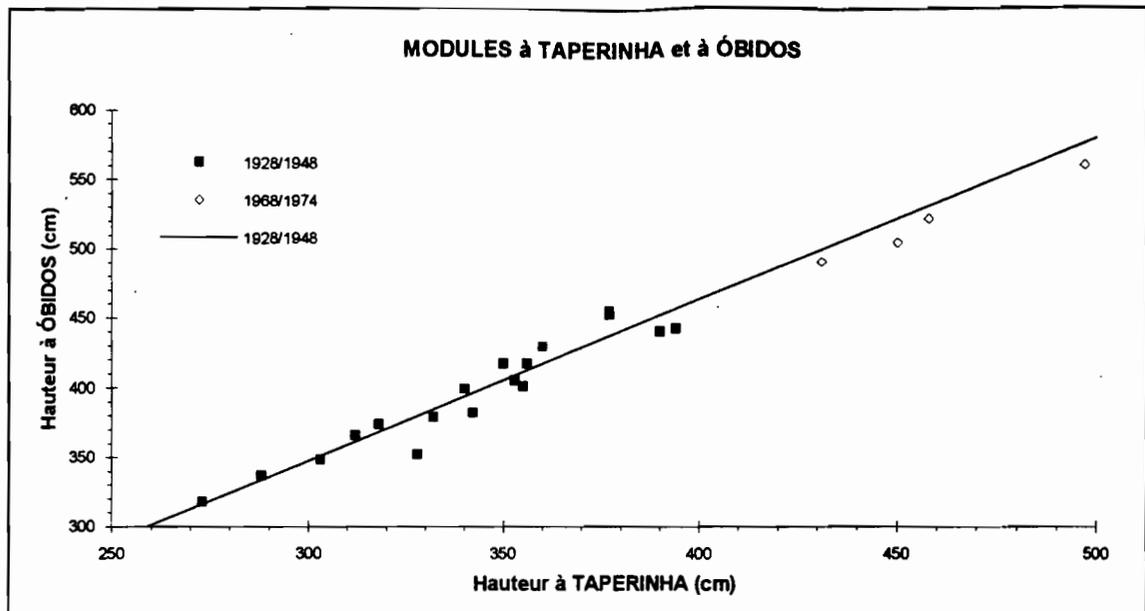
La droite de régression est:

$$HEO = 1,336.HET - 46,9$$

avec HEO: hauteur de l'étiage à ÓBIDOS et HET: hauteur de l'étiage à TAPERINHA (en cm).

De même, cette droite pourrait s'appliquer à l'échantillon complet.

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -22 et +22 cm. La dispersion, d , est de 10cm (19 couples xy).



De même ici, cette droite s'applique à l'échantillon complet.

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -15 et +15 cm. La dispersion, d , est de 9cm (18 couples xy).

3.2.4 Corrélations entre TAPERINHA et SANTARÉM

L'échantillon correspond aux périodes 1931/1953 et 1967/1974.

Le marnage moyen est de 4,66m à TAPERINHA et 4,78m à SANTARÉM. La superficie du bassin versant est pratiquement la même: 5 165 000km².

Ces corrélations servent essentiellement à déterminer le décalage du zéro de l'échelle de SANTARÉM en 1967 (le zéro de l'échelle de TAPERINHA est considéré, pour le moment, comme n'ayant jamais varié).

-Crues:

Les corrélations sont excellentes.

Pour la période 1931/1953, $r = 0,989$

Pour la période 1967/1974, $r = 0,994$

La différence en y entre les 2 droites de régression donne un décalage de 1,47m. Le zéro de l'échelle actuelle est plus haut que celui de l'ancienne échelle.

-Etiages:

Les corrélations sont ici un peu moins serrées.

Pour la période 1930/1953, $r = 0,977$

Pour la période 1965/1974, $r = 0,937$

La différence en y entre les 2 droites de régression donne un décalage de 1,48m.

-Modules:

