

ÉTALONNAGE

D'UNE STATION HYDROLOGIQUE DIFFICILE : LE BANIAN, STATION PRINCIPALE DU MANGOKY

par

M. Yves BRESSON

*Ingénieur Hydrologue à Électricité de France
Inspection Générale pour l'Union Française et l'Étranger*

I) BASSIN DU MANGOKY

Le fleuve MANGOKY draine le plus vaste bassin versant de MADAGASCAR : 60.000 km². Limité à l'Est par le rebord oriental des plateaux et à l'Ouest par le Canal de MOZAMBIQUE, il se situe en latitude entre les parallèles 20°30' et 23° Sud. Il se place ainsi dans le centre Sud de la GRANDE ILE.

La coupe Est-Ouest de MADAGASCAR à la latitude du bassin comprend :

- à l'Est, bordant l'Océan Indien, une bande côtière de 50 à 60 km de largeur, s'élevant progressivement jusqu'à 300 m d'altitude,

- une falaise abrupte s'élevant jusqu'à la région des hauts plateaux cristallins et latéritisés, dont l'altitude est comprise entre 1.000 et 2.500 m. Ceux-ci s'étendent sur 150 à 170 km, leur altitude diminuant vers l'Ouest ;

- une zone sédimentaire, large de 250 km, forme un plan incliné entre l'altitude 900 m et le Canal de MOZAMBIQUE. Elle présente des reliefs gréseux et calcaires du jurassique et du crétacé, et se termine vers l'Ouest par une zone côtière éocène et quaternaire, sans relief appréciable, recouverte d'une carapace sableuse.

Le climat tropical austral accuse une variante assez pluvieuse et fraîche sur les hauts plateaux, proches de la falaise au vent, battue par les alizés. Puis le phénomène évolue à l'Ouest, vers des précipitations moins fortes et plus concentrées dans le temps et des températures plus élevées, pour aboutir au climat semi-aride de l'extrême Ouest.

Les hauts plateaux donnent naissance aux affluents supérieurs : MATSIATRA, MANANANTANANA et complexe ZOMANDAO-IHOSY. Ce sont des rivières à régime tropical (variante des hauts plateaux). Les modules annuels sont assez élevés du fait de l'altitude. Leurs étiages restent appréciables. Ces rivières confluent en des points rapprochés et forment le MANGOKY qui s'individualise dans la zone Ouest. Il coule alors d'Est en Ouest, recevant des affluents à régime de plus en plus aride (étiages souvent nuls, crues brutales, etc...). Citons, en rive gauche : MENAMATY, MALIO ISAHENA, SAKAMAVAKA, SIKILY et, en rive droite : MAKOY, BEMARIVO, MORARANO.

Dans cette zone, le MANGOKY franchit les côtes gréseuses ou calcaires jurassico-crétacées par des rapides (ANDRIHAMBE), des défilés (VONDROVE), des verrous (NOSY-AMBOSITRA).

Enfin, son cours s'élargit et sa pente diminue dans la bande côtière semi-aride où se forme le delta, pièce maîtresse de l'aménagement.

II) PROJET D'AMÉNAGEMENT ET ÉTUDES HYDROLOGIQUES

Divers comptes rendus de reconnaissance et diverses études ont été établis dans le passé, en vue de déterminer l'opportunité et la nature des travaux à entreprendre pour l'aménagement du fleuve. Nous citerons les travaux de MM. REYNIER, SCOGNAMIGLIO (1932), de M. ROTIVAL (1950), une note de mission de M. CROUZET, des rapports de MM. TRINTIGNAC, SEGALEN et MOUREAUX, des notes du Service Géologique, etc... et, enfin, le compte rendu de mission de M. G. JAMME du B.C.E.O.M., qui a fait la synthèse des précédents.

Le rapport JAMME, reprenant les études antérieures, établit que :

1.- Le bassin du MANGOKY, actuellement sous-équipé à tous les points de vue, ne contribue à l'économie malgache que pour une part bien inférieure à celle que lui imposerait sa superficie ;

2.- Les conditions matérielles du bassin sont éminemment favorables à une expansion économique ;

3.- Les fruits de cette expansion s'intégreront au mieux dans l'économie du Territoire ;

4.- L'expansion pourra porter sur :

- la production agricole dans la zone Ouest et principalement dans le delta, où 145.000 ha semblent pouvoir être mis en valeur,

- l'élevage dans toute la zone Ouest :

- les richesses minérales dans les hauts plateaux ;

- la contribution à une production pétrolière éventuelle (importantes recherches en cours) et au bassin charbonnier de la SAKOA, pas très éloigné.

A la base, ce programme entraînait une étude hydrologique complète du MANGOKY. Il était, en effet, nécessaire de connaître, entre autres :

- le régime du fleuve dans son cours moyen, pour chiffrer les possibilités d'irrigation et leur époque ;

- le régime des hauts affluents, pour évaluer les retenues éventuelles de régularisation à créer, et la production d'énergie possible ;

- les chiffres de crue aux divers sites, pour dimensionner les évacuateurs :

- les transports solides :

- l'évaporation ;

Ces études devaient, en outre, être rendues indépendantes de l'hydraulicité particulière aux années de mesure. Elles devaient donc :

a) être poursuivies pendant un temps suffisant et, en fait, devenir continues :

b) pouvoir être rattachées aux données pluviométriques du Service Météorologique qui couvrent une longue période d'observation.

On voit que cette étude devait être très approfondie.

III) ÉTUDES HYDROLOGIQUES DE 1951 A 1953

En 1951, l'I.R.S.M. a été chargé par le Service du Plan de déterminer rapidement les caractéristiques hydrologiques principales du MANGOKY.

