

# Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés

J. F. NOUVELOT,  
Chargé de Recherches au Service hydrologique  
de l'O.R.S.T.O.M.,  
Centre de Yaoundé (Cameroun).

## RÉSUMÉ

Les cours d'eau intertropicaux d'Afrique ont une charge solide constituée principalement d'éléments fins en suspension. La connaissance systématique de cette charge solide a été recherchée dans le cadre du réseau hydrométrique de base, au Cameroun, au Tchad, au Togo, au Dahomey, etc.

L'auteur rend compte des recherches effectuées depuis cinq ans environ au Cameroun pour mettre au point une méthodologie de mesure en réseau de ces éléments solides en suspension.

Les procédures établies sont simples: échantillonnage par pompage ou prélèvement au seau, pesée après dessiccation de préférence précédée d'une filtration. Cette simplicité n'exclut pas une précision satisfaisante que l'auteur met en évidence après avoir insisté sur l'influence de la fréquence et de la densité des mesures.

## ABSTRACT

«Methodology for the measurement of suspended load from intertropical rivers, in the frame of a network».

The load of intertropical rivers, in Africa, is mainly formed by fine suspended sediments. To get a good acknowledgement of this suspended load, various investigations have been developed in the frame of the basic networks of Cameroons, Chad, Togo, Dahomey etc.

The author accounts for the investigations carried out, from 5 years ago in Cameroons, to set a methodology of measurement of these suspended sediments, in a network.

The established procedures are simple: sampling by pumping or with a recipient, weighing after drying, preferably preceded by a filtration. This simplicity

does not exclude a reasonable accuracy that the author points out taking a special care of the influence owing to the frequency and density of samplings.

Depuis 1966, le Service Hydrologique de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.) au Cameroun a entrepris une étude intensive des transports solides en suspension sur des cours d'eau dont les bassins versants ont des superficies qui se situent entre quelques dizaines et plusieurs milliers de kilomètres carrés.

L'étude des transports sur parcelle expérimentale ou sur des bassins de quelques hectares n'a pas encore été abordée, ce qui fait que les dégradations mesurées ne donnent qu'une estimation globale, et par conséquent par défaut, de l'érosion suivie localement par les sols, étant donné qu'une partie, parfois importante des matériaux érodés se dépose sous forme de colluvions dans les bas de pentes, puis, éventuellement, dans les plaines d'inondation.

Une première publication [1] nous avait permis d'analyser, en détail, la méthodologie adoptée par la Section de Yaoundé. Nous étions alors tout à fait conscients que certaines manipulations et certaines méthodes de dépouillement devaient faire l'objet d'une étude plus fine, afin d'essayer de chiffrer les erreurs systématiques et la dispersion des résultats.

Le présent article reprend la description de la méthodologie revue et corrigée par les travaux de ces récentes années.

Nous rappelons que ces travaux ont porté essentiellement sur trois stations caractéristiques des cours d'eau du Cameroun: Nachtigal sur la Sanaga (77 000 km<sup>2</sup> d'un bassin équatorial assez accidenté à couvert forestier notable), Goura sur le Mbam (42 300 km<sup>2</sup> d'un bassin assez comparable à celui de la Sanaga), et Bogo sur la Tsanaga (1 535 km<sup>2</sup> d'un bassin tropical de montagne en zone de savane).

## 1. PRÉLÈVEMENT

### 1.1 MODE DE PRÉLÈVEMENT.

Comme nous l'avons déjà précisé, le matériel utilisé par les hydrologues de Yaoundé est assez rudimentaire, mais coûteux, puisqu'il se compose essentiellement du matériel classique de jaugeage employé en hydrométrie, auquel viennent s'ajouter une pompe à main, type Japy, et un lot de jerrycans de 10 litres en plastique.

Il est certain que du point de vue théorique, cet appareillage ne permet pas de prélever correctement des échantillons d'eau puisqu'aucun dispositif spécial n'est prévu pour éviter de modifier la vitesse de l'écoulement au point de prélèvement.

Les échantillonneurs du genre de la turbidisonde NEYRPIC ou des différents Standard Samplers américains ont des orifices qui perturbent le moins possible l'écoulement et, par là même, la répartition des matériaux en suspension, mais les échantillons prélevés sont toujours inférieurs à 1 litre, ce qui, pour certaines rivières du Cameroun, nous donnerait en basses eaux des résidus solides de l'ordre du milligramme. On saisit de suite, l'importance des risques d'erreurs. Par contre, si l'on s'intéresse uniquement au transport en suspension des sables, l'échantillonneur à décantation dit «bouteille de Delft» permet de prélever des quantités appréciables de matériaux.

Les prélèvements à la pompe ou au récipient présentent, à notre avis, le gros avantage de permettre des mesures ponctuelles portant sur plusieurs litres, voire au besoin sur plusieurs décalitres, ce qui améliore sensiblement la précision des résultats en minimisant l'erreur relative totale due à toutes les manipulations sur le terrain ou en laboratoire.

L'influence de la vitesse d'écoulement sur la turbidité est très probablement négligeable pour les particules ayant un diamètre inférieur à  $20 \mu$ , c'est-à-dire les argiles et les limons fins. Or, dans la quasi-totalité des cours d'eau que nous avons étudiés les sables et les limons grossiers représentent certainement moins de 20 % des matériaux solides, excepté sur la Tsanaga à Bogo où ce pourcentage est voisin de 40. Le problème serait tout à fait différent si des mesures systématiques étaient entreprises sur certaines rivières du Nord-Cameroun, où les transports de sable par charriage, saltation et même en suspension, sont très importants. Quelques mesures effectuées sur la Benoue au site de Lagdo à l'aide des «bouteilles de Delft» type DF1 et DF2 ont montré que les volumes de sable transportés à proximité de la surface pourraient être voisins de la moitié de ceux transportés au fond.

En conclusion, on peut dire que pour la majorité des cours d'eau du Cameroun, et pour la grande majorité des fleuves intertropicaux, lorsqu'ils sont peu chargés en éléments solides et que ces éléments sont surtout des limons et des argiles, la méthode de prélèvement simple à la pompe ou au récipient est suffisante; point n'est besoin des équipements raffinés et coûteux cités ci-dessus.

Des mesures comparatives ont été effectuées sur la Sanaga à Nachtigal pour des échantillons de surface prélevés simultanément à la pompe et en plongeant directement les jerrycans dans la rivière.

Ces mesures avaient pour but de voir si l'un ou l'autre des procédés de prélèvements pouvait prétendre mieux représenter le vrai transport solide non mesurable dans sa totalité. Les comparaisons ont porté sur 46 couples de mesures. On a appelé  $x$  les valeurs des prélèvements faits à la pompe et  $y$  les valeurs de ceux effectués à l'aide d'un jerrycan. La liaison entre les couples  $x_i y_i$  est recherchée en calculant la droite dont la position minimise la somme des carrés des distances des divers points  $M_i(x_i, y_i)$  prises perpendiculairement à cette droite. Cette procédure est la seule admissible et recommandable dans l'hypothèse où les erreurs aléatoires, dues aux manipulations sur le terrain et au laboratoire, sont du même ordre de grandeur pour les deux modes de prélèvement [2]; c'est-à-dire que l'on n'est pas dans le cas classique de la corrélation entre deux variables  $Y$  et  $X$ , l'une  $X$  supposée connue et l'autre  $Y$ , chargée de toutes les erreurs aléatoires, étant exprimée en fonction de  $X$ , par minimisation des carrés des écarts.

Si  $\alpha$  est l'abscisse de cette droite sur l'axe des  $x$  ( $y = 0$ ) et  $\theta$  l'angle des perpendiculaires à cette droite avec l'axe des  $x$ , l'équation de la droite s'écrit:

$$x \cos \theta + y \sin \theta - \alpha \cos \theta = 0 \quad (\text{graph. 1})$$

Les équations de minimisations de la somme des carrés des distances à cette droite sont :

$$\frac{1}{2} \operatorname{tg} 2 \theta = - \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 - n \sum x_i^2 + (\sum x_i)^2}$$

$$n \alpha = \sum x_i + \sum y_i \cdot \operatorname{tg} \theta$$

$n$  étant le nombre de couples  $x_i y_i$ , ici 46,  
 $\Sigma$  étant la somme de 1 à 46.

Dans l'exemple précédent, on aboutit à  $\theta = 134^\circ 18'$  donc à une droite d'équation (graph. 1)

$$y = 0,9742 x + 1,045$$

Comme  $\alpha$  est peu différent de zéro et que  $\theta$  donne

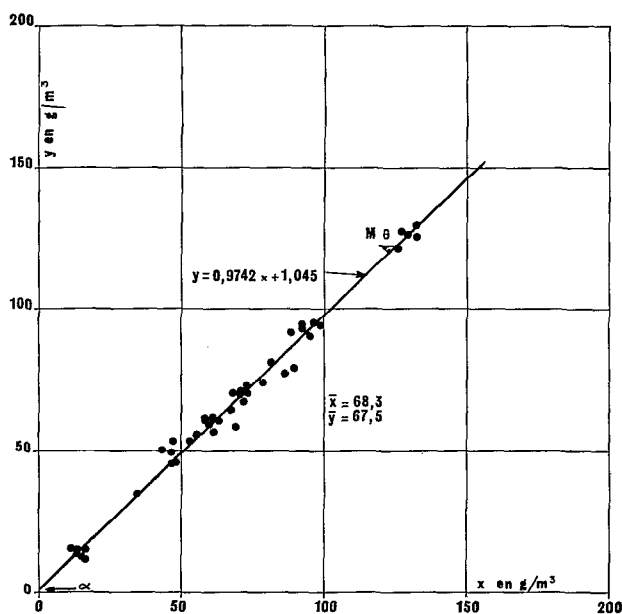


Fig. 1. — Corrélation entre les prélèvements faits à la pompe  $x$  et les prélèvements effectués à l'aide d'un jerrican  $y$ .

une droite peu différente de la bissectrice du quadrant utilisé ( $x$  et  $y > 0$ ) on peut douter de la signification de ces paramètres, ou plutôt douter que la droite de liaison soit significativement différente de la bissectrice  $y = x$ .