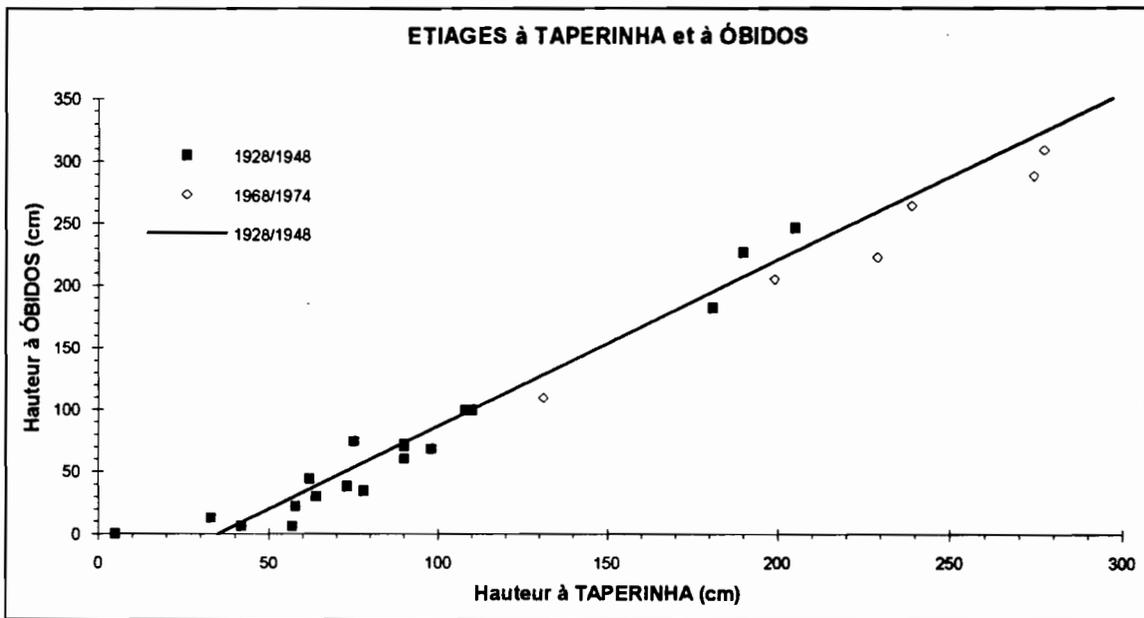
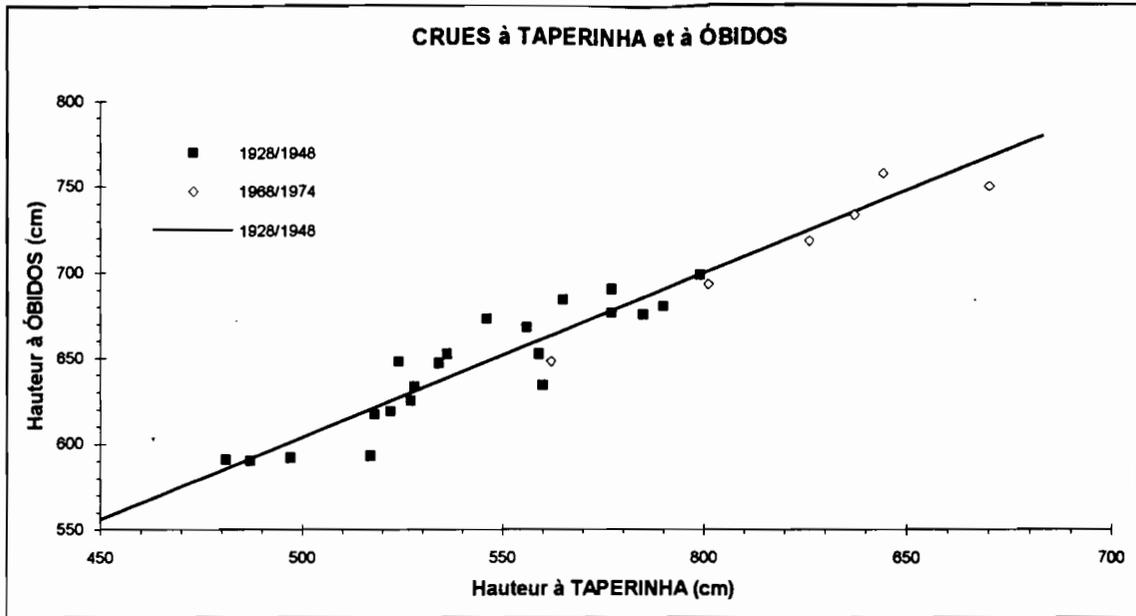
Les corrélations sont excellentes.

Pour la période 1930/1952, $r = 0,991$

Pour la période 1966/1973, $r = 0,999$

La différence en y entre les 2 droites de régression donne un décalage de 1,45m.

Le décalage définitif entre l'ancienne échelle et l'actuelle est: **1,47m**



-Modules:

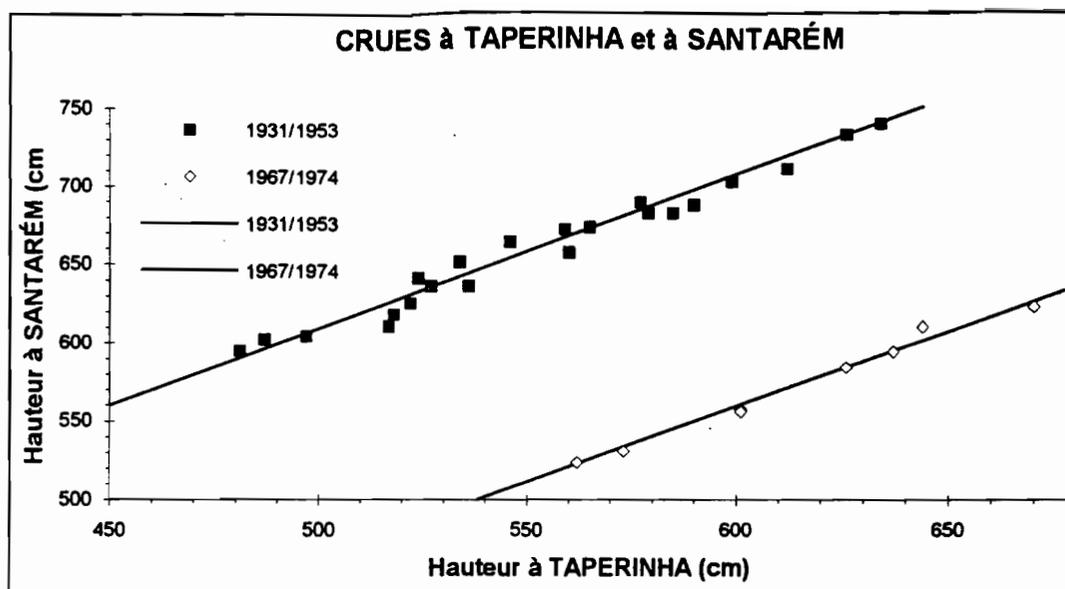
Ici non plus, il n'y a pas de différence entre la série 1928/1948 et celle de 1968/1974. La corrélation pour la période 1928/1948 est excellente: $r = 0,957$.

La droite de régression est:

$$HMO = 1,158 \cdot HMT - 0,5$$

avec HMO: hauteur du module à ÓBIDOS et HMT: hauteur du module à TAPERINHA

(en cm).



3.2.5 Corrélations entre SANTARÉM et ÓBIDOS

L'échantillon correspond aux périodes 1931/1948 et 1968/1997.

Rappelons que le marnage moyen est de 4,78m à SANTARÉM et 5,57m à ÓBIDOS.

La superficie du bassin versant est 5 165 000km² à SANTARÉM et 4 619 000km² à

ÓBIDOS.

-Crues:

Il faut distinguer deux périodes: 1931/1948 et 1968/1997.

La corrélation pour la période 1931/1948 est très bonne: $r = 0,958$.

La droite de régression est:

$$HCO = 1,072 \cdot HCS - 54,2$$

avec HCO: hauteur de la crue (en cm) à ÓBIDOS et HCS: hauteur de la crue à SANTARÉM (en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -12 et +9cm. La dispersion, d , est de 5cm (18 couples xy).