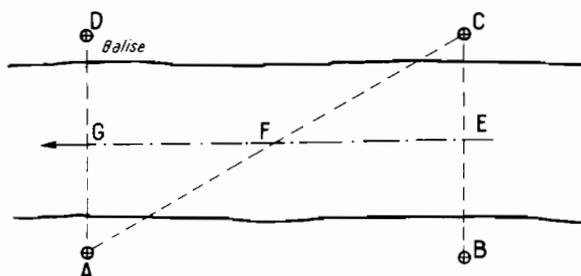
L'hydrologue de l'I.R.S.M., M. PELLERAY à cette époque, a exécuté sa première tournée sur le MANGOKY en août 1951. L'étiage a été mesuré et les

diverses stations installées par le Génie Rural reconnues. Les efforts ont été concentrés par la suite sur la station de VONDROVE, correctement située, et installée en amont de la plaine de NOSY-AMBOSITRA, à la sortie des gorges. En décembre 1951, une série de jaugeages précisa la courbe de tarage de l'étiage à $540 \text{ m}^3/\text{sec}$.

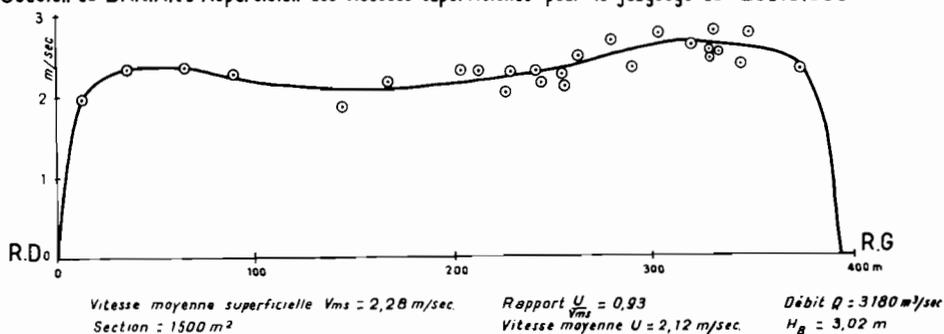
L'année suivante, en juillet, des stations étaient installées à MALAKIALINA sur la MATSIATRA et à TSITONDROINA sur la MANANANTANANA. En juillet 1953, le réseau était complété par les stations d'IHOSY sur l'IHOSY et de BEDRAY sur la MATSIATRA.

Elles étaient simplement équipées d'une échelle limnimétrique, lue quotidiennement par un observateur malgache. Elles étaient visitées périodiquement par les hydrologues de l'I.R.S.M., qui procédaient alors à des mesures de débits. M. TOILLIEZ, agent technique, a été chargé en 1953 et 1954 de l'étalonnage des stations de MALAKIALINA, TSITONDROINA et BEDRAY.

Mesures de vitesses aux flotteurs MÉTHODE DES DEUX CHRONOMÈTRES



Station du BANIAN. Répartition des vitesses superficielles pour le jaugeage du 28.1.1953



Croquis N° 1

Ces stations sont toujours lues et jaugeées dans les mêmes conditions.

A VONDROVE, les mesures sont délicates à partir de $500 \text{ m}^3/\text{sec}$. Le fleuve mesure plus de 250 m de large et les vitesses atteignent $2 \text{ m}^3/\text{sec}$. La traversée et la tension du câble balisant la section, et permettant l'amarrage de la portière de mesure, étaient rendues très difficiles par la quantité invraisemblable de feuilles qui s'y accrochait en très peu de temps. Pour 800 à $1.000 \text{ m}^3/\text{sec}$, les bancs de sable sont couverts et la largeur atteint 700 m. Les vitesses augmentent dans de fortes proportions. Enfin, la station est située dans une zone divergente, peu favorable à des mesures précises.

Une section plus étroite et mieux calibrée a été reconnue en mai 1952 au lieu dit "LE BANIAN", à 8 km en amont de VONDROVE. Le MANGOKY n'y mesure que 400 m de large, et généralement, les bancs de sable sont couverts, même à l'étiage.

La station avait été aménagée pour des jaugeages réguliers au moulinet et des jaugeages aux flotteurs. De nombreuses mesures ont été exécutées durant le mois de janvier 1953. Une grosse crue, dans les premiers jours de l'année, avait emporté les câbles traversés et tendus en saison sèche.

Le matériel flottant, dinghy court sans moteur hors bord, ne permettait pas la traversée d'un autre câble en hautes eaux. L'hydrologue effectua alors des mesures aux flotteurs, des mesures de pente et put réussir un jaugeage régulier à la décrue ($720 \text{ m}^3/\text{sec}$).

Nous pensons qu'il est intéressant de donner quelques détails sur ces mesures aux flotteurs :

Durant la phase montante d'une crue, la rivière charrie des arbres et des branches en grosse quantité, empêchant ainsi toute navigation légère. Ces flotteurs sont entraînés par le courant dont ils acquièrent la vitesse. Si le tronçon de rivière où se font les mesures est rectiligne et bien calibré, les flotteurs ne se déplacent pas latéralement. En mesurant la position, par rapport à la berge, d'un tronç d'arbre flottant et sa vitesse linéaire, on obtient une mesure de vitesse superficielle. Si de telles mesures peuvent être faites en tous points de la section, on a la répartition des vitesses superficielles.

La réalisation pratique de ce procédé est la suivante : quatre jalons définissent deux alignements parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe moyen de la rivière. La vitesse superficielle des flotteurs est mesurée entre deux alignements, espacés de 100 m dans le cas considéré.

