

Hydr

Extrait du « Colloque sur la morphologie des rivières »
Assemblée générale de Berne, sept.-oct. 1967

NOTE SUR LES INSTRUMENTS ET LES MÉTHODES UTILISÉS POUR LA MESURE DES DÉBITS SOLIDES EN SUSPENSION DU MONO AU TOGO

J. COLOMBANI

Maître de recherches de l'ORSTOM

RÉSUMÉ

Dans cette note sont exposés les moyens mis en œuvre pour la mesure des débits solides en suspension du Mono au Togo.

Les principales sources d'erreurs sont répertoriées et examinées : erreurs dues à l'imperfection des instruments, erreurs dues aux méthodes de prélèvements (répartition spatiale et répartition dans le temps).

Dans un dernier paragraphe est abordée l'étude d'une corrélation éventuelle entre le débit solide moyen journalier et le débit liquide moyen journalier.

INTRODUCTION

Notre propos en rédigeant cette note est de décrire les instruments et les méthodes de mesure de débit solide utilisés à la station de Corrékopé sur le Mono.

Nous n'exposerons pas en détail l'ensemble des résultats obtenus qui feront l'objet d'un exposé ultérieur mais seulement ce que l'on peut espérer des moyens techniques mis en œuvre. Nous essayerons d'évaluer la précision que l'on peut en attendre.

Nous nous garderons bien d'affirmer que nos conclusions sont valables dans n'importe quel cas. Tout au plus peut-on penser qu'elles seront utiles dans des conditions pas trop différentes, c'est-à-dire dans une grande partie de l'Afrique de l'Ouest.

I. CONDITIONS NATURELLES RÉGNANT DANS LE BASSIN DU MONO

Tous les résultats utilisés ont été obtenus en 1966 sur le Mono à la station de Corrékopé.

Le bassin versant du Mono à cette station couvre une superficie de 9 952 km². Il s'étend sur un plateau gneissique vallonné avec des intrusions granitiques et des filons pegmatitiques. Les bordures nord et nord-ouest, plus accidentées, présentent des quartzites avec des passées schisteuses. La végétation naturelle est une savane arborée plus ou moins dense avec des forêts ripicoles.

Le Mono est soumis à un régime tropical de transition, variante dahoméenne. La saison sèche n'est pas assez sévère pour entraîner une dénudation complète du sol, et une végétation assez abondante subsiste toute l'année. La hauteur de précipitation annuelle pas très élevée (1 200 à 1 300 mm par an), répartie sur six mois environ, a pour conséquence une érosion très modérée, et freinée également par la végétation. (Les zones cultivées sont loin de couvrir tout le bassin).

Le lit du fleuve, bien marqué, présente une alternance de biefs à fond sableux et de rapides. Le profil longitudinal du lit, bien loin d'avoir atteint sa position d'équilibre, démontre la faible capacité érosive du fleuve.

La station de mesure est située dans un bief à une centaine de mètres à l'aval d'un rapide.

Les berges sont limoneuses ou sableuses et encombrées de végétation hygrophile.

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° B/2027

23 JANV 1968

II. MATÉRIEL UTILISÉ

a) Détermination des débits liquides

Le matériel utilisé est classique :

- un limnigraphe enregistreur donne les hauteurs d'eau avec une bonne précision;
- la relation hauteur-débit est très convenablement établie par 65 jaugages exécutés avec un moulinet OTT type universel soit à pied avec une perche pour les faibles débits, soit à l'aide d'un canot pneumatique et un système treuil-saumon pour les débits plus élevés. Les mesures sont faites dans une section matérialisée par un câble métallique tendu entre les deux rives. Le tarage de la station est stable sauf pour les étiages pour lesquels des mesures doivent être faites tous les ans.

b) Détermination des débits solides en suspension

Le matériel utilisé est très simple :

- une pompe type Japy;
- un tuyau plastique de 20 mm de diamètre, équipé de crochets pour le fixer au câble électroporteur tous les 50 cm au cours de la descente de l'ajutage de prise.