Ceci permet d'estimer la crue de 1953, à ÓBIDOS, à 7,71m.

Pour la période 1968/1995, la corrélation est meilleure: $r = 0,978$

Le décalage entre les 2 séries est de 1,43m.

-Étiages:

Pour la période 1930/1946, $r = 0,963$

La droite de régression est:

$$HEO = 1,072 \cdot HES - 54,2$$

avec HEO: hauteur de l'étiage à ÓBIDOS et HES: hauteur de l'étiage à SANTARÉM (en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -15 et +33cm. La dispersion, d , est de 16cm (17 couples xy).

Pour la période 1968/1995, la corrélation est meilleure: $r = 0,986$
Le décalage entre les 2 séries est de 1,46m.

-Modules:

Les corrélations sont très bonnes.

Pour la période 1930/1945, $r = 0,955$

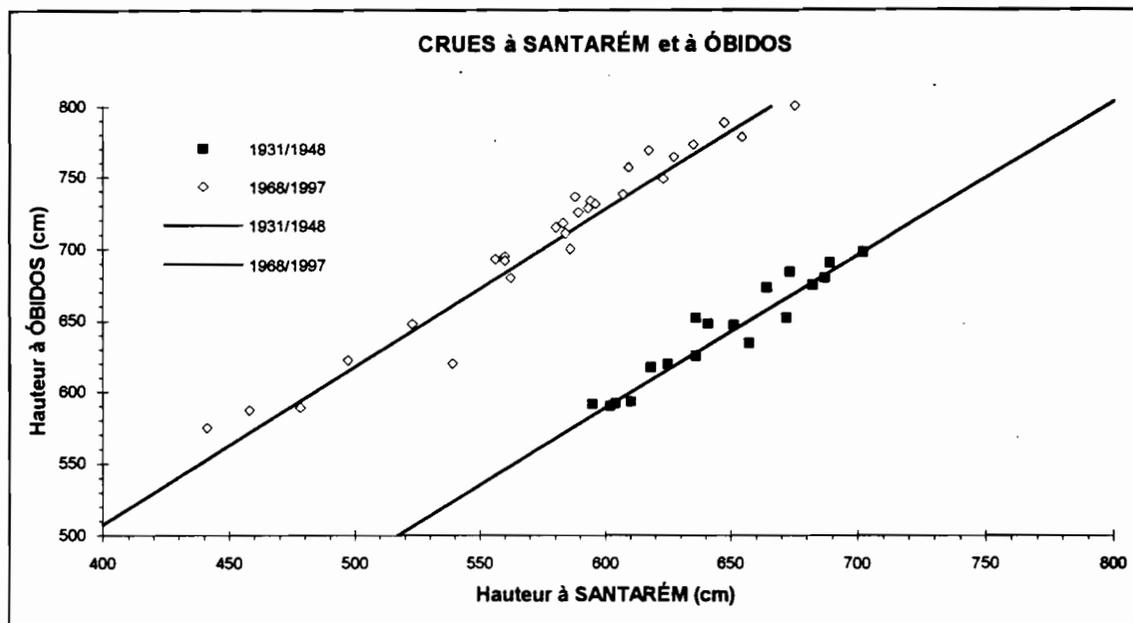
La droite de régression est:

$$HMO = 1,127.HMS - 86,6$$

avec HMO: hauteur du module à ÓBIDOS et HMS: hauteur du module à SANTARÉM (en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -16 et +17cm. La dispersion, d , est de 10cm (16 couples xy).

Pour la période 1968/1995, la corrélation est de même ordre: $r = 0,959$
Le décalage entre les 2 séries est de 1,45m.



Conclusion sur le décalage ÓBIDOS/SANTARÉM: les valeurs sont très proches.
Valeur adoptée: **1,45m**.

Il ressort qu'entre un décalage de 1,47m entre l'ancienne échelle et l'actuelle à SANTARÉM (d'après la corrélation avec TAPERINHA) et celui de 1,45m entre SANTARÉM et ÓBIDOS, il n'apparaît, ici aussi, aucune modification de zéro sur la station d'ÓBIDOS. Ceci à condition qu'aucun décalage de zéro n'existe réellement à TAPERINHA.

3.2.6 Corrélations entre ÓBIDOS et PARINTINS

L'échantillon correspond à la période 1970/1996.

Le marnage moyen est de 5,57m à ÓBIDOS et 8,01m à PARINTINS. La superficie du bassin versant est de 4 619 000km² à ÓBIDOS et 4 447 000km² à PARINTINS.

-Crues:

La corrélation pour la période 1971/1997 est excellente: $r = 0,988$.

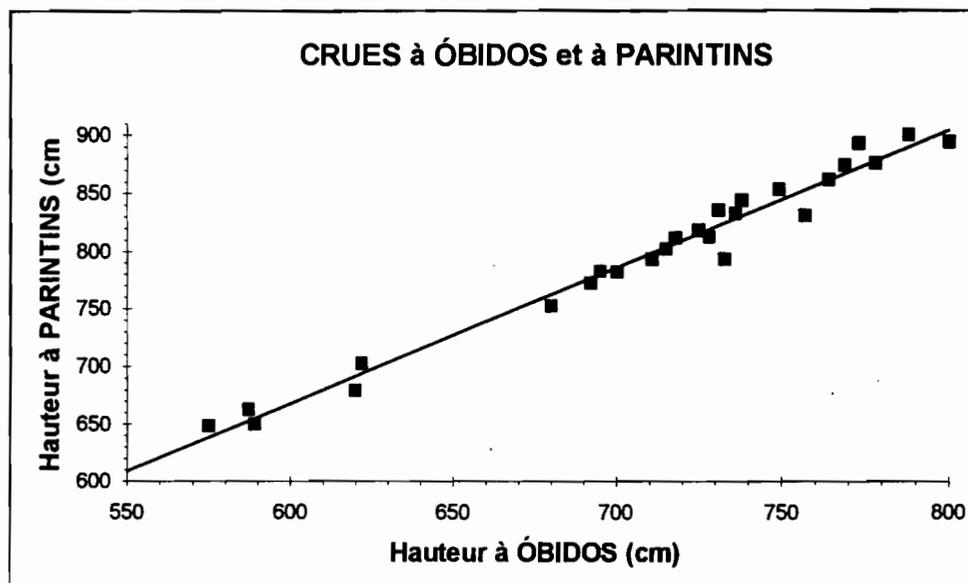
La droite de régression est:

$$HCP = 1,177.HCO - 37,9$$

avec HCO: hauteur de la crue à ÓBIDOS et HCP: hauteur de la crue à PARINTINS

(en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -15 et +15cm. La dispersion, d , est de 12cm (26 couples xy).