Pour mesurer l'abscisse des flotteurs dans le profil en travers de la rivière, on chronomètre le temps nécessaire aux flotteurs pour parcourir la distance \overline{EF} . Le temps correspondant à la distance $\overline{EG} = \overline{AB} = \overline{CD}$ donne la vitesse superficielle et par proportionnalité, on en déduit la distance \overline{ED} .

Cette méthode, appelée "méthode des deux chronomètres", parce qu'elle utilise les mesures de deux temps, a donné d'assez bons résultats.

Nous obtenons de cette manière, la vitesse superficielle en un point de la section et la position de ce point dans la section. Une courbe moyenne des vitesses superficielles peut être tracée pour chaque jaugeage aux flotteurs. La dispersion, assez grande, ne présente pas de graves inconvénients grâce au grand nombre de points mesurés, comme on peut le voir sur le croquis n° 1, p. 25.

Nous n'avons pu exécuter qu'un seul jaugeage régulier au moulinet en janvier 1952. Nous avons déduit de cette mesure en eaux moyennes la section de la rivière et le rapport de la vitesse moyenne à la vitesse moyenne superficielle U/V_{ms} pour une cote donnée. A l'aide du profil en travers, déterminé pendant le jaugeage, nous avons calculé la variation de la section avec la cote.

Les renseignements obtenus sur un certain nombre de grands fleuves, étalonnés régulièrement par les hydrologues du Service, nous ont conduit à admettre une légère amélioration du rapport U/V_{ms} avec la cote à l'échelle.

Compte tenu des éléments : section et rapport U/V_{ms} d'une part, vitesses moyennes superficielles mesurées d'autre part, nous avons calculé les débits correspondant à chaque jaugeage aux flotteurs.

La précision des mesures dépend des observateurs, mais aussi de la stabilité du lit puisqu'il était impossible de lever le profil en travers pendant les mesures. Ce profil avait été levé en saison sèche et une autre fois entre deux crues lors du jaugeage régulier.

Les différences étaient importantes. Un profil moyen fut admis pour cette première campagne.

On ne pouvait pas effectuer en crue des jaugeages réguliers précis. En effet, la navigation et l'immersion d'un appareil s'avéraient périlleuses du fait des corps flottants. En outre, la rapidité d'évolution des crues (plus d'un décimètre à l'heure) aurait nécessité des mesures rapides, d'autant plus difficiles.

Parallèlement aux mesures de vitesses, des mesures de pente étaient faites sur une distance de 300 m en vue de permettre, par l'emploi de formules d'écoulement classiques, la vérification des débits, déterminés comme il vient d'être dit. Ces mesures étaient très délicates à cause du clapotis qui existait, même dans les zones

tranquilles où les échelles avaient été implantées. Leur précision était cependant suffisante pour déceler la différence entre pentes à la crue et à la décrue.

Un dispositif, basé sur l'emploi des manomètres à dépression, a été utilisé. Le "pompage" était éliminé et la précision des mesures était très bonne. Malheureusement, l'emploi en était délicat, les dégagements gazeux dans l'eau en dépression contenue dans les tubes étant difficiles à éviter.

Une note concernant les crues du MANGOKY a été mise au point dans le courant de l'année 1953. Compte tenu des mesures de hautes eaux aux flotteurs, des mesures de pente et des jaugeages réguliers, une courbe de tarage a été tracée.

Les moyens rudimentaires employés ont été suffisants pour individualiser deux courbes correspondant l'une à la crue, l'autre à la décrue. Cette première vue un peu simpliste des phénomènes demandait évidemment des études complémentaires.

Il était nécessaire de préciser la distinction entre crue et décrue, d'introduire peut-être la notion de gradient de vitesse de crue et, surtout, de mesurer les variations du lit au cours d'une crue. En effet, le fond, après une crue en janvier 1953, était tellement remblayé qu'un banc de sable affleurait le plan d'eau à la cote 2 m, alors qu'en étiage, à la cote 0,50 m ce même banc était entièrement recouvert.

IV) ÉTUDES HYDROLOGIQUES DEPUIS 1954

En 1954, l'attribution de crédits par le service du Plan a permis à l'hydrologue, M. BRESSON, d'envisager un aménagement rationnel de la station du BANIAN, en vue d'études systématiques.

L'étude des débits, qui est à la base de la connaissance d'un fleuve, retint surtout l'attention.

Elle exigeait l'achat et l'installation d'un matériel de jaugeage et de limnimétrie adapté aux méthodes de mesure, aux conditions naturelles et aux possibilités locales.

1°) Le site, le fleuve :

Au BANIAN, le MANGOKY, large de près de 400 m, coule dans un défilé gréseux aux pentes relativement abruptes. Au niveau du fleuve, on trouve des éboulis formant des banquettes de rive fréquemment coupées par de gros blocs de plusieurs m³. Ces banquettes sont, en général, recouvertes de sable ou de limon et déterminent le lit apparent par leurs retombées verticales, hautes de 1 à 3 m et fixées par des roseaux aux feuilles coupantes (bararaty).

Les flancs gréseux et les banquettes donnent asile à une magnifique galerie forestière peuplée de tamariniers (kily), de banians, de baobabs, de plantes xéro-philés, etc...

Un gigantesque banian, situé à 20 m au-dessus du fleuve sur une plate-forme rocheuse de la rive gauche, a donné son nom à la station. Celle-ci a tout naturellement pris place dans une profonde échancrure taillée dans le rocher par un ruisseau affluent. Cette échancrure constitue une vaste plate-forme triangulaire raccordée en pente douce à la banquette rive gauche. Le sol en est limoneux et de nombreux tamariniers le fixent de leurs puissantes racines.

Le lit du MANGOKY est entièrement sableux. Entre l'étiage et les grandes crues, l'amplitude de variation du niveau de l'eau atteint 6 à 7 m. En saison sèche (mai à novembre), le fleuve se contente d'un lit mineur serpentant dans le sable et généralement large de 100 à 150 m.