L'ajutage de prise est constitué par l'extrémité recourbée à l'horizontale du tuyau plastique, ouverture face au courant, fixée au système saumon-moulinet de façon rigide. L'orientation de l'ajutage est assurée d'une part par la traînée qui s'exerce sur le tuyau et qui met l'ajutage dans un plan vertical, d'autre part par une fixation rigide au gouvernail du moulinet qui se maintient toujours dans le sens du courant. La déviation de l'ajutage par rapport au courant n'est vraisemblablement pas nulle mais pas très élevée. Le tuyau est enroulé dans le bateau sur un tambour métallique, la sortie de l'eau ne faisant pas un embout fixe à travers l'axe de rotation du tambour. L'eau prélevée est recueillie dans des jerricans en plastique jaugés à un volume connu (environ 10 litres) par un repère horizontal sur le goulot. Dans certains cas, le prélèvement est fait directement à l'aide des jerricans en plastique.

Les prélèvements transportés au campement sont décantés sur place. Pour cela, les 10 litres de chaque prélèvement sont versés, après remise en suspension énergique des troubles, dans un seau en plastique. La décantation s'effectue en 24 heures après addition d'environ 5 cm³ d'acide chlorhydrique. Les seaux sont protégés des poussières par des couvercles. L'eau clarifiée résiduelle est siphonnée à l'aide d'un tube recourbé vers le haut à son extrémité. Le résidu, mélange d'eau et de matière en suspension, d'un volume de 1 litre environ est transporté au laboratoire de Lomé dans des bouteilles de plastique ou de verre. Les parois du seau sont rincées avec l'eau siphonnée pour récupérer toutes les particules décantées.

Au laboratoire de Lomé, après un nouveau siphonnage (la décantation s'étant poursuivie dans les flacons de 1 litre), les résidus sont transvasés dans des béciers tarés, puis réduits à une boue liquide très épaisse par chauffage doux sur une plaque chauffante. Le passage à l'étuve à 105° permet le séchage complet. L'échantillon sec est alors pesé puis conservé dans un flacon jusqu'à un traitement ultérieur, soit soumis immédiatement à une analyse granulométrique ou à une analyse chimique.

III. PERSONNEL EMPLOYÉ

Les opérations sur le terrain sont dirigées par un chercheur, l'exécution étant confiée à 75% à un agent technique et un aide-technique. En 1966, le chercheur et l'agent technique ont effectué de nombreux séjours de courte durée sur le terrain,

l'aide-technique est resté sur place du 20 mai 1966 au 28 février 1967 (début de l'écoulement le 31 mai 1966, fin de l'écoulement le 20 février 1967). Les contrôles directs effectués sur les mesures par le chercheur à tous les stades des opérations permettent de s'assurer de leur bonne exécution. Du personnel auxiliaire est nécessaire : 1 chauffeur, 2 aides-hydrologues et éventuellement, des manœuvres.

IV. MODE OPÉRATOIRE

1. *Prélèvements de routine*

L'aide technique effectuée, tous les jours à 8 heures, un prélèvement directement à l'aide d'un jerrican plastique jaugé de 10 litres environ. Le prélèvement est fait en trois fois à 30 cm de profondeur en trois points différents de la section (approximativement au quart, à la moitié et aux trois quarts de la largeur); ce prélèvement, mis à décanter le jour même, est siphonné le lendemain, et le résidu mis en bouteille.

Simultanément, la température et le *pH* de l'eau sont mesurés, trois prélèvements de 1 litre sont faits pour l'étude des matières dissoutes.

2. *Prélèvements exceptionnels*

En cas de crue notable, l'aide technique effectuée selon les mêmes modalités un prélèvement supplémentaire au cours de la montée de la crue et un ou deux autres au début de la décrue. Ces prélèvements sont également traités dans les 24 heures.

3. *Prélèvements réguliers*

Tous les huit à dix jours, l'agent technique effectuée à l'aide de la pompe Japy, une série de 12 prélèvements répartis dans la section sur 5 verticales (3 verticales avec 2 points, 2 verticales avec 3 points). Les points de prélèvement sont répartis le mieux possible, mais il a parfois fallu tenir compte de conditions naturelles dangereuses pour le personnel et le matériel (vitesses du courant trop élevées). Dans ce cas, les prélèvements ne pouvaient être faits aux fortes profondeurs (3 à 4 m avec un saumon de 25 kg sur un canot Zodiac Mark II, 4 à 5 m sur un canot Zodiac Mark III avec un saumon de 50 kg). Pendant les plus fortes crues, les opérations sont souvent interrompues par l'arrivée intempestive de bois flottants de grandes dimensions, masses de plusieurs tonnes se déplaçant à des vitesses de 5 à 6 km/h (troncs de fromagers et autres). Les prélèvements sont décantés dans les 24 heures et le résidu mis en bouteille.