-Etiages:

La corrélation est aussi excellente: $r = 0,997$.

La droite de régression est:

$$HEP = 1,215.HEO - 65,9$$

avec HEO: hauteur de l'étiage à ÓBIDOS et HEP: hauteur de l'étiage à PARINTINS

(en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -10 et +10cm. La dispersion, d , est de 3cm (25 couples xy).

-Modules:

La corrélation est toujours excellente: $r = 0,997$.

La droite de régression est:

$$HMP = 1,209.HMO - 62,7$$

avec HMO: hauteur du module à ÓBIDOS et HMP: hauteur du module à PARINTINS

(en cm).

L'intervalle de confiance à 90%, c , est compris entre -8 et +7cm. La dispersion, d , est de 6cm (25 couples xy).

3.3 Conclusions sur les corrélations

Il apparaît que les stations ci-dessus sont intimement liées, avec des coefficients de corrélation généralement supérieurs à 0,9. Ce qui demeure incompréhensible, pour le moment, est le fait que le décalage entre les zéros des échelles d'ÓBIDOS est décelable sur la corrélation MANAUS/ÓBIDOS mais invisible sur celle entre TAPERINHA/ÓBIDOS. Une analyse sur place, encore plus complète, de l'historique de TAPERINHA s'avère absolument nécessaire.

3.4 Niveau de la crue de 1953 sur l'ancienne échelle

Le niveau de la crue de 1953 est estimé par Oltman, en 1963 (soit 10 années plus tard) à 7,5m en se basant, à cette époque, sur une enquête auprès des habitants qui se souvenaient de cette crue. Il estimait aussi ce niveau avec les corrélations avec MANAUS (7,5m) et TAPERINHA (7,6m) (Oltman, 1968).

Les corrélations, établies plus haut pour ÓBIDOS, donnent:

- 7,51m à partir de MANAUS (donc en accord avec la valeur calculée par Oltman), avec une dispersion $d = 28\text{cm}$,
- 7,62m à partir de TAPERINHA (également en accord avec la valeur calculée par Oltman) avec une dispersion $d = 6\text{cm}$,
- 7,71m à partir de SANTARÉM avec une dispersion $d = 5\text{cm}$.

La moyenne, pondérée en fonction de l'inverse de la dispersion d , des hauteurs obtenues par les corrélations est: 7,65m. Cette valeur est bien voisine de la hauteur du délaissé (7,5m) déterminée par Oltman en 1963.

Le niveau de la crue de 1953, sur l'ancienne échelle, peut être estimée à 7,55m (en donnant un poids supérieur au délaissé par rapport aux calculs de corrélation).

3.5. Evolution interannuelle des débits de l'Amazone

La série d'observations du niveau de l'Amazone à MANAUS commence en 1902 et les relevés sont d'excellente qualité. Comment, sur pratiquement un siècle, ont évolué les débits du Fleuve ?

La méthode des "Moyennes mobiles" permet de lisser les fluctuations d'une année à l'autre. Il apparaît que la période de 5 ans est la mieux appropriée pour ce travail.

Le calcul a été effectué sur les crues, les étiages et surtout les modules.

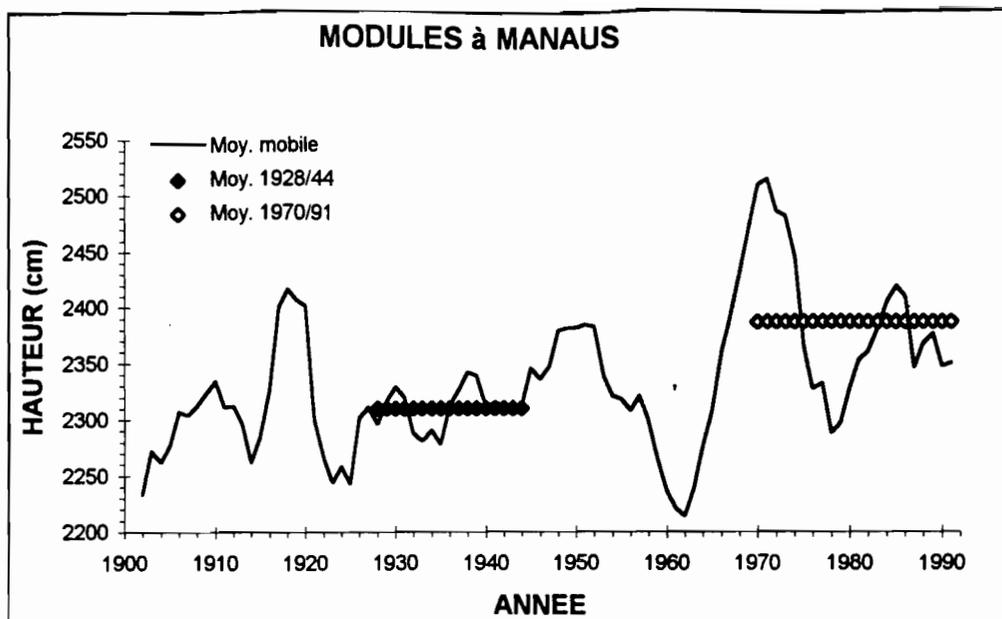
3.5.1 Evolution interannuelle à MANAUS

Il apparaît une légère tendance à l'augmentation des niveaux: 39cm pour les crues, 60cm pour les étiages et 76cm pour les modules.

La cause ne peut se trouver que dans une augmentation de la pluviométrie ou du coefficient de ruissellement (ou des deux, ensemble).