On peut le vérifier en comparant la variance des distances des points  $M_i$  ( $x_i, y_i$ ) à la droite calculée et la valeur moyenne des carrés des distances de ces mêmes points à la bissectrice  $y = x$ . Dans l'exemple précédent, on trouve respectivement 6,799 et 8,266.

Le rapport des variances est de 1,217 auquel le test de SNEDECOR accorde une probabilité supérieure à 5 %.

On peut donc conclure que les deux modes de prélèvements ne donnent pas des résultats significativement différents et que l'un et l'autre sont valables.

Parmi les causes d'erreur aléatoire, nous avons signalé l'influence du temps de prélèvement. On peut, en effet, penser que la turbulence plus ou moins marquée de l'écoulement des cours d'eau, peut entraîner des fluctuations de la turbidité : 12 mesures effectuées en 1 heure le 22 septembre 1969 à la station de Nachtigal ont montré que la concentration croissait très légèrement alors que la rivière était en décrue, avec de petites oscillations dont la période serait voisine de 15 minutes et l'amplitude inférieure

à  $\pm$  ou  $-$  10 %. Des mesures effectuées sur des périodes plus longues, jusqu'à 7 heures, ont montré une plus grande stabilité avec peut-être des oscillations dont la période serait toujours supérieure à 1 heure 1/2. Les variations observées ont toujours été inférieures à 10 %, c'est-à-dire à peine supérieures à la précision des mesures, ce qui nous engage à ne pas accorder une trop grande importance à ces fluctuations, étant bien entendu qu'un prélèvement sera d'autant meilleur qu'il sera effectué sur un laps de temps assez long.

## 1.2. DENSITÉ ET RÉPARTITION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT.

La densité des points de prélèvement dans la section de mesure est limitée essentiellement par la durée des opérations de pompage et des manipulations au laboratoire mais également par les possibilités de stockage ou de transport des échantillons. De plus, la méthodologie adoptée impose que les vitesses d'écoulement soient mesurées indépendamment, ce qui double, pour le moins, la durée des mesures.

Sur les petits cours d'eau où les variations de cote sont très rapides, la mesure concomitante des vitesses doit être simplifiée et parfois même supprimée.

Nous avons adopté des densités de prélèvements qui varient entre 10 et 30 points répartis sur 5 ou 6 verticales suivant l'importance du cours d'eau. Les mesures de vitesse sont effectuées comme pour un jaugeage classique sur 12 ou 15 verticales avec 5 à 8 points par verticale. La turbidité au point de mesure, où il n'a pas été effectué de prélèvement, peut être estimée par interpolation en traçant, soit des courbes d'égale concentration, soit des courbes d'égale profondeur.

Le nombre de points de prélèvement par verticale est fonction bien évidemment, de la profondeur de la rivière. Il nous est arrivé parfois pour de faibles profondeurs de ne prendre que 2 points par verticale (Tsanaga à Bogu), alors que sur certaines grandes rivières comme le Mbam ou la Sanaga, certaines mesures ont été faites avec 10 points par verticale.

L'augmentation de la turbidité avec la profondeur n'est pas très nette à la station de Nachtigal, elle l'est davantage à Goura sur le Mbam où nous obtenons en coordonnées semi-logarithmiques un ou plusieurs segments de droite caractérisant une croissance exponentielle, qui peut être discontinue, particulièrement à proximité du fond et dans les zones où la vitesse d'écoulement est suffisamment forte (graphique 2).

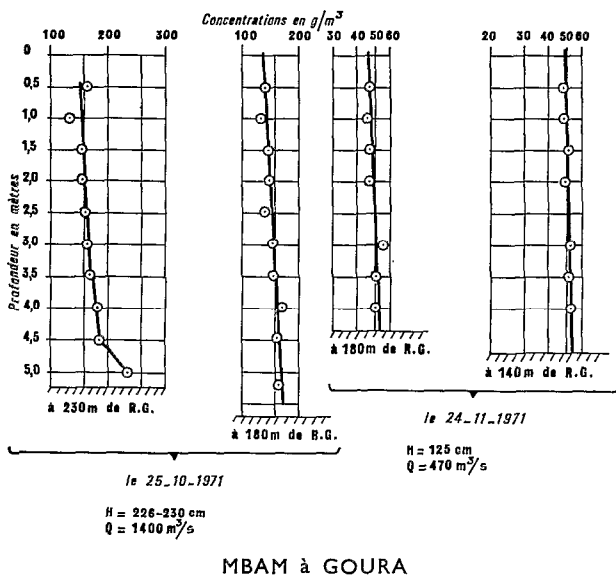


Fig. 2. — Répartition verticale des concentrations mesurées.

Un jaugeage complet a été effectué sur le Mbam à l'aide de 40 prélèvements répartis sur 11 verticales et le résultat obtenu a été comparé à celui qu'on obtient en ne tenant compte que des 6 verticales sur lesquelles ont été effectués tous les autres jaugeages. L'erreur relative est de + 5 %, c'est-à-dire à peine supérieure à l'erreur qui serait faite sur une mesure de débit effectuée dans les mêmes conditions (6 verticales au lieu de 12).

On peut donc conclure qu'une densité de points de prélèvements inférieure à celle des points de mesure des vitesses — lors d'un jaugeage — n'est pas une cause de diminution significative de la précision des résultats.

### 1.3. FRÉQUENCE DES PRÉLÈVEMENTS.

Le but de nos mesures est d'établir avec une précision acceptable, un bilan journalier des transports solides. Or, il n'existe pas, entre la hauteur limnimétrique, ou le débit, et la charge en suspension une relation univoque. Il est donc nécessaire, pour suivre les variations du débit solide, d'effectuer de très fréquentes mesures, à une cadence qui sera liée aux variations du débit.

Si pour une rivière dont le bassin est de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés une à trois mesures par jour suffisent, il en va différemment

des petits cours d'eau où, pour chaque crue, un minimum de trois séries de mesures est nécessaire : une à la montée, une proche du maximum (de préférence avant) et une à la décrue. En l'absence de variations rapides du débit, les prélèvements peuvent être espacés.

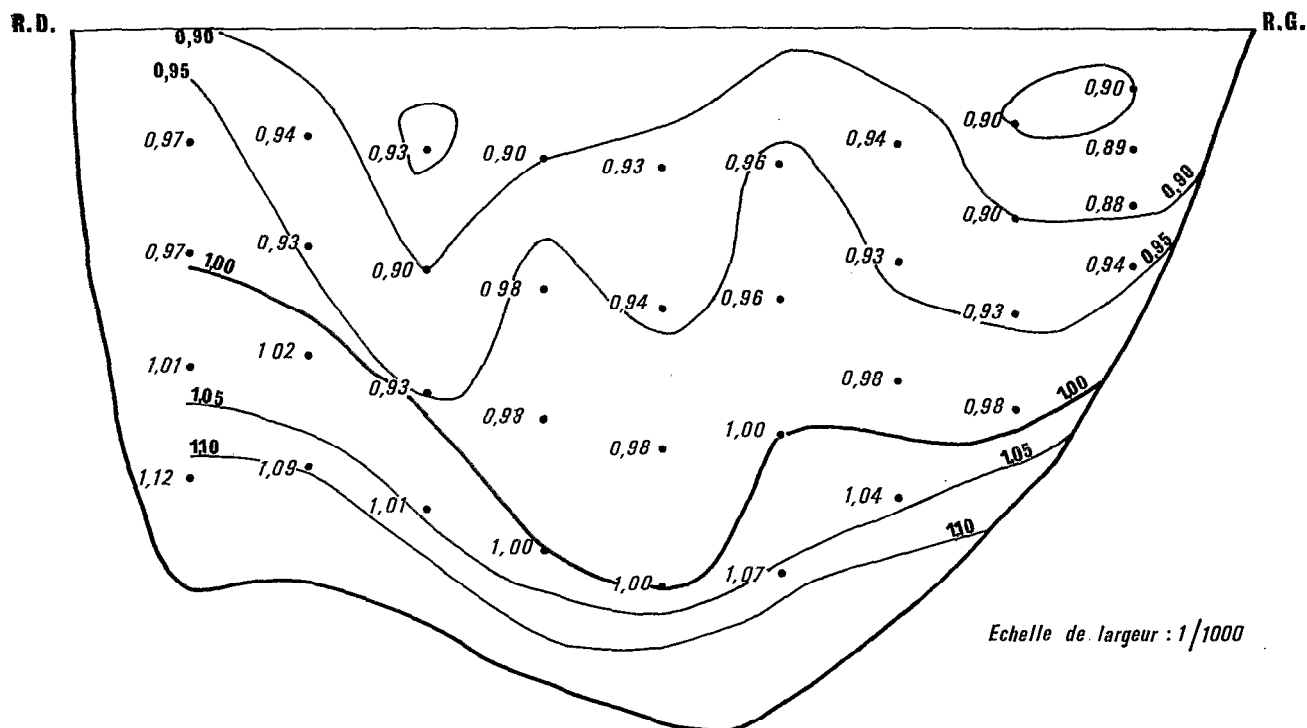
Dans la pratique il n'est évidemment pas possible d'effectuer à de telles cadences des jaugeages complets qui durent généralement plusieurs heures. Pour les petits cours d'eau, on se contente de quelques prélèvements bien répartis sur la section, en négligeant complètement les mesures de vitesse. Pour les rivières importantes, un seul échantillon est, dans la plupart des cas prélevé en un point bien défini de la section.