A l'étiage, les eaux sont très claires et le lit mineur comporte souvent un chenal profond d'un peu plus de 1 m, bordé d'une zone à très faible profondeur : 10 à 50 cm, aux courants divagants.

En crue, le MANGOKY envahit tout le lit apparent et dépasse fréquemment le niveau des banquettes de plusieurs mètres. Les eaux, très chargées, coulent à des

vitesse pouvant atteindre $7 \text{ m}^3/\text{sec}$ (cyclone) avec des vagues énormes pour un fleuve. La phase montante des crues s'accompagne de nombreux transports de corps flottants, allant de l'herbe aquatique à l'arbre entier de 10 à 15 m de long.

D'une crue à l'autre, le lit peut changer complètement de configuration. Alors qu'on observe le plus souvent en saison des pluies deux chenaux de rives, profonds de 7 à 8 m et rapides, avec une zone centrale plus calme et moins profonde (1 à 3 m seulement), il est arrivé en janvier 1956 que le chenal rive gauche se comble complètement au profit du chenal rive droite en une seule nuit. La rive gauche se trouva en cette occurrence, ensablée à 2 m au-dessus de zéro de l'échelle.

La dernière crue annuelle fixe l'allure du lit mineur de l'étiage suivant.

Enfin, l'accès de cette station posait des problèmes difficiles : elle est située à plus de 300 km de TULEAR, seul centre important de la région. Les centres européens ou commerçants les plus proches sont ANKAZOABO et BEFANDRIANA-SUD, respectivement à 100 km et 60 km. Dans les deux cas, les pistes traversent des gués rendant le voyage problématique en saison des pluies.

La route ANKAZOABO-MANJA passe à 12 km de la station. La piste d'approche part de cette route et s'arrête à 500 m du BANIAN. Les transports se font donc soit à dos d'homme, depuis l'extrémité de cette piste, soit par pirogues depuis le bac de VONDROVE, situé 8 km en aval et point de passage de la route ANKAZOABO-MANJA.

2°) Personnel et premiers travaux :

Dès juillet 1954, un agent européen s'installait au BANIAN et commençait les constructions, les installations diverses tout en assurant les observations et mesures hydrologiques.

Dans le stade définitif, le personnel est régulièrement composé d'un agent hydrologue et d'un chauffeur-mécanicien européens, assistés de cinq manoeuvres ou piroguiers malgaches. Ils disposent d'un véhicule Power-Wagon et d'une jeep Hotchkiss.

Les constructions sont relativement importantes étant donné l'isolement du site. Elles comprennent :

- un logement provisoire pour agent hydrologue,
- un logement provisoire pour chauffeur-mécanicien,
- un petit magasin atelier.

Un terrain d'aviation, situé à 5 km de la station, réalisé par la Société des Pétroles de Madagascar dans le cadre de ses recherches, et entretenu par la station, aurait permis dans les cas graves une évacuation sanitaire sur TULÉAR ou TANANARIVE.

3°) Méthodes de mesure et matériel de jaugeage :

Les méthodes de jaugeage utilisées sont :

a) pour les jaugeages complets,

- le jaugeage à la perche en "wading";
- le jaugeage avec treuil et saumon à partir d'une embarcation;

b) pour les jaugeages superficiels, on utilise les corps flottants naturels avec la méthode des deux chronomètres (voir plus haut).

a) Le "wading" est réservé à l'exploration des vitesses dans les zones de très faible profondeur, à l'étiage ou en moyennes eaux. La présence de crocodiles le rend dangereux dès que les fonds atteignent 1 m.

Cette méthode se trouve, en général, utilisée dans des courants obliques à la section de mesure (écoulement en patte d'oie sur les bancs de sable). Elle a l'avantage de permettre l'utilisation des hélices autocomposantes et ainsi de gagner en

précision sur la méthode qui consiste à mesurer les angles horizontaux du courant. Ces angles atteignent 60° en certains cas extrêmes qui débordent, du reste, des limites d'emploi de ce type d'hélice.

b) Dans la majeure partie des cas : chenaux principaux à l'étiage, jaugeages de moyennes eaux ou de crues ordinaires, les mesures s'effectuent à partir d'une embarcation munie de treuils et les moulinets sont montés sur saumons Ott ou Neyrpic.

En étiage, les plages à faible profondeur étant prospectées en "wading", on utilise pour les chenaux deux pirogues de fabrication locale, montées en portière et munies d'un treuil Ott, type Newa, avec profondeurs d'immersion graduées en cm sur le tambour. L'existence éventuelle de courants obliques oblige à mesurer les angles horizontaux entre la direction du saumon et la normale au câble de mesure. Le treuil Newa porte soit un saumon Ott de 8 kg, soit un saumon Neyrpic de 23 kg, suivant le courant et la profondeur. Le moulinet est monté libre au-dessus du saumon avec un gouvernail. Le faible tirant d'eau des pirogues et la facilité avec laquelle on peut les tirer sur le sable permet de les mettre à l'abri d'une crue éventuelle, même lorsque des plages à faible profondeur séparent la berge rive gauche des chenaux à mesurer. Elles sont munies de gouvernails.