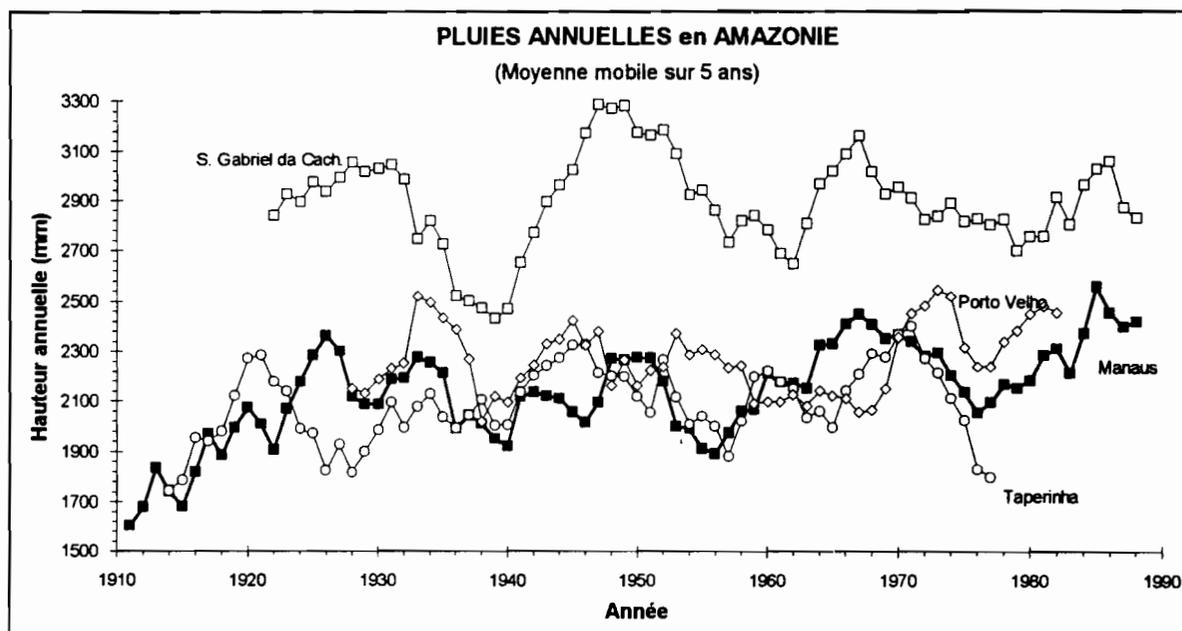
Une augmentation du coefficient de ruissellement lié à la déforestation est une conclusion qui se justifie bien actuellement, vu l'importance de celle-ci durant ces dernières décennies.

Mais une déforestation entraîne une augmentation des crues (ce qui est le cas) et une diminution des débits d'étiage à cause de la diminution des possibilités de stockage de l'eau dans le sol. Ce qui fut le cas en 1997.



La seconde hypothèse concernerait une augmentation de la pluviométrie. Là-aussi les moyennes mobiles, sur 5 ans, ont été utilisées sur 4 stations de longue durée: MANAUS, SÃO GABRIEL DA CACHOEIRA, PORTO VELHO et TAPERINHA.

- MANAUS a une série très complète (il manque seulement 4 mois, qui ont été reconstitués avec des stations voisines) de 1911 à 1992,
- SÃO GABRIEL DA CACHOEIRA, située sur le Rio Negro à 850km en amont de MANAUS, a une série allant de 1922 à 1992,
- PORTO VELHO, sur le Rio Madeira (à 700km de MANAUS) a des observations allant de 1914 à 1988,
- enfin TAPERINHA est observé de 1928 à 1981.

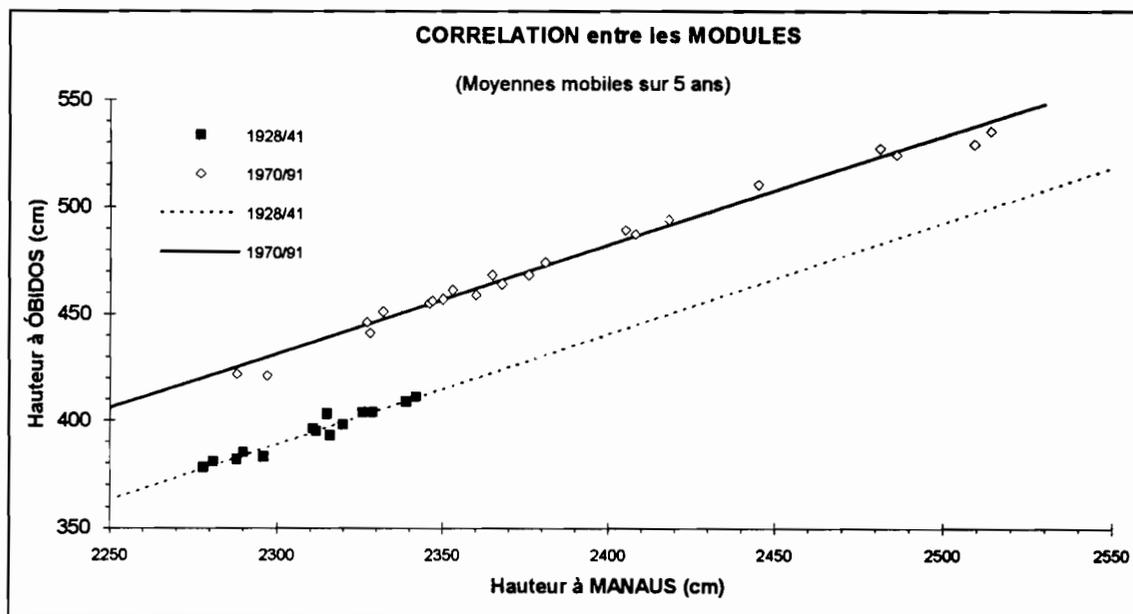


Il apparaît que, à l'exception de SÃO GABRIEL DA CACHOEIRA, il existe une tendance à l'augmentation de la pluie, passant de 2100mm (vers 1920/1930) à 2300mm depuis 1964.