La solution idéale consisterait à déterminer un ou plusieurs points dont la concentration serait égale à la concentration moyenne sur la section. Une telle expérience a été effectuée sur le Mbam à Goura pour lequel nous avons tracé, à partir de chaque jaugeage complet, les courbes d'égale concentration et choisi neuf verticales bien réparties dans la section. Nous avons, de plus, ramené toutes les sections mouillées à une seule, en appliquant une certaine affinité dont le coefficient était fonction de la cote ; ce qui fait que les quatre points choisis sur chaque verticale restaient fixes quel que soit le débit. Nous avons pu ainsi tracer des courbes « d'égal rapport  $a = c_p / c_m$  à la concentration moyenne »,  $c_p$  étant la turbidité ponctuelle et  $c_m$  la turbidité moyenne sur la section et calculer l'écart-type pour chaque point de mesure théorique, ce qui a permis de tracer des courbes de variations des concentrations ponctuelles ou d'égale valeur de l'écart-type des concentrations ponctuelles.

Par opposition à un point de prélèvement réel du transport solide, on appelle point de mesure théorique, un point de la section où est mesuré la vitesse de l'écoulement mais où il n'y a pas de prélèvement de transport solide, la « mesure-théorique » y étant calculée à partir des courbes d'égales concentration ci-dessus évoquées.

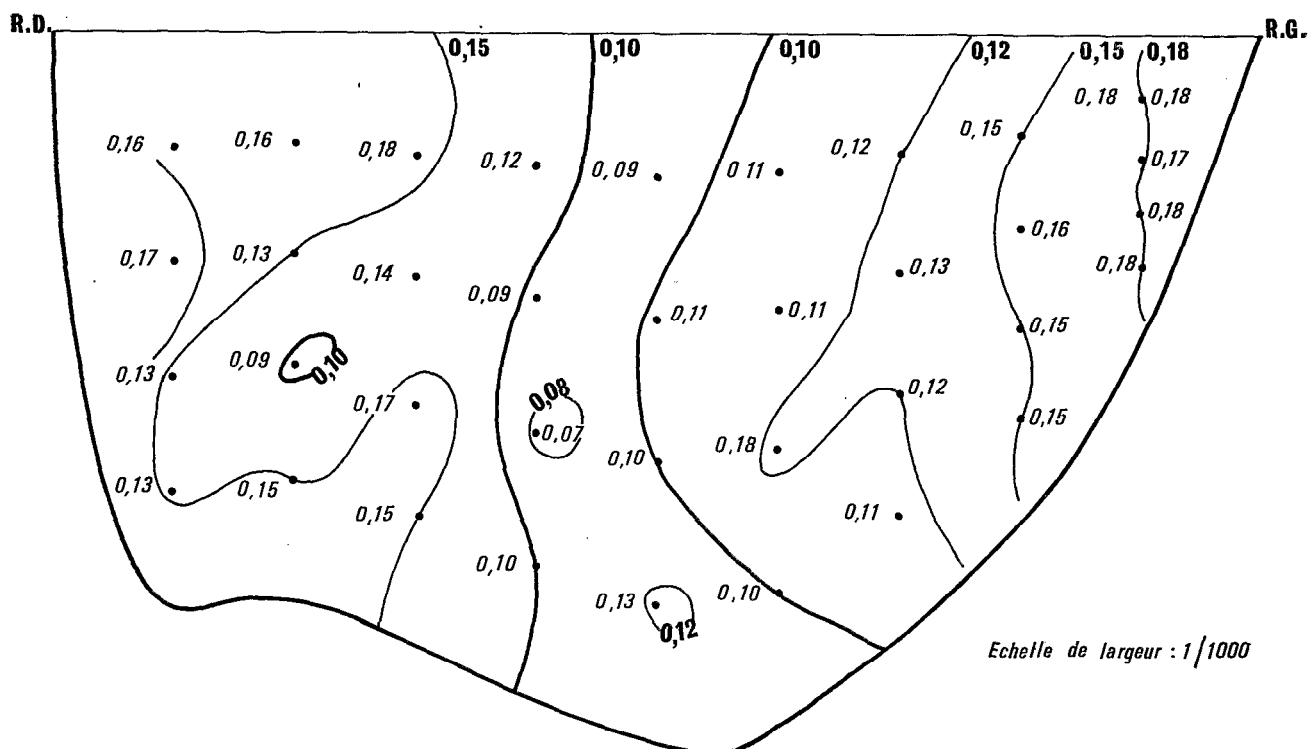
Les graphiques 3 et 4 montrent que les coefficients « a » et par conséquent la turbidité augmentent avec la profondeur, mais que l'écart-type au contraire est relativement constant sur une verticale et qu'il aurait tendance à augmenter lorsqu'on se déplace vers les berges.

Par conséquent, si nous voulions faire un seul prélèvement dans des conditions telles que sa concentration se rapproche le plus possible de la concentration moyenne, il nous faudrait le prendre sur la courbe  $a = 1,00$  entre les deux courbes de plus faible écart-type ( $\sigma = 0,10$ ), soit à peu près au milieu de la rivière, au  $1/5$  de la verticale à partir du fond. Nous aurions



MBAM à GOURA

Fig. 3. — Courbes d'égal rapport à la concentration moyenne  $\alpha = \text{cp/cm}$ .



MBAM à GOURA

Fig. 4. — Courbes d'égal variations des concentrations ponctuelles (égales valeurs de l'écart type).

une meilleure précision en nous plaçant au tiers de la verticale, mais la concentration mesurée devrait être divisée par 0,98. Bien entendu ces sites de prélèvement unique correspondent au cas du Mbam à Goura ; ils seraient différents avec un autre cours d'eau ou une autre section.

Il est certain qu'il serait possible de concevoir un système relativement simple qui permettrait d'effectuer de tels prélèvements. Mais nous avons, jusqu'à présent, opté pour la méthode la plus rapide et surtout la plus pratique qui consiste à faire prélever, par un observateur local, un échantillon à proximité d'une berge, sachant pertinemment que nos mesures ont une dispersion supérieure à celle que nous aurions avec des prélèvements effectués au milieu de la rivière.

1.3.1. Liaison entre un jaugeage complet et un échantillon témoin

1.3.1.1. Sanaga à Nachtigal.

Le graphique 5 montre qu'il existe une liaison linéaire étroite ( $K_r \approx 1$ ) entre la concentration moyenne  $C_m$  et la concentration  $C_r$  d'un échantillon témoin.

La droite d'estimation, N1, passe par le point :

$$\begin{aligned} \bar{C}_r &= 58,4 \text{ g/m}^3 \\ \bar{C}_m &= 60,1 \text{ g/m}^3 \end{aligned}$$

et a pour équation :

$$C_m = 0,957 C_r + 4,2 \text{ en g/m}^3$$

Pour des concentrations supérieures à 98 g/m<sup>3</sup>,  $C_r$  est supérieure à la concentration moyenne. Il nous faut toutefois préciser que la section de mesures se trouve à l'aval d'une série de rapides et que, pour de telles valeurs, qui sont généralement obtenues en période de crues, l'érosion des berges majore quelque peu la turbidité de l'échantillon témoin.

1.3.1.2 Mbam à Goura.

La liaison est ici moins étroite, puisque  $K_r = 0,964$  (graph. 6). Etant donné le nombre de mesures dont nous disposons (9 couples), le coefficient  $K_r$  a 95 chances sur 100 de se situer entre 0,800 et 0,991. Il serait peut-être pessimiste de parler de liaison stochastique.

La droite d'estimation G 1 a pour équation :

$$C_m = 0,979 C_r - 0,6 \text{ en g/m}^3$$

et passe par le point :

$$\bar{C}_r = 140,6 \text{ g/m}^3$$

$$\bar{C}_m = 137,0 \text{ g/m}^3$$

70 % des points de mesures se situent entre les deux droites :

$$C_m = 0,979 C_r - 0,6 + 4,55 \text{ en g/m}^3$$

$$C_m = 0,979 C_r - 0,6 - 4,55 \text{ en g/m}^3$$

Abstraction faite de la dispersion des mesures (erreur aléatoire), la concentration de l'échantillon témoin est systématiquement supérieure à la concentration moyenne.

Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que le lieu de prélèvement de l'échantillon témoin se situe à 300 m à l'amont de la section de jaugeages en laquelle ont été déterminées par mesures complètes les concentrations moyennes ; les courbes d'égal apport  $a = C_r/C_m$  peuvent en effet différer entre les deux sections,  $C_m$  restant à la même valeur.

1.3.1.3. Tsanaga à Bogo.

Plusieurs expériences ont été effectuées en prenant l'échantillon témoin en surface, à 10 m ou à 70 m de la rive droite.

Dans le premier cas (graph. 7) le coefficient de corrélation :

$$\begin{aligned} K_{r1} &= 0,923 \text{ avec } \bar{C}_r = 2343 \text{ g/m}^3 \\ &\quad \bar{C}_m = 2582 \text{ g/m}^3 \\ &\text{et } C_m = 1,079 C_r + 41,84 \text{ en g/m}^3 \end{aligned}$$

70 % des points étant situés à  $\pm 341 \text{ g/m}^3$  de part et d'autre de cette droite.