Mais ce sont les jaugeages complets de crue qui s'avéraient les plus difficiles. Ils n'avaient jamais pu être effectués auparavant au moulinet au-delà de 700 m³/sec, excepté un jaugeage de 1.726 m³/sec effectué le 22 janvier 1954 et qui représentait un véritable exploit sportif. Il n'entraîne évidemment pas dans les ambitions des hydrologues de jauger au moulinet les grandes crues de cyclones, mais il n'en restait pas moins que tous les efforts devaient être faits pour mesurer, par les méthodes régulières, le plus fort débit possible. Or, du choix du matériel dépendait la grandeur de ce débit critique. Il ne faut pas perdre de vue, en effet, que l'énorme variabilité des fonds provoque une telle incertitude sur les sections mouillées que les jaugeages par mesures de vitesses superficielles donnaient des résultats peu précis. La validité des études entreprises dépendait donc du débit maximum jaugé et, par suite, du choix de ce matériel.

L'idée d'une station téléphérique fut vite abandonnée car elle excédait les moyens locaux en raison de la grande portée : 400 m. En définitive, la solution adoptée consistait à utiliser un chaland amarré à un câble de forte section. La maison GOLAZ, de TAMATAVE, construisit un chaland à moteur en tôle d'acier, caissonné et ponté, de 12 m de long sur 2 m de large, avec une plate-forme débordante, de 2,50 m de large. Le chaland est muni de deux treuils de manœuvre avec comptemètres. Les câbles des treuils sont renvoyés par poulie sur des potences qui permettent l'immersion des appareils sur les flancs babord et tribord, suffisamment au large pour éviter les remous. On emploie des saumons de 40 à 100 kg. Pour les grandes vitesses de courant, deux et même trois saumons (de 50 à 100 kg) sont jumelés. L'un des treuils sert à la manœuvre d'une turbisonde Neyrpic à air comprimé.

Les angles horizontaux du courant, relativement faibles en hautes eaux, sont évalués en tenant simplement compte de la direction du bateau. Mais une nouvelle mesure s'impose alors : celle des angles verticaux du câble qui porte le saumon. La mesure de ces angles entre dans le calcul des corrections à apporter aux profondeurs brutes mesurées par les compte-mètres des treuils.

L'emploi de ce chaland a nécessité l'installation d'une infrastructure assez importante.

En effet, le bateau doit, en cours de mesures :

- rester fixe dans le courant, à la verticale de mesure choisie,
- se mouvoir latéralement à la section transversale du fleuve pour changer de verticale,
- pouvoir être abrité des grands courants des crues de cyclones et des corps flottants, lorsqu'il est au repos.

Un câble transversal de 16 mm de diamètre a été tendu en travers du défilé, Il est ancré en rive droite dans un massif bétonné. En rive gauche, il est accroché à un moufle deux brins dont l'un est actionné par un treuil de 5 tonnes. Ce treuil est lui-même scellé sur un massif situé sur la plate-forme du BANIAN proprement dit.

La partie centrale du câble se trouve donc ainsi réglable en hauteur, à proximité du plan d'eau, mais la hauteur des naissances de ce câble principal, au-dessus de l'eau, n'aurait pas permis les manœuvres vers les rives. Aussi deux suspentes latérales en câble de 14 mm de diamètre, fixées au câble principal, ont-elles été amarrées sur les rives où elles sont manœuvrées par treuil de 1 tonne et mouflage deux brins.

On obtient ainsi une ligne continue de trois portées de câble dont la hauteur, par rapport au plan d'eau, est réglable à la demande. Un train de poulies formant traille est monté sur chacune des trois portées. Le bateau est amarré à l'un ou l'autre de ces trains de poulies. Ceux-ci comportent, en outre, un jeu de sabots de bronze manoeuvrables par manivelle à cardans depuis le bateau. Les sabots serrés empêchent tout déplacement latéral, une fois choisie la verticale de mesure. Les mouvements du chaland s'effectuent soit au moteur, soit au gouvernail. Tous les câbles sont gradués par des marques peintes de 10 en 10 m. Des couleurs différentes indiquent les hectomètres et demi-hectomètres et permettent ainsi de connaître les distances horizontales entre verticale de mesure et berge de départ. Les trois trains de poulie se sont avérés nécessaires pour éviter des démontages acrobatiques au passage des jonctions suspentes-câble principal.

Enfin, un mur barrage en maçonnerie de 6 m de hauteur, perpendiculaire au courant et fondé au rocher en rive gauche, 2 m à l'amont de la suspenste, forme abri contre le courant. Il permet d'amarrer le bateau au repos, dans une zone relativement calme et sans le détacher du train de poulies rive gauche. La crête de ce mur est calée au-dessus des plus hautes eaux. Son parement aval est incliné dans un but de stabilité. La falaise gréseuse a été réglée à l'explosif sur 20 m à l'aval de ce mur, de façon à laisser le bateau à flot quelles que soient les fluctuations du plan d'eau à partir de 1 m au-dessus de l'étiage.

c) Jaugeages aux flotteurs :

Ils sont effectués par la méthode des deux chronomètres exposée plus haut et en utilisant les corps flottants naturels.

Un mirador, installé 100 m à l'amont de la plate-forme du BANIAN, constitue avec celle-ci une base de mesure complétée en rive droite par deux balises distantes également de 100 m. Récemment, une liaison téléphonique a été installée entre le mirador et la plate-forme, afin de permettre aux deux observateurs de se décrire exactement les flotteurs choisis pour les divers signaux de mesure. Les campagnes précédentes avaient, en effet, montré la difficulté de se mettre d'accord sur les flotteurs, à la voix, alors que les eaux du MANGOKY grondaient furieusement.

4°) Matériel limnimétrique:

Ce matériel comprend deux échelles (une sur chaque rive) calées en concordance, leur zéro est à l'altitude 71,42 N.G.M. L'échelle rive droite s'avéra rapidement indispensable étant donné l'ensablement intermittent des éléments de 0 à 2 m de la rive gauche.