Ceci correspond assez aux travaux de Y. Tardy et J-L. Probst (Tardy & Probst, 1992) qui considèrent qu'à un déficit pluviométrique sur une région donnée (l'Afrique) correspond un excédent sur une autre région du Monde (l'Amazonie): "Finalement, tout se passe comme s'il s'agissait d'un effet de compensation pluviométrique: la masse d'eau à distribuer est constante mais se répartit inégalement selon les années sur chacune des régions considérées" (Extrait d'une de leurs publications)

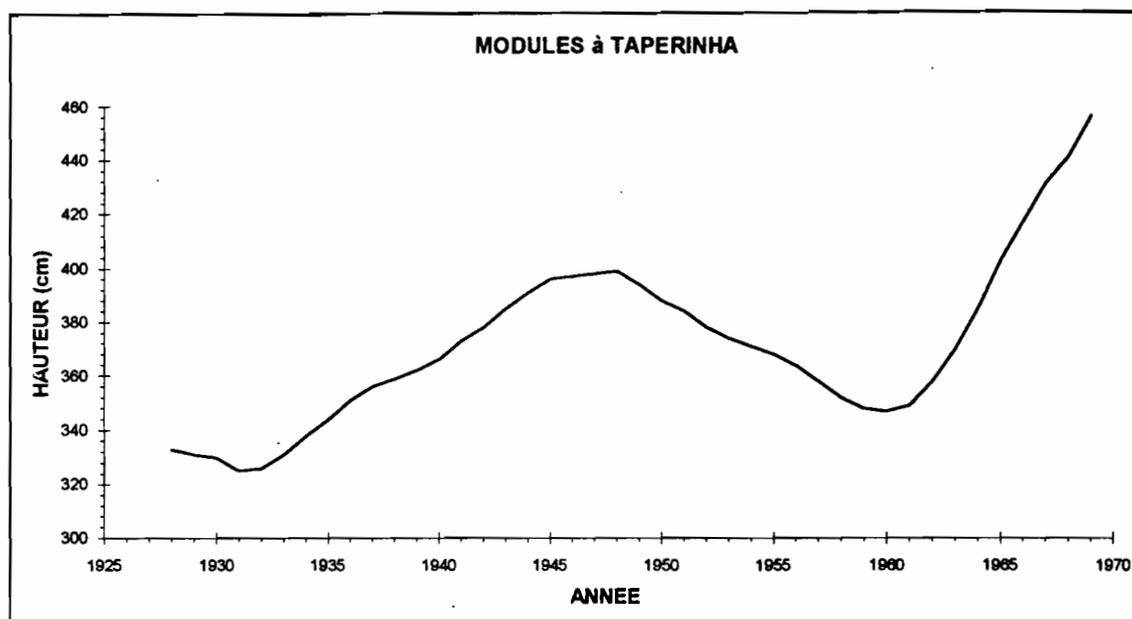
3.5.2 Corrélation entre les modules (moyennes mobiles) de MANAUS et d'ÓBIDOS

Cette corrélation est excellente.
Pour la période 1928/1941, $r = 0,973$
Pour la période 1970/1991, $r = 0,993$



3.5.3 Evolution des modules à TAPERINHA

L'échantillon est trop réduit pour en tirer une indication précise sur l'importance de l'augmentation.



3.5.3 Evolution des modules à MANAUS, ÓBIDOS et TAPERINHA

L'évolution des débits présente la même allure. Ce que laissait supposer l'excellence des corrélations à ces trois stations.

4-Altitude des zéros des échelles d'ÓBIDOS

4.1 Altitude du zéro de l'échelle actuelle (1968)

Les nivellements successifs, depuis 1968, indiquent un zéro situé 8,144 m en-dessous d'un repère CPRM "RN4" situé dans l'enceinte du Port d'ÓBIDOS. Ceci a été contrôlé en 1996, ainsi que les altitudes des 2 autres repères (respectivement 8,053 et 8,145m). En mai 1997, seul le repère "8,053" subsiste et l'échelle, reconstruite, est bien avec un zéro calé 8,053m sous le repère et 8,498m sous le repère du Marché Municipal.

Une borne existe, en façade de l'Usine de sisal ("aniagem"). Elle porte comme inscription "RN A52 7,469 27/7/65". Son altitude est : 7,663m par rapport aux repères précédents. Elle fait partie des nombreux repères, installés par Hidrologia S.A., la DHN et la CPRM depuis 1965 aux alentours du Port d'ÓBIDOS.

Les archives de la DHN indiquent une profusion de calages du zéro de l'échelle:

6,792m en 1967

7,353m en 1969

7,310m en 1971

7,532m en 1972

7,525m en 1973

8,025m en 1974

8,137m et 8,144m (repère CPRM) le 05 Décembre 1976

7,677m en 1981

, ce qui laisse à supposer que ces nivellements ne se sont pas faits par rapport au même repère, la continuité des hydrogrammes étant très bonne. De plus, les relevés disponibles sont des "copies de copies" (les relevés originaux, écrits de la main de l'Observateur, ont disparus). Dans ces conditions il n'est guère possible de prendre en compte ces divers "décalages", qui ont pu déjà être corrigés sur une des "copies"!

4.2 Altitude du zéro de l'échelle de 1967

Il est indiqué, plus haut (1.1.3) que cette échelle aurait été calée sur le repère RP3 installé par Oltman en 1964/1965, *donc a priori au même niveau.*

L'unique repère de rattachement qui existe encore est la première marche de l'escalier du Marché Municipal, qui serait à 8,42cm au-dessus du zéro de l'échelle (Veiga, 1968). Deux récents nivellements (1996 et 1997) indiquent que le repère du Marché est à 8,50m, par rapport à l'échelle actuelle. Le zéro de l'échelle "1967" serait 8cm plus haut. La seule conséquence pratique est d'augmenter de 8 cm la cote du jaugeage de Mai 1967. Mais cette valeur de 8,50m correspond curieusement à l'altitude du second repère voisin, malheureusement disparu (Veiga, 1968). Il est possible que dans la publication Veiga s'est glissé, lors de la typographie, une inversion des altitudes des repères...