— Dans le deuxième cas (graph. 8) :

$$\begin{aligned} K_{r2} &= 0,962 \text{ avec } \bar{C}_r = 2373 \text{ g/m}^3 \\ &\quad \bar{C}_m = 2538 \text{ g/m}^3 \\ &\text{et } C_m = 0,922 C_r + 350 \text{ en g/m}^3 \end{aligned}$$

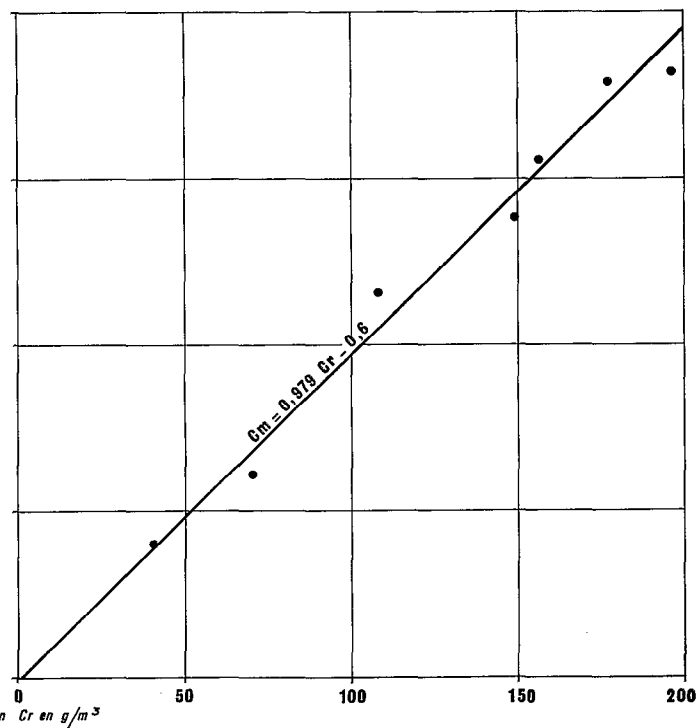
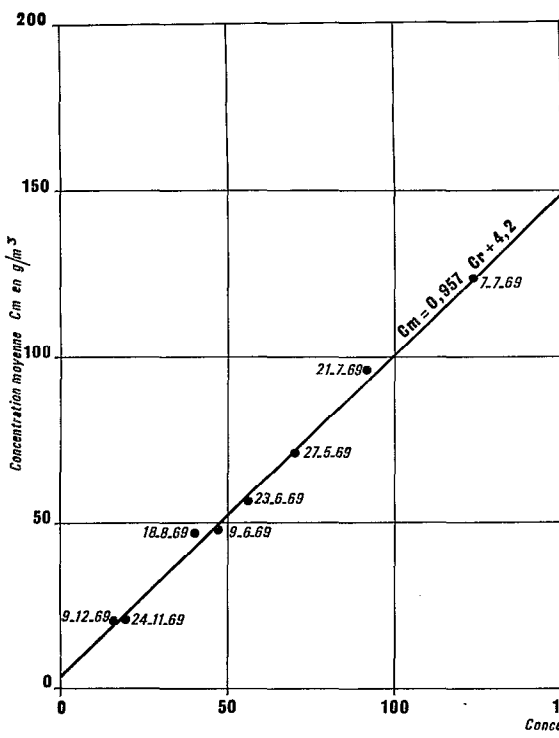
avec 70 % des points situés entre :

$$C_m = 0,922 C_r + 350 \pm 307 \text{ en g/m}^3$$

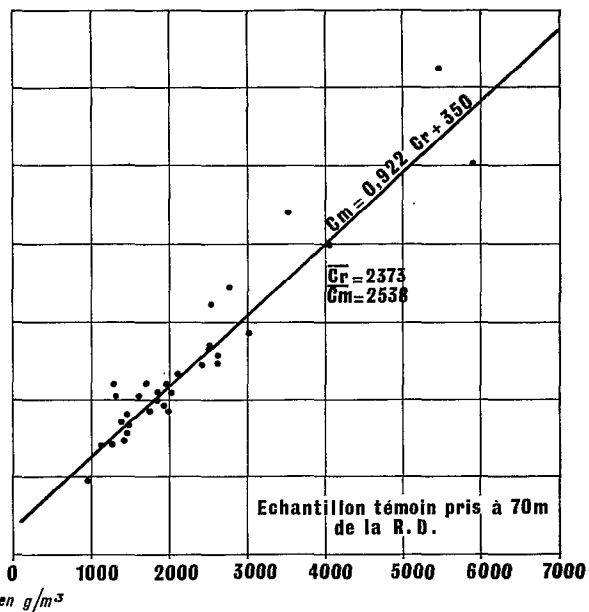
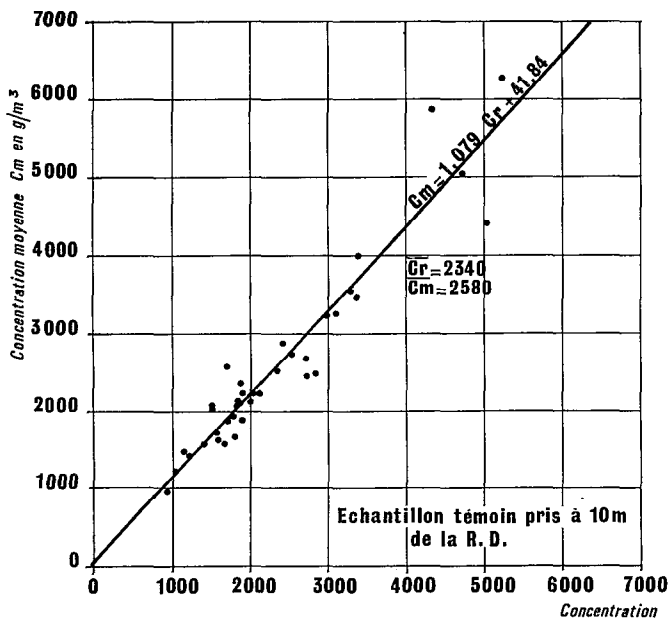
Il apparaît donc que nous aurions un léger gain de précision en prélevant l'échantillon témoin à 70 m de la berge.

1.3.2. Liaison entre un jaugeage complet et un jaugeage partiel.

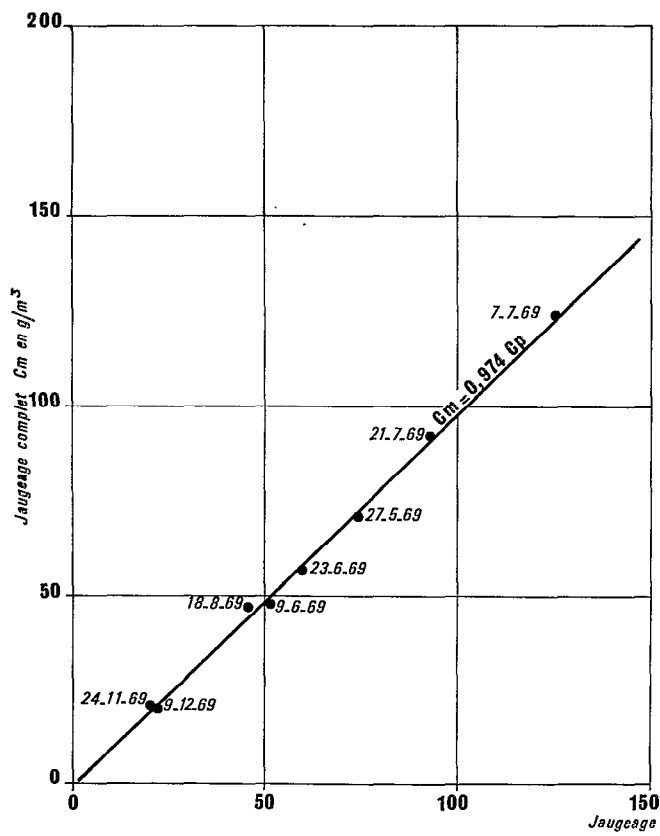
Pour certaines mesures rapides, nous nous sommes contentés d'effectuer uniquement des prélèvements en surface en utilisant généralement les mêmes verticales que pour les jaugeages complets et nous avons essayé de rattacher la moyenne arithmétique de ces mesures  $C_p$  à la concentration moyenne réelle  $C_m$ .



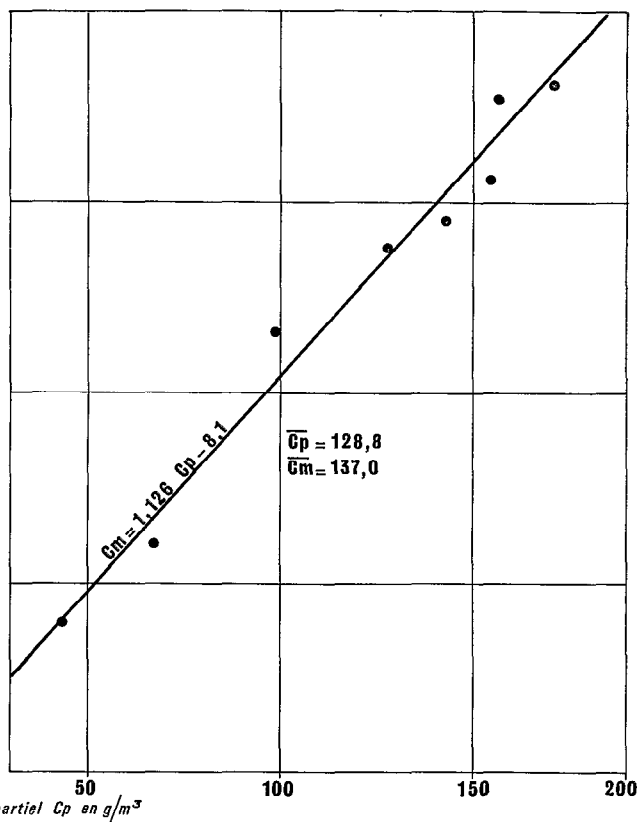
SANAGA à NACHTIGAL 1969 MBAM à GOURA 1970-1971  
 Fig. 5 et 6. — Corrélation entre la concentration moyenne  $C_m$  et la concentration d'un échantillon témoin  $C_r$ .