En outre, un limnigraphe Richard à flotteur, avec réduction au 1/20° et enregistrement hebdomadaire, a été installé sur l'extrémité au large du mur abri. Ce limnigraphe fonctionne en hautes eaux pour l'enregistrement des fluctuations rapides

Récemment, un deuxième limnigraphe a été installé en rive droite, toujours pour des questions d'ensablement.

Les échelles sont lues quotidiennement et en début et fin de jaugeage.

Enfin, deux limnimètres, distants de 300 m, fonctionnent en rive gauche. Ils sont formés de deux tubes verticaux, l'un en eau, l'autre étanche. Un flotteur et un contrepoids, reliés par un fil de cuivre, les occupent respectivement. Le fil actionne une poulie de tête munie d'une aiguille et d'un cadran. La différence des lectures indique la pente superficielle de l'eau.

Notons, toutefois, que les eaux chargées bloquant les tubes par des dépôts boueux présentent, d'une manière générale, de sérieux inconvénients dans l'utilisation des systèmes à flotteurs.

5°) Matériel annexe :

Tout un matériel de chantier et de petite mécanique a dû être approvisionné pour assurer les travaux courants de la station et d'entretien ; citons, pour mémoire, forge, poste de soudure, outillage mécanique (forets, clés, burins, etc...) pelles, pioches, etc.

V) **RÉSULTATS OBTENUS**

Nous avons vu, dans la troisième partie de cette note, qu'avec les jaugeages aux flotteurs antérieurs à 1954, on avait pu mettre en évidence, en première approximation, l'existence d'une courbe de crue et d'une courbe de décrue. Ce fait pouvait s'expliquer par la variation de vitesse consécutive aux variations de pente superficielle entre montée et descente d'une crue. Mais il pouvait tout aussi bien s'expliquer par un changement dans le calage général du lit. Vraisemblablement, les deux phénomènes interviennent. Or, les jaugeages aux flotteurs sont calculés sur une section mouillée de basses eaux, fixe et affectée d'une correction de plan d'eau. Ces jaugeages ne pouvaient donc pas rendre compte du deuxième phénomène. Or, précisément, les jaugeages complets effectués en moyennes et basses eaux 1954 et le jaugeage du 22 janvier 1954, avant que la station ne soit équipée complètement, montraient un déplacement relativement important de la courbe hauteurs-débits 1953-54 par rapport à la courbe 1952-53. Ce fait confirmait la primauté des changements de calage du lit.

Malheureusement, le bateau ne put être livré à temps pour effectuer la campagne des pluies 1954-55. Néanmoins, au cours de cette année hydrologique, trois jaugeages complets de plus de 1.000 m³/sec et 11 jaugeages complets échelonnés entre 66 et 1.000 m³/sec purent être exécutés, grâce à l'emploi des pirogues en portière et de l'infrastructure préparée pour le bateau définitif.

Ces divers jaugeages étaient tous rattachés à l'échelle du BANIAN et les courbes de tarage, qui étaient précédemment établies pour l'échelle de VONDROVE (8 km à l'aval) furent, à partir de cette année, basées sur l'échelle du BANIAN au zéro coté à 71,42 m N.G.M. Ces jaugeages permirent de préciser l'étalonnage d'une manière beaucoup plus détaillée que durant les années précédentes ; quatre courbes différentes, suivant les dates, et raccordées entre elles, furent déterminées.

En outre, la pente mesurée pendant plusieurs jours de moyennes eaux s'établit à 13 cm/km contre 75 cm/km en régime de hautes eaux, montrant ainsi des changements de lit sur une assez grande longueur. Ce phénomène doit être examiné de plus près : il est possible qu'il soit provoqué par des barrages de sable intermittents, amenés quelques 20 km à l'aval par la rivière SIKILY, au gré de ses crues.

Résultat important également, l'étiage de 57 m³/sec put être déterminé avec précision grâce à la présence quasi permanente des hydrologues à la station. Cette valeur de l'étiage prend évidemment une grande importance dans un problème d'irrigation en pays semi-aride.

Année 1955-56 : c'est au cours de cette année que la présence d'un matériel à peu près complet permit des mesures vraiment précises.

Durant cette année hydrologique, les courbes d'étalonnage ont pu être appuyées sur 56 jaugeages, dont 49 complets au moulinet. Parmi ceux-ci, 11 ont dépassé 1.000 m³/sec ; l'un d'entre eux a atteint 2.745 m³/sec (vitesse moyenne : 1,67 m/sec - vitesse maximum : 2,86 m/sec).

Cette année 1955-56 a vu passer une crue de cyclone au BANIAN. Sept jaugeages aux flotteurs ont été effectués durant cette crue. Il devenait alors de première importance d'évaluer avec plus de précision que par le passé la valeur des sections mouillées correspondantes. Cette étude a pu se faire d'une manière précise grâce à l'examen de toutes les sections mouillées, connues dans le passé et rapportées à l'échelle du BANIAN. Cette étude peut se résumer dans le graphique n° 1 où sont portées les sections mouillées en m², en fonction des hauteurs à l'échelle en m. Les