V. OBSERVATIONS SUR LES TRANSPORTS EN SUSPENSION

Il est intéressant d'essayer d'évaluer la précision des mesures de transport en suspension, compte tenu des moyens utilisés. Les principales causes d'incertitude sont :

- imperfection du matériel d'échantillonnage;
- traitements subis par les échantillons après le prélèvement;
- répartition dans l'espace des prélèvements;
- répartition dans le temps des prélèvements.

a) *Imperfection du matériel d'échantillonnage*

Un appareil de prélèvement qui modifie le champ de vitesses au point de prise est a priori suspect. Cependant les particules transportées en suspension par le Mono à Corrékopé sont de faibles dimensions et le risque de ségrégation en fonction de la granulométrie est pratiquement négligeable. La vitesse d'aspiration dans notre système

est d'environ 0,70 m/s en moyenne avec des fluctuations dues au mouvement alternatif de la pompe Japy. La plus grande partie du débit solide transite dans les zones à fortes vitesses (plus de 1 m/s) où les particules sont les plus fines. Près du fond, la turbidité augmente ainsi que les dimensions d'une fraction des particules transportées, mais les vitesses diminuent fortement : à 30 cm du fond (profondeur de nos prélèvements les plus profonds), la vitesse varie de 0,30 m/s ou moins, à 1 m/s et la différence de vitesse avec l'aspiration dans l'ajutage n'est pas très forte. L'effet de ségrégation éventuel est donc réduit et l'erreur qui en résulte s'applique à une faible fraction du débit solide total. Il faut surtout craindre une erreur dans l'étude de la variation de la granulométrie des sédiments en fonction de la profondeur.

Nous envisageons de comparer les résultats obtenus à l'aide d'une pompe Japy et d'une turbidisonde quoique l'emploi de cette dernière soit difficile dans nos conditions de travail (matériel nautique très léger, et rayon d'action de plus de 1.000 km au cas où nous voudrions ultérieurement étendre nos mesures à l'ensemble du Togo et du Dahomey).

Lorsque les prélèvements sont faits directement dans un jerrican en surface, les conditions ne sont pas très bonnes mais pour les mêmes raisons que ci-dessus (éléments très fins en surface), cela n'a pas beaucoup d'importance. Nous évaluons a priori à 1% au maximum l'erreur due au matériel.

b) *Traitement subi par les échantillons*

Il y a de nombreuses causes d'erreur.

1. *Mesure du volume prélevé*

En traçant un repère sur le goulot du jerrican recevant l'échantillon, on définit un volume un peu supérieur à 10 litres que l'on peut mesurer une fois pour toutes. On peut estimer l'erreur possible à 0,5% maximum.

2. *Floculation par l'acide chlorhydrique*

Un volume de 5 cm³ d'acide chlorhydrique 12 fois normal, ajouté à 10 litres d'eau, donne une solution de normalité égale à 0,006 N. Le pH de cette solution est de l'ordre de 2 unités. Dans ces conditions, on est en droit de se demander s'il n'y a pas attaque du résidu solide et mise en solution partielle. Aussi nous avons procédé à des essais, en analysant l'eau siphonnée après la décantation, puis l'eau résiduelle restée en contact avec le résidu pendant 20 à 30 jours et qui, une nouvelle décantation s'effectuant durant ce laps de temps, est siphonnée au laboratoire avant séchage du résidu. Les analyses d'eau siphonnée après la première décantation sont très peu nombreuses jusqu'à ce jour mais les résultats obtenus ne montrent que des variations négligeables par rapport à la composition de l'eau naturelle, à l'exception évidemment de la présence de chlore en grande quantité.

L'eau provenant du deuxième siphonnage après contact prolongé avec le résidu présente des teneurs en Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺ pratiquement inchangées par rapport à celles de l'eau naturelle. Par contre, les teneurs en Fer et en Alumine sont très augmentées. Un calcul fait sur la douzaine d'analyses effectuées montre qu'au maximum une fraction égale à 3% du résidu est mise en solution de cette façon, la proportion moyenne étant de l'ordre de 2%. Ce fait demandera évidemment à être confirmé.