TSANAGA à BOGO 1969  
 Fig. 7 et 8. — Corrélation entre la concentration moyenne  $C_m$  et la concentration  $C_r$  d'un échantillon témoin.



SANAGA à NACHTIGAL 1969



MBAM à GOURA 1970-1971

Fig. 9 et 10. — Corrélation jaugeage complet - jaugeage partiel.

1.3.2.1. Sanaga à Nachtigal.

Le graphique 9 montre qu'il existe une liaison très étroite (coefficient de corrélation  $K_r$  pratiquement égal à 1) entre les concentrations  $C_m$  et  $C_p$ .

La droite d'estimation,  $N_2$ , a pour équation :

$$C_m = 0,974 C_p$$

et passe par le point :

$$\overline{C_p} = 82,2 \text{ g/m}^3$$

$$\overline{C_m} = 80,2 \text{ g/m}^3$$

La moyenne arithmétique des concentrations de surface serait donc, dans tous les cas, supérieure à la concentration moyenne. Pour les mêmes raisons que nous avons déjà exposées au paragraphe 1.3.1.1, ce phénomène ne nous paraît pas aberrant.

1.3.2.2. Mbam à Goura.

Le coefficient de corrélation  $K_r = 0,991$ .

La droite d'estimation  $G_2$  de  $C_m$  en  $C_p$  a pour équation :

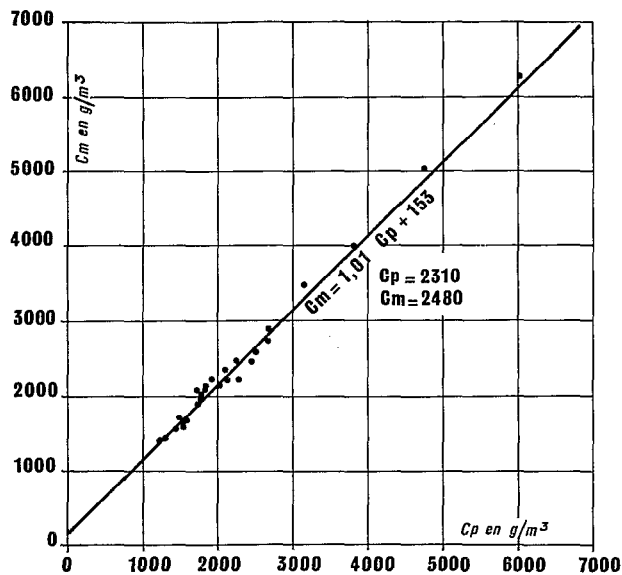
$$C_m = 1,126 C_p - 8,1 \text{ en g/m}^3 \text{ (graph. 10)}$$

70 % des points de mesures se situent entre :

$$C_m = 1,126 C_p - 8,1 \pm 7,2 \text{ en g/m}^3$$

La moyenne arithmétique des concentrations de surface est donc systématiquement inférieure à la concentration moyenne pour des valeurs de  $C_p$  supérieures à  $65 \text{ g/m}^3$ . Au-dessous de cette valeur, la répartition horizontale des concentrations l'emporte sur la répartition verticale. Il est d'ailleurs fort probable que pour de très faibles concentrations la liaison ne soit plus linéaire.





TSANAGA à BOGO 1969

Fig. 11. — Corrélation jaugeage complet - jaugeage partiel.

### 1.3.2.3. Tsanaga à Bogo.

La corrélation est, une fois de plus, très bonne puisque  $Kr = 0,994$  (graph. 11).

La droite d'estimation passe par le point :

$$\overline{Cm} = 2480 \text{ g/m}^3$$

$$\overline{Cp} = 2310 \text{ g/m}^3$$

et a pour équation :

$$Cm = 1,01 Cp + 153 \text{ en g/m}^3$$

avec 70 % des points entre :

$$Cm = 1,01 Cp + 153 \pm 275$$

(la dispersion est donc très faible)

Abstraction faite de l'erreur aléatoire, la concentration moyenne est toujours supérieur à la moyenne des concentrations de surface.

### 1.3.3 Revalorisation des jaugeages partiels.

Les liaisons entre les jaugeages partiels et les jaugeages complets ne présentent un certain intérêt que dans la mesure où elles permettent de préciser les corrélations entre les jaugeages complets et les prélèvements témoins.

#### 1.3.3.1 Sanaga à Nachtigal.

Vingt-trois mesures partielles ont été revalorisées à l'aide de la relation établie au paragraphe 1.3.2.1 et nous avons constaté qu'il existait une liaison linéaire entre une telle mesure qui peut, en fait, être assimilée à un jaugeage complet, et un échantillon témoin ; on a en effet :

$$Kr = 0,99$$

avec  $\overline{Cr} = 49,0 \text{ g/m}^3$  (moyenne de la concentration de l'échantillon témoin)

$\overline{Cm'} = 49,7 \text{ g/m}^3$  (moyenne de la concentration moyenne reconstituée à partir de jaugeages partiels)

et une équation de droite  $N_3$  :

$$Cm' = 0,961 Cr + 2,6 \text{ en g/m}^3 \text{ (graph. 12)}$$

Bien que les deux populations de mesures soient différentes, nous pouvons constater que les deux droites de régression  $N_1$  (par. 1.3.1.1) et  $N_3$  ont des équations voisines et que, par conséquent, la simple mesure de la concentration d'un échantillon de 10 litres permet d'obtenir une bonne estimation de la concentration moyenne.

#### 1.3.3.2 Mbam à Goura.

L'échantillon étudié compte 17 mesures théoriques de  $Cm$  c'est-à-dire 17 mesures partielles de concentration transformées en mesures complètes théoriques par la liaison définie au paragraphe 1.3.2.2. On obtient une excellente liaison entre les prélèvements ponctuels et ces moyennes reconstituées  $C'm$  :

$$Kr = 0,996$$

avec une droite d'estimation G 3 d'équation :

$$C'm = 1,07 Cr - 0,8 \text{ en g/m}^3 \text{ (graph. 13)}$$

et 70 % des points situés entre :

$$C'm = 1,07 Cr - 0,8 \pm 6,3$$

Les régressions G 1 (par. 1.3.1.2) et G 3 donnent, donc des estimations de  $Cm$  qui diffèrent de 10 %.

Pour le calcul du bilan journalier des transports solides, nous avons préféré utiliser la droite G 1, qui, bien qu'ayant été obtenue à partir d'un nombre restreint de mesures, nous semble plus acceptable que G 3 qui a été calculé à partir de mesures théoriques, reconstituées d'après des jaugeages partiels.

#### 1.3.4 Jaugeages complets simplifiés.

Il est possible que faute de temps (de telles mesures sont souvent très longues) ou dans le cas où les variations de débit ne peuvent pas être tenues pour néglig-

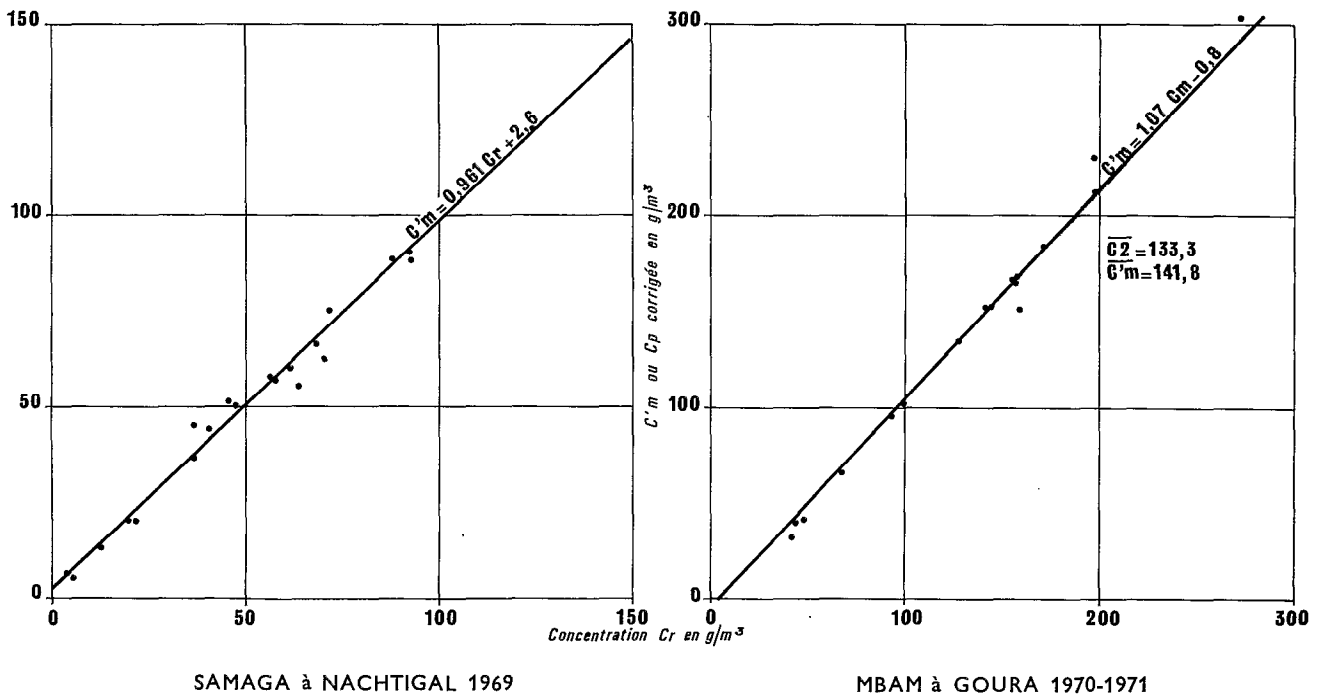


Fig. 12 et 13. — Corrélation entre la concentration moyenne théorique  $C'm$  et la concentration d'un échantillon témoin  $Cr$ .

geables, l'opérateur ne puisse pas à la fois mesurer les vitesses de l'écoulement et faire des prélèvements. On se contente alors de prendre pour concentration moyenne la moyenne arithmétique des concentrations. Cette méthode ne donne des résultats valables que dans la mesure où les prélèvements sont faits toujours sur les mêmes verticales.