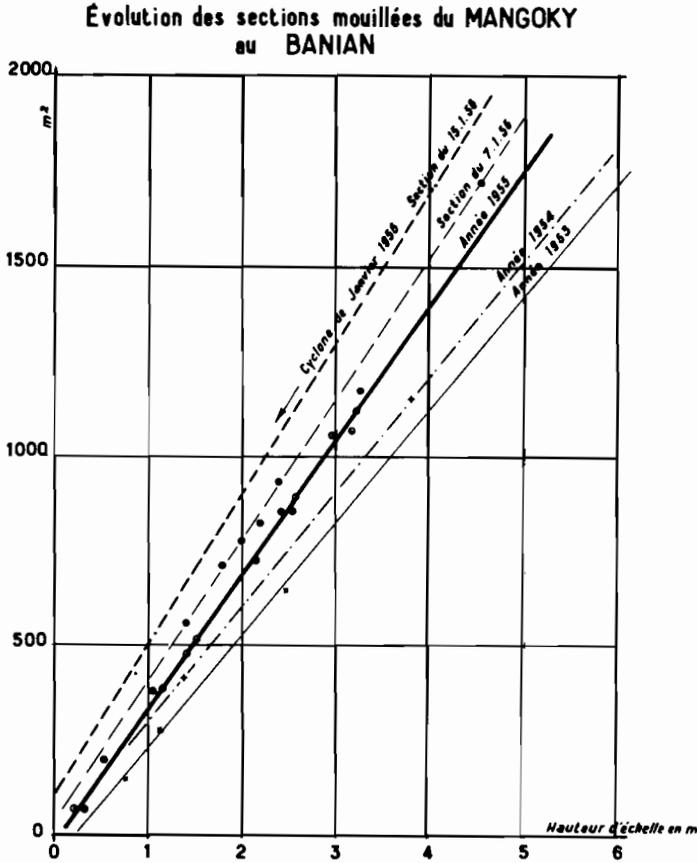
points classés par année se répartissent en un réseau de droites. Les droites ont sensiblement la même pente. Ce résultat est normal, car si l'on assimile la section mouillée à un rectangle (et cette manière de voir est proche de la réalité au BANIAN), on a :

$$S = L h + L c$$

L = largeur du lit

h = lecture à l'échelle

c = décalage entre le zéro de l'échelle et le fond moyen du lit.



Graphique N° 1

Le terme Lc est sensiblement constant pour une année donnée ; on a donc l'équation d'une droite, de pente L , largeur du lit. La droite passant par l'origine indiquerait que le zéro de l'échelle est calé en concordance avec le fond moyen du lit. Ceci est sensiblement observé au BANIAN.

Nous voyons, d'après ce graphique, que le lit du MANGOKY au BANIAN n'a pas cessé de se creuser entre 1953 et le début de 1956. La droite 1956 se trouve tracée avec précision, car elle s'appuie sur le point haut du 7 janvier 1956 (4,48 m ; 1.722 m²) mesuré grâce au jaugeage complet de 2.745 m³/sec.

La crue de cyclone a effectué sa montée brutale dans les quatre premières heures du 9 janvier. On a assisté à quatre crues consécutives avec des pointes sensiblement équivalentes (6 m à 6,28 m à l'échelle) réparties sur les 9 et 10 janvier.

Ces crues ont fait l'objet de six mesures continues aux flotteurs. Elles sont donc parfaitement connues au point de vue vitesse.

Par bonheur, le bateau a pu sortir lors de la décrue, dès le 15 janvier, pour effectuer seulement une mesure de section mouillée : $H = 4,08$ m, $S = 1.707$ m².



LE MANGOKY à l'étiage vu de la maison du chef de station. La station de jaugeage est située en bas à droite.

(Photo Bresson 1955)

Plate-forme du BANIAN - Mur d'abri et limnigraphe rive gauche en cours d'installation. Extrémité de la suspenste. Rive gauche avec son mouflage.

(Photo Bresson 1955)



Treuil principal rive gauche et son mouflage.
(Photo Bresson 1955)



Manoeuvre de la Turbidi-
sonde NEYR PIC
(Photo Bresson 1955)



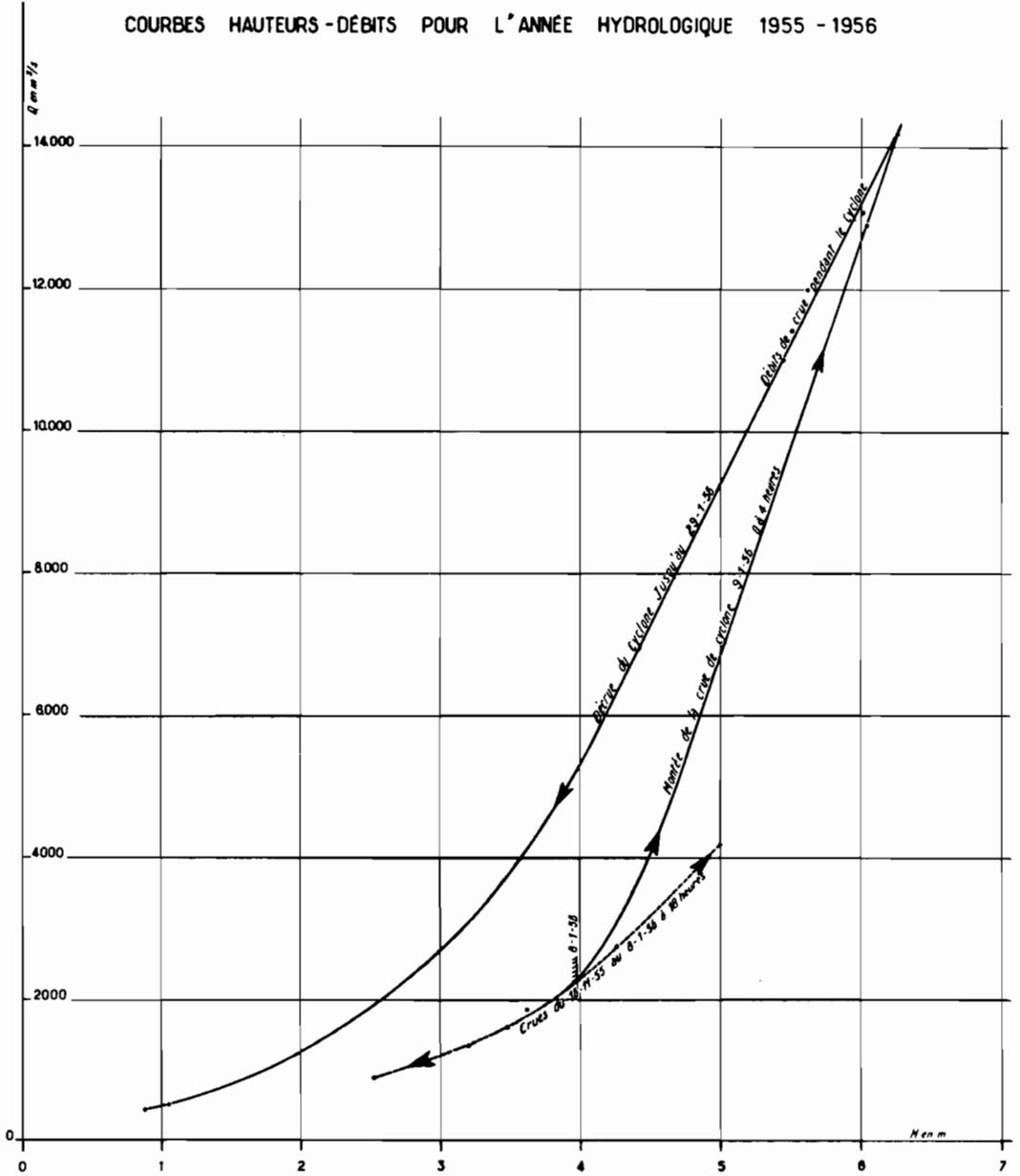
Déplacement latéral du
bateau dans la section de
jaugeage.
(Photo Mouné 1956)