4.3 Altitude du zéro de l'ancienne échelle

Oltman en 1963/64 s'est efforcé (voir en 1.1.1) de retrouver le zéro de l'ancienne échelle de 1928 (Oltman, 1968). Normalement, le zéro de l'échelle ancienne devrait être à la même altitude que celui de l'actuelle. C'est avec pareille hypothèse que les débits de cette période ont été calculés à l'occasion de la Décennie hydrologique internationale (UNESCO, 1971). Ceci est corroboré par les corrélations TAPERINHA/ÓBIDOS.

Mais c'est peu probable.

La crue de l'Amazone de 1953 est à la cote 7,55m sur l'ancienne échelle. Sur les niveaux observés de l'échelle actuelle, cette valeur (qui correspondait, en 1964, à la plus forte crue connue à ÓBIDOS) a été dépassée 6 fois de 1968 à 1997 (1975, 1976, 1982, 1989, 1994 et 1997) et pratiquement égalée en 1971.

Les moyennes mobiles, sur 5 ans, du niveau de l'Amazone à MANAUS montrent qu'actuellement le Fleuve est en période excédentaire. Mais cela ne permet pas d'affirmer que les 7 fortes crues de ces trois dernières décennies sont à mettre totalement sur le compte de cette augmentation de débit.

Les débordements commencent aujourd'hui en ville pour une hauteur à l'échelle d'environ 7,6m. Cette cote correspond à celle des inondations du lit majeur en face d'ÓBIDOS, comme l'indique la fiche de réinstallation de la station en 1971. Pour Oltman, cette hauteur n'est que 6,9m (Oltman, 1968).

Sur la photographie de la crue de 1953, le niveau de l'eau serait à 7,79m (échelle actuelle) alors que la crue aurait atteint 7,55m sur l'ancienne échelle.

Le plus plausible est l'existence d'un décalage entre les zéros des échelles.

Trois approches ont été utilisées pour définir le décalage:

-la crue de 1953, bien sûr.

Sur l'ancienne échelle, la hauteur de cette crue serait de 7,55m.

Sur l'échelle actuelle, cette hauteur serait de 7,87m.

Le décalage est: 32cm.(le zéro de l'ancienne échelle étant plus haut que celui de l'actuelle).

-les corrélations entre MANAUS et ÓBIDOS

Les décalages seraient de 43, 26 et 36cm, avec toujours le zéro de l'ancienne échelle plus haut que celui de l'actuelle.

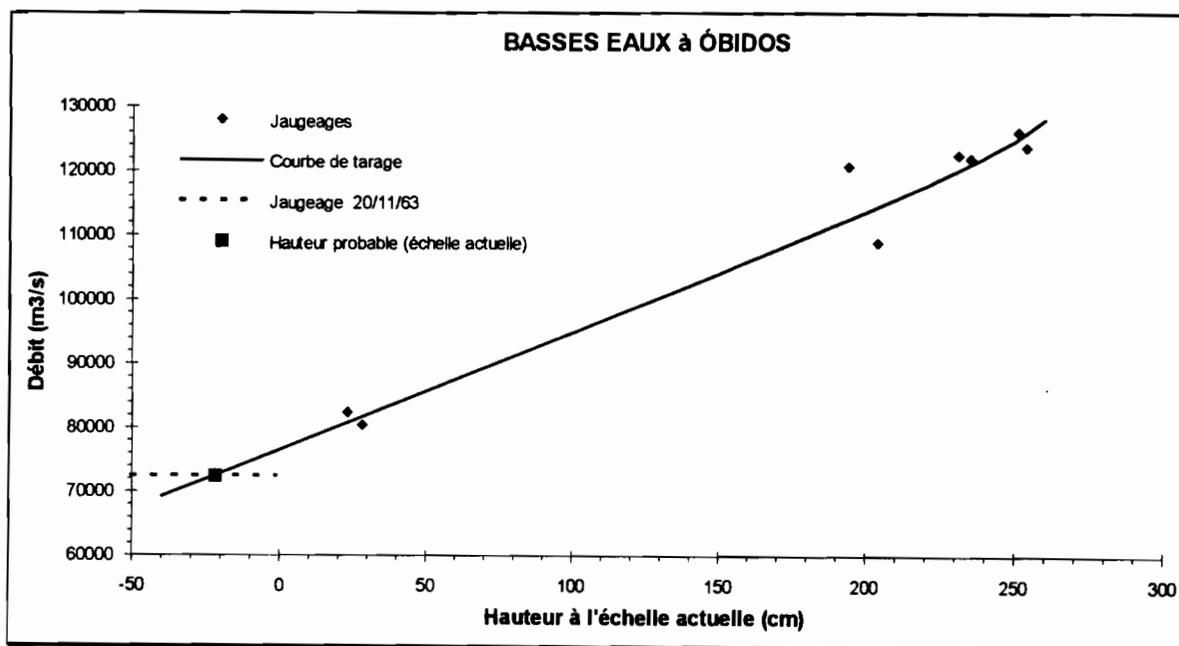
-le jaugeage "Oltman" de Novembre 1963

Effectué les 20 et 21 Novembre 1963, il se réfère à une hauteur à l'échelle de -0,5m. C'est un excellent jaugeage. Le bateau était ancré et 12 mesures de vitesse de l'eau ont été effectuées sur chaque verticale (nombre de verticales inconnu).

Le débit mesuré est de 72 500m³/s.

En basses eaux, la courbe de tarage est rarement influencée par la variation du gradient de la pente de la surface libre de la rivière. Celle utilisant les 8 jaugeages de basses eaux (ceux effectués par la méthode du "moving boat" n'ont pas été retenus) montre que ce jaugeage est décalé de 28cm.

Les 2 autres jaugeages effectués par Oltman sont difficiles à utiliser, car ils sont effectués en moyennes et hautes eaux (non-univocité de la courbe de tarage).