Il nous faut, en effet, préciser que, malgré un marnage supérieur à 4 mètres, dans leur largeur «utile» les sections de Nachtigal et Goura, où ont été effectuées des mesures de ce type, sont relativement stables.

#### 1.3.4.1 Sanaga à Nachtigal.

Sur le graphique 14 figure la droite de régression  $N_4$  qui permet d'estimer la concentration moyenne à partir de la moyenne arithmétique  $Ca$  de «n» concentrations, «n» étant toujours supérieur à 23.

La liaison entre ces deux couples de mesures est étroite ( $Kr \simeq 1$ ) et  $N_4$  a pour équation  $Cm = 0,954Ca$ .

La moyenne arithmétique des concentrations donne donc une estimation par excès de la concentration moyenne réelle.

#### 1.3.4.2 Mbam à Goura

Nous disposons pour cette station de 20 couples de mesures qui doivent être scindés en deux classes, la section de mesures ayant été changée en 1970. — de 1966 à 1968 : 11 mesures (graph. 15)

$$Kr = 0,992 \text{ avec } \overline{Ca} = 110,4 \text{ g/m}^3$$

$$\overline{Cm} = 109,2 \text{ g/m}^3$$

$$\text{et } Cm = 0,997 Ca - 0,9 \text{ en g/m}^3$$

70 % des points étant compris entre :

$$Cm = 0,997 Ca - 0,9 \pm 6,6 \text{ en g/m}^3$$

— à partir de 1970 : 9 mesures (graph. 16)

$$Kr = 0,996 \text{ avec } \overline{Ca} = 139,3 \text{ g/m}^3$$

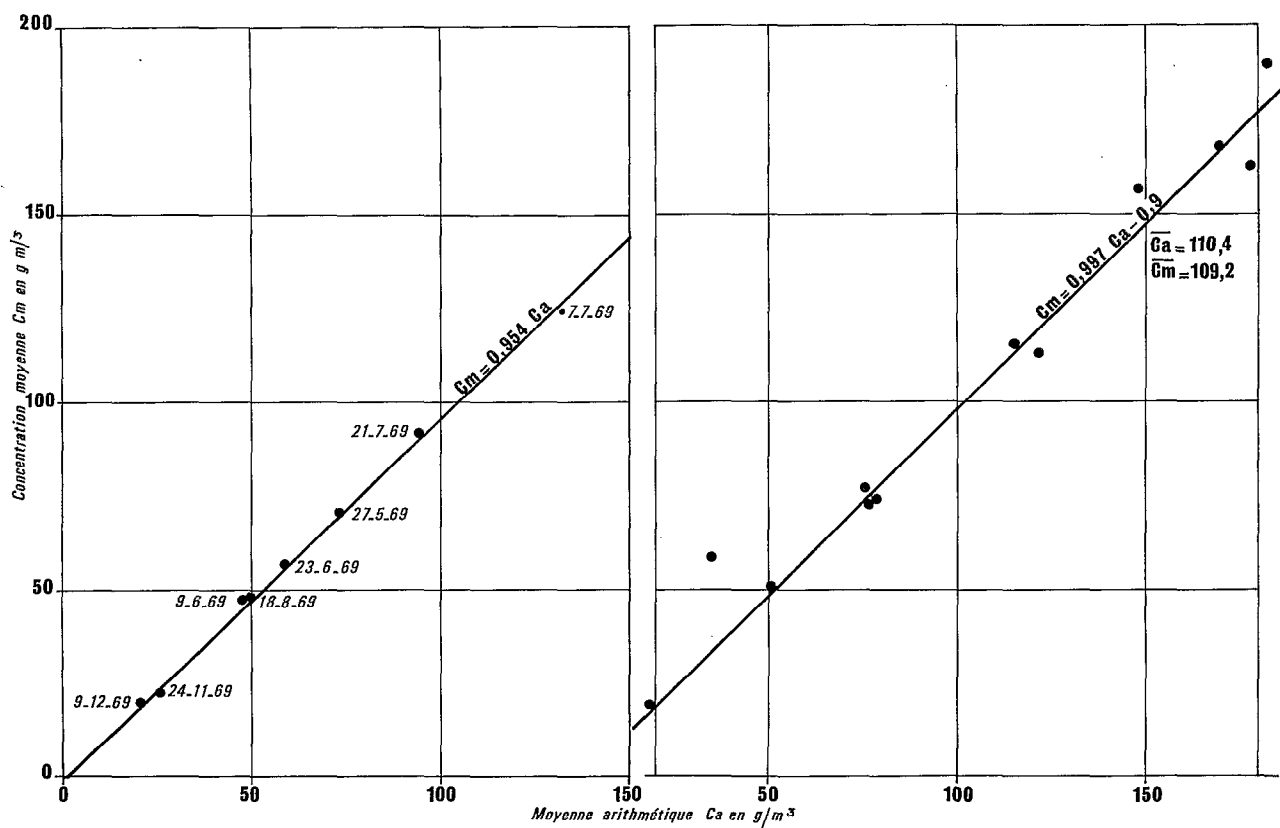
$$\overline{Cm} = 137,4 \text{ g/m}^3$$

$$\text{et } Cm = 1,005 Ca - 3,0 \text{ en g/m}^3$$

70 % des points étant compris entre :

$$Cm = 1,005 Ca - 3,0 \pm 4,8 \text{ en g/m}^3$$

La moyenne arithmétique des concentrations prises sur la deuxième section donne une meilleure estimation de la concentration moyenne puisque, pour un



SANAGA à NACHTIGAL 1969

MBAM à GOURA 1966-68

Fig. 14 et 15. — Corrélation entre la concentration moyenne  $C_m$  et la moyenne arithmétique des concentrations  $C_a$ .

nombre de mesures relativement équivalent, le coefficient de corrélation est légèrement supérieur et surtout, la dispersion moins importante.

En conclusion de ce paragraphe sur la fréquence des prélèvements on peut dire que :

a) la concentration moyenne réelle d'un cours d'eau en éléments transportés en suspension, mesurée par un jaugeage complet est généralement en liaison étroite avec la simple moyenne arithmétique des concentrations ponctuelles mesurées, avec la moyenne des concentrations de prélèvements limités à la surface, et même avec un simple prélèvement témoin en un point de référence choisi ;

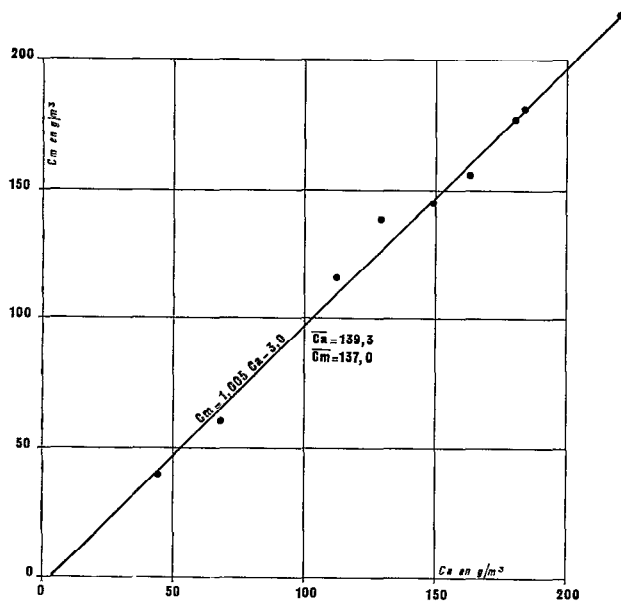
b) selon les cours d'eau et les sections considérées, les liaisons précédentes sont plus ou moins étroites et les concentrations ponctuelles, de surface ou arithmétiques systématiquement tantôt supérieures,

tantôt inférieures aux concentrations moyennes réelles.

## 2. OPERATIONS DE LABORATOIRE

### 2.1. DÉCANTATION

Durant plusieurs années, nous avons utilisé l'acide chlorhydrique comme flocculant, à raison de 5 ml pour 10 litres. Toutefois depuis plus d'un an, de nombreux essais ont été effectués en utilisant le sulfate d'aluminium qui donne de meilleurs résultats, la décantation étant plus rapide et le dépôt solide plus concentré ; nous avons, en effet, observé qu'il se formait très fréquemment des agrégats de particules.



MBAM à GOURA 1970-71

Fig. 16. — Corrélation entre la concentration moyenne  $C_m$  et la moyenne arithmétique des concentrations  $C_a$ .

L'emploi d'un accélérateur de floculation le PURI-FLOC 17, a été un échec, de nombreuses particules venant très rapidement se coller à la paroi du récipient au lieu de se déposer au fond.

Malgré tout, cette méthode de décantation au sulfate d'aluminium semble présenter un petit inconvénient, car une certaine quantité de sulfate (des traces ont été décelées à l'aide du chlorure de baryum) pourrait rester piégée dans le dépôt solide, ce qui fausserait légèrement la mesure lorsqu'on opère par filtration ou lorsque l'on veut calculer rigoureusement la teneur en sels dans la méthode par dessiccation.

Dans le cas de filtration, on peut facilement remédier à cet inconvénient en rinçant deux ou trois fois le résidu solide avec 30 ou 40 ml d'eau permutée. Cette opération est très rapide et n'allonge pas sensiblement le temps de filtration.