3. *Séchage à 105°*

Le séchage dans ces conditions n'a pas d'influence sur le poids du résidu. Ce séchage est nécessaire pour évacuer toute l'eau d'imbibition. Il est possible que les matériaux

après séchage ne se remettent pas en suspension de la même façon que dans la suspension initiale et que les mesures granulométriques soient perturbées.

4. *Pesage*

L'erreur faite sur le poids du résidu est négligeable : les balances utilisées permettent la mesure du poids avec une précision au demi-milligramme au moins et le poids de résidu pour 10 litres de prélèvement varie de 5 à 50 centigrammes pendant l'étiage et de 0,5 gr à 5 gr ou plus pendant les moyennes et hautes eaux.

c) *Répartition spatiale des prélèvements*

1. *Répartition des points de prélèvement au cours d'un prélèvement régulier*

Les 12 points de prélèvements sont répartis sur 5 verticales de façon à couvrir d'une façon à peu près homogène l'ensemble de la section. La plupart du temps il est admis de prendre, comme turbidité moyenne de la section, la moyenne arithmétique des turbidités ponctuelles. En fait, il conviendrait de pondérer les turbidités ponctuelles par les vitesses ponctuelles. Cela conduit à donner plus d'importance aux turbidités des points à vitesses élevées. Il en résulte que la turbidité moyenne pondérée est généralement inférieure à la turbidité moyenne arithmétique. Nous avons indiqué dans un rapport antérieur une méthode d'interpolation permettant, à partir de 12 points, d'estimer la moyenne pondérée des turbidités. Cette méthode appliquée au Mono à Corrékopé nous a conduits à établir que l'on surestime la turbidité moyenne de 2 à 3% en utilisant la moyenne arithmétique.

2. *Corrélation entre un prélèvement de 10 litres effectué en trois points en surface (30 cm de profondeur) et un prélèvement régulier en 12 points*

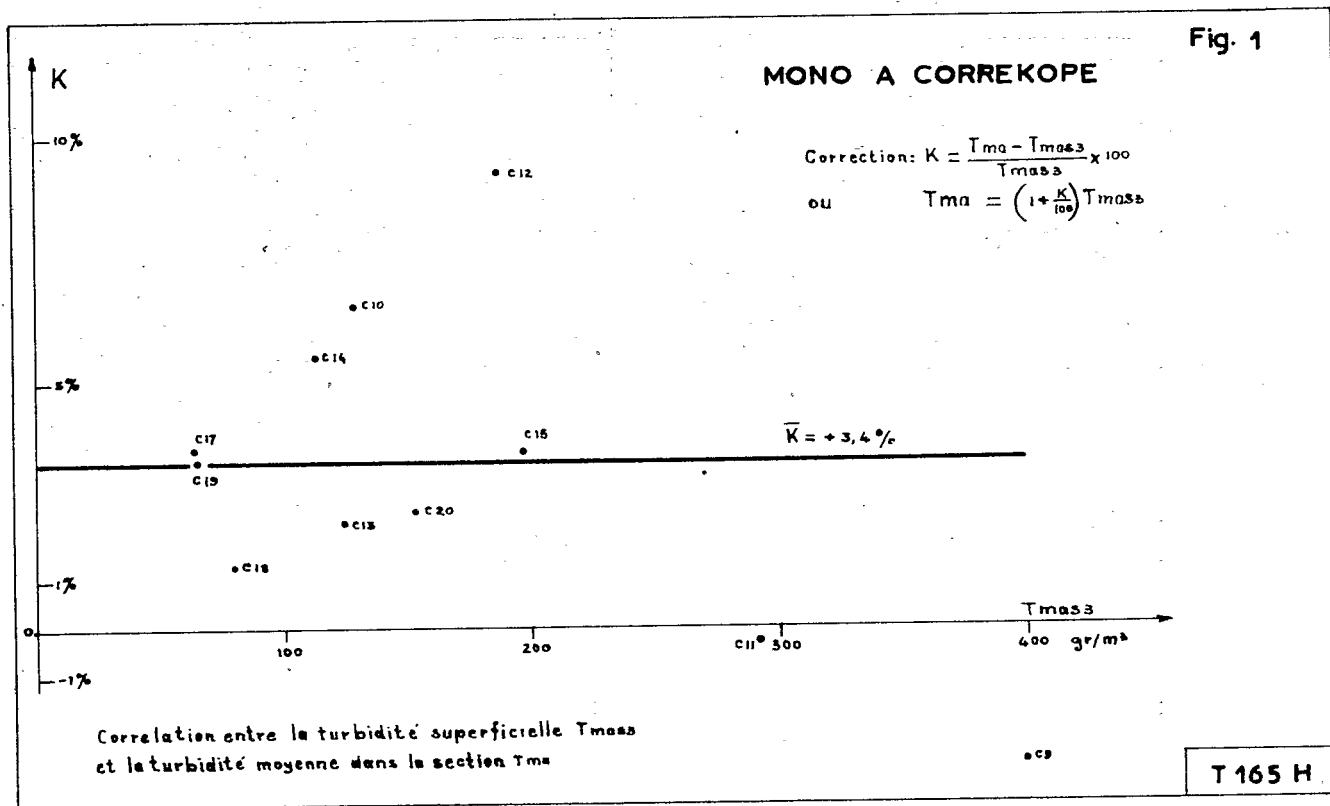
Nous avons comparé les turbidités obtenues par ces 2 méthodes simultanément pour 10 prélèvements réguliers (cf. figure 1). La dispersion des points est assez grande mais on constate que la correction à apporter à la turbidité mesurée en surface n'atteint 10% dans aucun des cas observés, et que la majorité des points se groupent assez bien autour d'une valeur moyenne égale à 3,4%. L'étude de cette corrélation nécessitera de nouvelles mesures.