Manoeuvre du moulinet
monté sur saumon OTT de
50 kg.
(Photo Bresson 1955)

MANGOKY AU BANIAN

COURBES HAUTEURS - DÉBITS POUR L'ANNÉE HYDROLOGIQUE 1955 - 1956



Graphique n° 3

la section réelle. Ce surcroît de pente semble ainsi bien en accord avec le léger remblaiement qui s'est opéré entre le 15 janvier et les deux points bas des 28 et 29. Il s'ensuit que l'extrapolation de cette droite à 6,28 m à partir des 4,08 m mesurés ne représente pas une hardiesse, mais consiste simplement à effectuer :

1. - la correction de plan d'eau,
2. - la correction de creusement au moment de la pointe (correction faible).

On arrive ainsi pour 6 m à l'échelle à une section de 2.475 m².

L'utilisation de cette droite et de la vitesse moyenne superficielle a permis de chiffrer assez exactement la crue du 9 janvier à 14.340 m³/sec. Ce chiffre ne constitue pas le record des jaugeages superficiels réalisés par les hydrologues de l'O.R.S.T.O.M., mais il est quand même fort honorable puisqu'il n'est dépassé que par une mesure sur le CONGO, effectuée en octobre 1955 pour 49.000 m³/sec.

Par ailleurs, l'utilisation du limnigramme a permis le calcul du volume écoulé des journées des 9, 10 et 11 janvier 1956 : $2,49 \times 10^9$ m³.

Examinons maintenant comment l'ensemble des jaugeages 1955-1956 a permis l'établissement des courbes de tarage en vue de calcul journalier de l'écoulement. Les résultats sont portés sur les graphiques n° 2 et 3 qui comportent les niveaux de l'eau en abscisses et les débits correspondants en ordonnées. Nous observons un entrelacs de courbes mettant en évidence l'extrême variabilité du lit lors des grandes crues.

1.- La courbe du 16 novembre 1955 au 8 janvier 1956 (graphiques n° 2 et 3) représente les premières crues de la saison des pluies. Elle se raccorde à la courbe de décrue 1955 avec un étiage de 34 m³/sec, rarement atteint, et s'élève jusqu'à 5,00 m à l'échelle atteints le 6 janvier, avec 4.160 m³/sec.

Nous voyons donc qu'ici le lit est resté stable, malgré une crue relativement forte.

2.- A partir du 8 janvier 1956, montée brutale du cyclone (graphique n° 3) avec une courbe située bien au-dessus de la précédente et annonçant ainsi un creusement considérable du lit. Cette courbe s'élève jusqu'au maximum de 6,28 m, avec 14.340 m³/sec, puis rend compte de la décrue de fin janvier en restant au-dessus de la courbe de montée des eaux, c'est-à-dire en restant dans l'état creusé du lit.

3.- Après le minimum du 29 janvier : 0,88 m ; 423 m³/sec (graphique n° 2), on assiste à un véritable phénomène d'hystérésis pour atteindre une courbe d'équilibre consécutive au grand bouleversement des 9, 10 et 11 janvier. Chaque crue nouvelle marque, pour la courbe, une montée puis une descente différente, dessinée généralement dans le sens du remblaiement (vers le bas du graphique).

4.- Le phénomène se stabilise pour la courbe de basses eaux, située tout de même bien au-dessus de la courbe correspondante de 1955.

On voit, d'après ces graphiques, quelles erreurs énormes on aurait pu commettre en évaluant les débits journaliers d'après une courbe simple ou même seulement double. Nous espérons que ce réseau de courbes pourra jeter quelque lumière sur le comportement des lits larges, à fond sableux, des cours d'eau des pays arides ou semi-arides si fréquents en Afrique. Mais il convient de ne pas se leurrer ; un tel étalonnage, lorsque l'échelle ne peut pas être placée dans un site stable, demande des mesures pratiquement continues et de très gros frais. Toutes les fois que cela est possible, il faut rechercher un emplacement rocheux pour l'échelle, même si l'écoulement n'y est pas régulier.