Dans la méthode par dessiccation, on peut calculer le poids de sels à partir d'un autre prélèvement, ce qui entraîne toujours une certaine dispersion dans les résultats.

Nous insistons toutefois sur le fait qu'il s'agit d'une cause d'erreur minime, dont on peut faire abstraction dans bien des cas.

Le siphonnage, opération toujours délicate, est rendu plus sûr en utilisant un petit tube coudé dont l'orifice est tourné vers le haut ; des petits tubes de verre travaillés au-dessus d'un bec Bunsen conviennent parfaitement.

## 2.2. FILTRATION ET DESSICCATION.

Le résidu après siphonnage étant de l'ordre de 500 ml, deux méthodologies, présentant chacune certains inconvénients, peuvent être adoptées.

A — On peut opérer directement *par dessiccation* en transvasant le résidu dans un bécher qui est placé ensuite sur une plaque chauffante, puis à l'étuve. Ce transvasement peut entraîner une erreur par défaut, les particules ayant tendance à adhérer aux parois du récipient, d'autant plus que nous sommes limités pour les opérations de rinçage par la capacité du bécher qui doit rester relativement modeste.

Parallèlement à cette manipulation, il est indispensable, surtout pour les faibles turbidités, de mesurer la teneur en sels non pas de l'eau de la rivière mais de la solution contenant le floculant. Cette opération est d'autant plus nécessaire que c'est au moment où les eaux ont le moins de charge solide (en étiage) que leur teneur en sels est la plus élevée puisqu'il s'agit alors uniquement de l'eau de restitution des nappes souterraines.

Nous avons ainsi mesuré en saison sèche sur le Mbam à la station de Goura des conductivités supérieures à 120 m.mho/cm (à 20°), alors qu'au mois d'octobre, elles sont nettement inférieures à 40 m.mho/cm. Les teneurs en sels peuvent donc passer de 50 mg/l à 120 mg/l. Il nous faut évidemment tenir compte, en plus, de la présence du sulfate d'aluminium dans la solution à évaporer.

Nous pensons que le problème de l'évaluation du poids des sels dissous ne doit pas être éludé trop hâtivement ; nous en avons tenu compte chaque fois que nous avons utilisé la méthode par dessiccation.

B — Pour un certain nombre de raisons que nous avons déjà exposées, la méthode *par filtration* reste la plus simple, la plus rapide et surtout la plus pratique. Toutefois, sans aborder le problème de la précision des pesées qui n'est pas spécifique à la filtration, nous devons citer parmi les causes d'erreurs systématiques, l'indétermination de la porosité des filtres utilisés. Ceux que nous employons couramment ont, d'après le fournisseur, une porosité voisine de  $5\mu$ , mais il est bien précisé que selon la température, la viscosité, les phénomènes d'absorption et de gonflement des fibres sans oublier le colmatage des pores (on saisit ici l'importance des agrégats qui se forment

lorsqu'on utilise le sulfate d'aluminium), cette porosité descend facilement au-dessous de  $1\mu$ .

Plusieurs expériences ont été effectuées afin d'essayer d'étudier ce phénomène :

— tout d'abord en utilisant cinq filtres emboîtés, nous n'avons constaté aucune augmentation de poids des quatre filtres inférieurs. Les variations observées sont du même ordre de grandeur que la précision de la mesure ;

— une seconde expérience a consisté à filtrer sur trois filtres emboîtés l'eau provenant d'une première filtration effectuée à l'aide d'un seul filtre. Nous n'avons là encore observé aucune augmentation significative de poids.

On peut objecter qu'il n'est absolument pas évident que la porosité de plusieurs filtres emboîtés soient inférieures à celle d'un filtre unique.

— dans une dernière expérience, nous avons filtré des solutions contenant des quantités connues d'argile (de 50 mg à 2 g) où le pourcentage des particules inférieures à  $2\mu$  était supérieur à 60. La plus forte erreur relative mesurée est voisine de 20 %, mais elle est en moyenne inférieure à 5 %. Il faut évidemment tenir compte du fait que lorsqu'on trouve une erreur anormalement forte, il ne s'agit plus d'une erreur systématique mais d'une erreur accidentelle absolument pas significative et qui peut avoir des causes très diverses : erreur de pesée, perte d'une partie du résidu solide au cours des manipulations, ou au contraire mauvais rinçage d'un récipient ou du résidu, etc.

Quoiqu'il en soit, nous pensons que le problème de l'utilisation d'une qualité de filtres est un faux problème étant donné qu'il est toujours possible de trouver un type de matériel répondant parfaitement aux normes demandées.

#### Remarque.

Nous conseillons, pour profiter au maximum du phénomène de colmatage des pores, de récupérer le premier tiers du filtrat pour le passer une deuxième fois sur le filtre.

### 2.3. PESÉE

L'étude de l'absorption d'humidité par le résidu sec a déjà été abordée par plusieurs chercheurs (B. BILLON et J.F. NOUVELOT : *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Hydrol. vol. V n° 2, 1968 et vol. VI n° 2, 1969) ; certaines solutions telles que l'emploi de récipients étanches ou l'établissement de courbes de correction par extrapolation, peuvent être proposées.

La méthode la plus simple consiste cependant à

utiliser, lorsque c'est possible un dessiccateur et une balance de précision à lecture directe qui permet de faire très rapidement les pesées.

Il ne faut tout de même pas perdre de vue qu'en l'absence de précaution particulière, l'erreur relative ne sera importante (voisine de 20%) que pour de faibles concentrations (généralement inférieures à  $20 \text{ g/m}^3$ ) qui interviennent très peu lors du calcul final permettant d'estimer la dégradation spécifique annuelle.

### 2.4. ÉTUDE COMPARATIVE DES MÉTHODES PAR DESICCATION ET PAR FILTRATION.

Cette étude a été effectuée sur deux séries de 42 prélèvements.

Chaque prélèvement de 20 l était séparé, après une bonne homogénéisation, en deux échantillons de 10 l dont l'un était traité par dessiccation, l'autre par filtration. Un prélèvement de  $500 \text{ cm}^3$  effectué sur chacun des échantillons permettait de connaître la teneur en sels.

On compare donc 42 couples de valeurs F, concentration mesurée par filtration, et D, concentration mesurée par dessiccation et corrigée de la teneur en sels dissous.

Cette étude comparative s'apparente à celle que nous avons faite (cf. 1.1.) entre les modes de prélèvement à la pompe et au récipient. Mais les deux procédures, filtration et dessiccation, comportent des manipulations différentes, aussi n'est-il pas possible d'admettre que les erreurs aléatoires de chacune sont du même ordre de grandeur et pareillement distribuées.

Dans ce cas, on peut s'affranchir de cet inconvénient en comparant non pas les couples F, mais les couples formés par leurs différences  $F - D$  et leurs sommes  $F + D$  ; sur ces nouveaux couples, en effet, on peut faire l'hypothèse d'une distribution identique des erreurs.

La droite de liaison se calcule également par minimisation des carrés des distances perpendiculaires ; son équation est :

$$(F - D) = -0,010487 (F + D) - 0,0142$$

La variance résiduelle est de 0,002877.

Pour vérifier si la mesure par filtration est significativement différente de celle par dessiccation, il suffit de comparer cette variance à :

$$\frac{\Sigma (F - D)^2}{42} = 0,00512$$

Le test de SNEDECOR n'accorde que 3 % de probabilité à l'hypothèse formulée ; si l'on s'en tient classi-

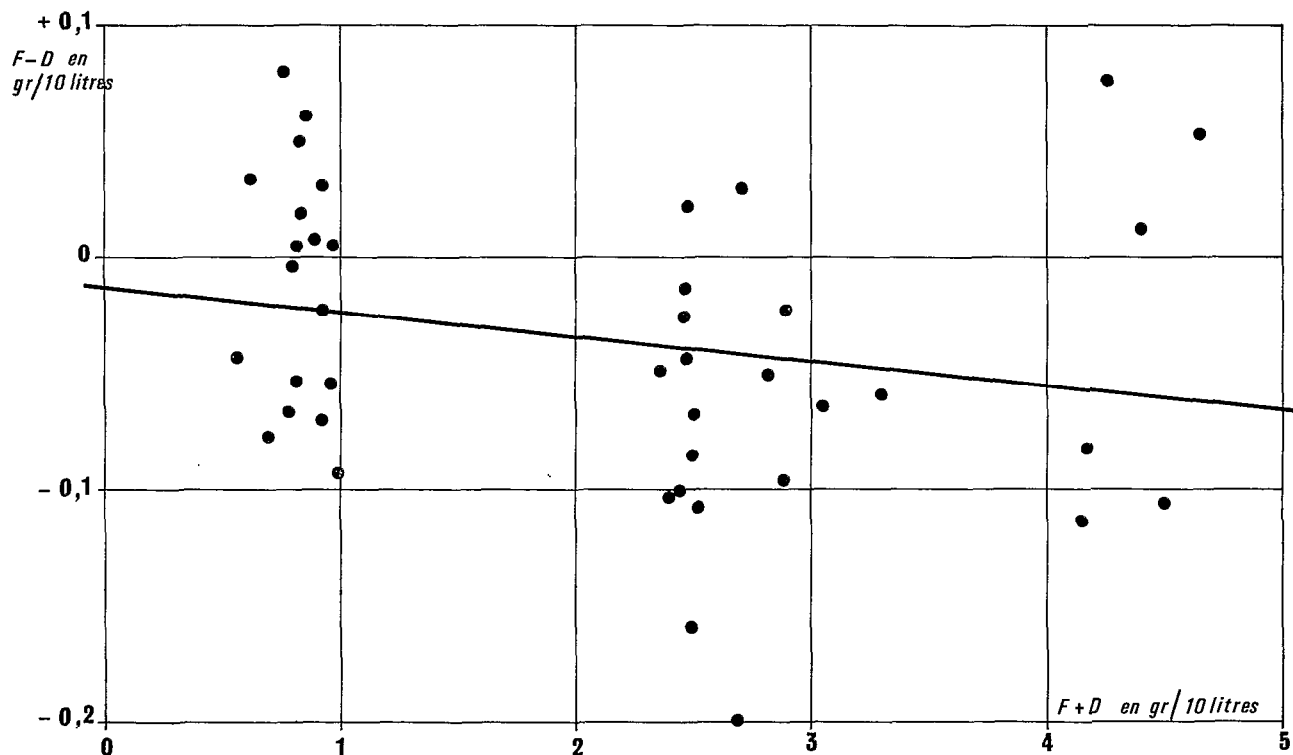


Fig. 17. — Etude comparative de la filtration et de la dessiccation.

quement au seuil de 5%, on peut conclure à une différence systématique entre les mesures par filtration et celles par dessiccation, les premières étant inférieures aux secondes (cf. graph 17).