-le calcul sur les Modules à ÓBIDOS

Il avait été utilisé (Callède *et al.*, 1976) la différence entre les valeurs moyennes annuelles (modules) des hauteurs d'eau observées de 1927 à 1948 sur l'ancienne échelle et depuis 1968 sur l'actuelle.

La distribution de ces valeurs moyennes annuelles suivrait, en vertu du Théorème central limite (vu l'importance du bassin versant), une loi normale (loi de GAUSS). La différence entre la moyenne de chaque échantillon donnerait la valeur du décalage.

Avec les hauteurs d'eau, l'échelle ancienne (18 ans d'observations) donne une moyenne interannuelle de 3,96 m.

L'échelle actuelle (25 ans d'observations) donne 4,79 m.

Le décalage serait ainsi de 83 cm.

Mais les 2 échantillons ne se situent pas dans des périodes de même hydraulicité. (voir graphique en 3.5.1).

La période 1928/1944 donne une valeur moyenne des modules (moyennes mobiles sur 5 ans) de 23,10m à MANAUS, tandis que 1970/1991 donne 23,86m à cette station.

Aussi, la méthode n'est pas applicable sous cette forme. Il faut tenir compte de l'augmentation des hauteurs d'eau dans l'intervalle entre les 2 périodes.

Les valeurs moyennes des hauteurs d'eau à ÓBIDOS sont respectivement de 3,94 et 4,74m.

S'il n'y avait pas de décalage entre les zéros des échelles, les valeurs moyennes à ÓBIDOS devraient se distribuer sur la droite de régression de la corrélation MANAUS/ÓBIDOS (moyennes mobiles). C'est vrai pour la valeur de la période 1970/91 (4,74m). Mais la valeur correspondante de la période 1928/1941 devrait être 4,36m et non 3,94.

Le décalage est: $4,36\text{m} - 3,94\text{m} = 0,42\text{m}$.

-Conclusion

Le décalage déterminé avec la crue de 1953 est de 32cm.

Ceux déterminés avec les corrélations MANAUS/ÓBIDOS sont: 43, 26 et 36cm.

Le jaugeage "Oltman" indique 28cm.

Le calcul sur les Modules d'ÓBIDOS donne un décalage de 42cm.

Tous ces décalages vont dans le même sens (échelle ancienne plus haute).

Pour parfaire la détermination, ces 6 valeurs ont été distribuées suivant une loi normale !

Le décalage le plus probable est: 34cm, l'échelle actuelle étant plus basse que l'ancienne et donnant des hauteurs d'eau plus fortes. Ecart-type: $\sigma = \pm 7\text{cm}$

L'intervalle de confiance à 90% est compris entre 25 et 44cm.

Erreur à craindre sur le décalage

Une erreur de 1 cm sur le décalage entraîne :

-une erreur de 0.22% sur la valeur du module annuel,

-une erreur de 0,18% sur les étiages (hauteur d'eau de l'ordre de 1 m),

-une erreur de 0.38% sur les hautes eaux (hauteur d'eau de l'ordre de 7 m),

-une erreur de 0.47% sur les très hautes eaux (hauteur d'eau de l'ordre de 8 m).

Pour quelques centimètres, l'erreur est bien inférieure à la précision d'un bon jaugeage. Par contre traiter l'ancienne échelle comme si elle était avec le même zéro que l'échelle actuelle entraîne une erreur de 7,5% sur les modules.

En définitive, par rapport au repère CPRM (8,053 m), les zéros des échelles successives sont:

-Ancienne échelle: 8,39 m

-Echelle 1967: 8,05 ou 8,13 m

-Echelle actuelle: 8,05 m

Le repère de nivellement de 1967 (marche de l'escalier du Marché Municipal) est, toujours d'après cet unique repère CPRM existant en Mai 1997, à l'altitude: 8,498 m.

5-CONCLUSION

« Dix fois sur le métier remettez votre ouvrage »
N.Boileau

Cette note voudrait être un point final aux problèmes du décalage du zéro entre les 2 séries d'observations à ÓBIDOS. Ceci demande encore de se pencher sur les documents originaux, s'ils existent encore, hélas dispersés aux quatre coins du Brésil. Et espérer découvrir, enfin, LA référence altimétrique de l'ancienne échelle.

Elle a permis de montrer que la crue de 1953 n'avait pas la hauteur supposée, il y a un an encore.

Elle a montré, aussi, toute la difficulté dans la recherche de la vérité hydrométrique et combien un Historique sérieux est un outil de base, un document indispensable, à l'Hydrologue.

En définitive, les valeurs annoncées dans la note précédente seront à revoir à la baisse dès que le problème de non-univocité de la courbe de tarage sera résolu.

6-BIBLIOGRAPHIE

CALLEDE J., GUYOT J-L., GUIMARÃES V.S., de OLIVEIRA E. & FILIZOLA N.P., 1996. Les débits de l'Amazone à ÓBIDOS Hibam/ORSTOM/DNAEE, Brasilia, Brésil. 1-22.

CALLEDE J., GUYOT J-L., MOLINIER M., GUIMARÃES V.S., de OLIVEIRA E. & FILIZOLA N.P., 1997. La Variabilité des débits de l'Amazone à ÓBIDOS (Amazonas, Brésil). In: *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty* (Proc. Rabat Symp. S1, April 1997). Publ. AISH n° 240.

OLTMAN R. E., 1968. Reconnaissance Investigations of the Discharge and Water Quality of the Amazon River. In: *Geological Survey Circular n° 552*, Washington, USA, 1-16

PARDE M., 1965. Sur les débits monstrueux de l'Amazone. In: *Annales de Géographie*, n°401. Paris, 113-114.

UNESCO, 1969 à 1979. Débit de certains cours d'eau du Monde UNESCO, publ. n° 5, Paris, 5 vol.

TARDY Y. & PROBST J-L., 1992. Sécheresses, crise climatiques et oscillations télé-connectées du climat depuis cent ans. In: *Sécheresse*, n°1, 3, 25-36.

VEIGA J.P. da, 1968. Medição da descarga e seus problemas técnicos no maior rio do Mundo. DNAEE, Rio de Janeiro, Brésil, 1-42.