En procédant par filtration, on fait une erreur par défaut qui reste cependant modérée ; en valeur absolue, elle passe de 2,5 g sur des concentrations de 50 g/m<sup>3</sup> à 6 g sur des concentrations de 200 g/m<sup>3</sup> ; en valeur relative, cette erreur est inférieure à 5 %.

En conclusion, nous pensons que pour des concentrations supérieures à 50 g/m<sup>3</sup>, la simplicité des opérations, alliée à une erreur relative acceptable, engage à employer la méthode par filtration.

Pour les faibles turbidités, la méthode par précipitation et dessiccation est à conseiller bien que l'estimation de la teneur en sel reste un problème assez délicat qui complique encore les manipulations lorsque l'on recherche une bonne précision. La mesure de la conductivité n'est, à notre avis, qu'un pis-aller, car s'il existe une relation entre la teneur en sels

dissous dans une solution et sa conductivité, celle-ci est influencée par le pH, la valeur des ions et le degré d'ionisation ; de plus la composition chimique de l'eau peut varier, assez sensiblement, au cours de l'année hydrologique.

### 3. CALCUL DU DEBIT SOLIDE

Nous pensons qu'il est tout à fait inutile de revenir en détail sur le calcul du débit solide à partir des concentrations, déjà exposé dans des articles précédents, déjà cités [3].

Il est bien évident que la méthode la plus précise consiste à utiliser, dans le cas de jaugeages complets, une double intégration graphique définie par.

$$Q_s = \int_0^L \int_0^P C.V. dl dp$$

avec: l l'abscisse dans la section

L la largeur totale de la section

p la profondeur

P la profondeur totale d'une verticale donnée, étant bien entendu que le jaugeage sera d'autant plus précis que le nombre de verticales et le nombre de points de prélèvements sur ces verticales seront plus nombreux. Nous avons vu au paragraphe 1.2. que l'erreur relative faite en diminuant le nombre de prélèvements était légèrement supérieure à celle qui serait faite sur une mesure de débit calculée à partir du même nombre de points.

Une méthode de calcul simplifiée consiste à prendre comme valeur approchée de la concentration moyenne la moyenne arithmétique  $C_a$  des concentrations des échantillons, et d'en déduire le débit solide par la relation :

$$Q_s = C_a \times Q$$

En nous référant au paragraphe 1.3.4., il apparaît que, pour des points bien précis dans la section, la valeur de  $C_a$  ne diffère jamais sensiblement de  $C_m$ , les échantillons prélevés à proximité du fond ayant tendance à donner des  $C_a$  légèrement supérieurs aux  $C_m$ . Il est bien évident que les régressions permettent toujours d'introduire un terme correctif.

#### 4. PRÉCISION DES RÉSULTATS

Il est difficile de chiffrer l'erreur relative totale faite sur la mesure des concentrations, car cette erreur est d'autant plus forte que la turbidité est faible. Nous avons pu, en effet, constater que dans toutes les régressions, la dispersion restait presque du même ordre de grandeur en valeur absolue lorsque l'on passe des faibles aux fortes concentrations.

En scindant les concentrations en différentes classes, nous pouvons considérer que la précision des mesures est :

— pour  $C < 10 \text{ g/m}^3$  :

$$\frac{\Delta C}{C} > 20 \%$$

— pour  $10 < C < 60 \text{ g/m}^3$

$$5 \% < \frac{\Delta C}{C} < 20 \%$$

— pour  $C > 60 \text{ g/m}^3$  :

$$\frac{\Delta C}{C} < 5 \%$$

Dans le calcul du débit solide interviennent, en plus, les erreurs dues au mode de prélèvement qui, nous l'avons vu, peuvent dépasser 10 %, et les erreurs d'échantillonnage dues aux imperfections des appareils, mais aussi à la densité des prélèvements (erreur voisine de 5 %) et à la durée limitée de ces prélèvements (erreur atteignant 10 %).

Il nous faut enfin mentionner dans le calcul du bilan les erreurs liées à la position dans la section, ou même hors de la section, de l'échantillon témoin. Un échantillon prélevé de la berge peut entraîner des erreurs supérieures à 15 % dans l'intervalle de confiance 70 %. Cette erreur peut, évidemment, comme nous l'avons montré, être sensiblement réduite par le choix d'un point de prélèvement plus adéquat.

Il ne faut pas conclure trop hâtivement, en faisant le bilan de toutes ces erreurs, que les transports solides sont connus avec une mauvaise précision, car il est bien évident que toutes ces erreurs ne sont pas indépendantes et que certaines peuvent même agir en sens contraire. De plus, les valeurs élevées des erreurs ne sont obtenues que pour de faibles concentrations qui sont des termes presque négligeables du bilan. C'est ainsi qu'à Nachtigal ou Goura, il peut passer en 24 heures, au mois de juillet, autant de matières solides que durant les trois mois de saison sèche.

Remarque :

Nous aurions pu aborder cette étude en faisant une analyse statistique des écarts des différentes mesures de turbidité à la concentration moyenne  $C_m$ .

Nous avons préféré utiliser la méthode des corrélations car elle nous permet d'avoir directement une estimation de  $C_m$  avec les différentes erreurs dont elle est entachée.

#### 5. CONCLUSION

On parvient au terme de cette étude, à une méthodologie qui tient compte à la fois des contraintes imposées par les conditions locales et de la recherche d'une précision acceptable.

Tout d'abord, en ce qui concerne les prélèvements il faut différencier les petits cours d'eau, où de très nombreuses mesures sont indispensables, les variations de débit étant très rapides, des rivières importantes où les prises d'échantillons peuvent être moins fréquentes.

Dans tous les cas, une étude de la répartition des concentrations dans la section de mesures est indis-

pensable afin de n'avoir à faire qu'un minimum de prélèvements pour estimer la concentration moyenne. Un seul échantillon témoin pourra parfois être suffisant. Malgré tout, sur les rivières où les variations du plan d'eau sont hautes, il sera bon d'effectuer à intervalle régulier, tous les 15 jours par exemple, des jaugeages complets qui donneront la concentration moyenne réelle (en opposant ici réelle à théorique ou recalculée par corrélation). On peut même prévoir, à intervalle plus rapproché, tous les 8 jours, une série de prélèvements de surface. Nous avons vu comment, à partir de toutes ces mesures, nous pouvions obtenir une bonne estimation de la concentration moyenne.

Les prélèvements peuvent être effectués, soit à la pompe, soit au seau, soit à l'aide d'un jerrycan ou tout autre appareil plus ou moins élaboré. Le transvasement dans une dame-jeanne de 10 l transparente n'entraîne pas d'erreur appréciable et l'emploi du sulfate d'aluminium comme flottant donne de bons résultats.

Le siphonnage, qui permet de réduire l'échantillon, doit être mené avec prudence.

Pour les faibles concentrations, nous pensons qu'il est préférable d'utiliser la méthode par dessiccation, sans oublier de mesurer la teneur en sels dissous. Pour des turbidités plus conséquentes, la méthode par filtration permet un gain de temps appréciable, d'autant plus qu'il est possible de se procurer du papier filtre à fibres de verre qui a une faible porosité (filtre millipore).

La pesée du résidu sec reste, dans tous les cas, une cause d'erreur importante, surtout en climat humide. L'emploi d'un dessiccateur et d'une balance de pré-

cision à lecture directe nous semble être la meilleure solution pour supprimer au maximum l'absorption d'humidité. Des termes correctifs peuvent être introduits en traçant des courbes de variation du poids en fonction du temps et en les extrapolant vers l'instant  $t = 0$ .

Quant au calcul du débit solide, la méthode de la double intégration graphique est tout à fait satisfaisante.

Le calcul du volume transporté en suspension par jour peut être fait, pour les rivières importantes, en partant de la concentration moyenne journalière et en appliquant la relation  $V_{TS} = Q_s \cdot 86400 = C_m \cdot Q \cdot 86400$  ; pour les petits cours d'eau, le poids total de matières transportées en 24 heures est obtenu en intégrant graphiquement le débit solide  $Q_s$  sur ce laps de temps, le débit solide  $Q_s$  étant calculé pour chaque mesure complète ou partielle des concentrations dans la section

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] NOUVELOT (J. F.) - 1969 - Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. VI, n° 4.
- [2] KENDALL (M. G.), STUART (A.) - The advanced theory of statistics. Vol. 1, Distribution theory. Ch. Griffin and Co. Ltd, London.
- [3] BILLON (B.), COLOMBANI (J.), NOUVELOT (J. F.) - *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. V, n° 2 ; vol. IV, n° 2 et vol. VI, n° 4.