La nécessité de limiter le nombre de prélèvements nous a conduits pour les prélèvements de routine à utiliser uniquement les prélèvements de surface.

d) *Répartition dans le temps des prélèvements*

1. *Représentativité d'un échantillon ponctuel*

Le prélèvement avec la pompe Japy de 10 litres d'eau dure environ 45 secondes. Nous avons effectué en un même point 4 prélèvements successifs sans changer notre appareil de place. L'ensemble de l'opération a duré 4 minutes environ. L'expérience a été faite à diverses profondeurs. Pour des teneurs de l'ordre de 100 gr/m³, nous avons pu observer en un point des fluctuations importantes de la turbidité mesurée, ces fluctuations atteignant, suivant les points, de 5% à 16%. Notons que, sur l'ensemble de la section, il y a vraisemblablement une compensation et que la valeur moyenne trouvée est obtenue avec une approximation meilleure que 3%. Le phénomène est analogue dans ses effets sur la mesure à celui qui se produit pour la mesure des débits liquides par suite des fluctuations de vitesse. Nous comptons effectuer de nouveaux essais de ce genre pour confirmer ces chiffres. Ces fluctuations expliquent d'ailleurs



les difficultés que nous avons parfois rencontrées dans l'application de notre méthode de pondération des turbidités par les vitesses.

2. Variation de la turbidité avec le temps

Nous avons constaté qu'au cours d'une crue la turbidité commence par croître rapidement pendant la montée de la crue, puis atteint un maximum, parfois avant le maximum de la crue, et décroît ensuite de telle sorte que le débit solide, après avoir atteint un maximum, ne varie plus beaucoup avant que la décrue soit nettement commencée (cf. fig. 2 et 2 bis). Dans ces conditions, il est indispensable d'avoir une mesure de turbidité pendant la montée de la crue, et 1 ou 2 après le maximum de crue pour pouvoir estimer raisonnablement le débit solide. Cela est facile à obtenir lorsque la crue s'étend sur deux jours ou plus, mais nécessite plus d'attention de la part de l'opérateur lorsque la crue se passe en 24 heures ou moins.

En dehors des crues, les variations de la turbidité sont assez lentes et une mesure quotidienne à heure fixe est suffisante.

L'erreur commise du fait de l'espacement des mesures dans le temps ne peut qu'être évaluée pour l'instant. Dans les conditions où nous avons opéré, nous pensons qu'elle doit être de l'ordre de 5%. Des essais seront entrepris pour une meilleure évaluation. Mais à notre avis, cette erreur est la plus importante que l'on puisse commettre et il est inutile de perfectionner les appareils si l'on ne prend pas le maximum de précaution dans ce domaine.

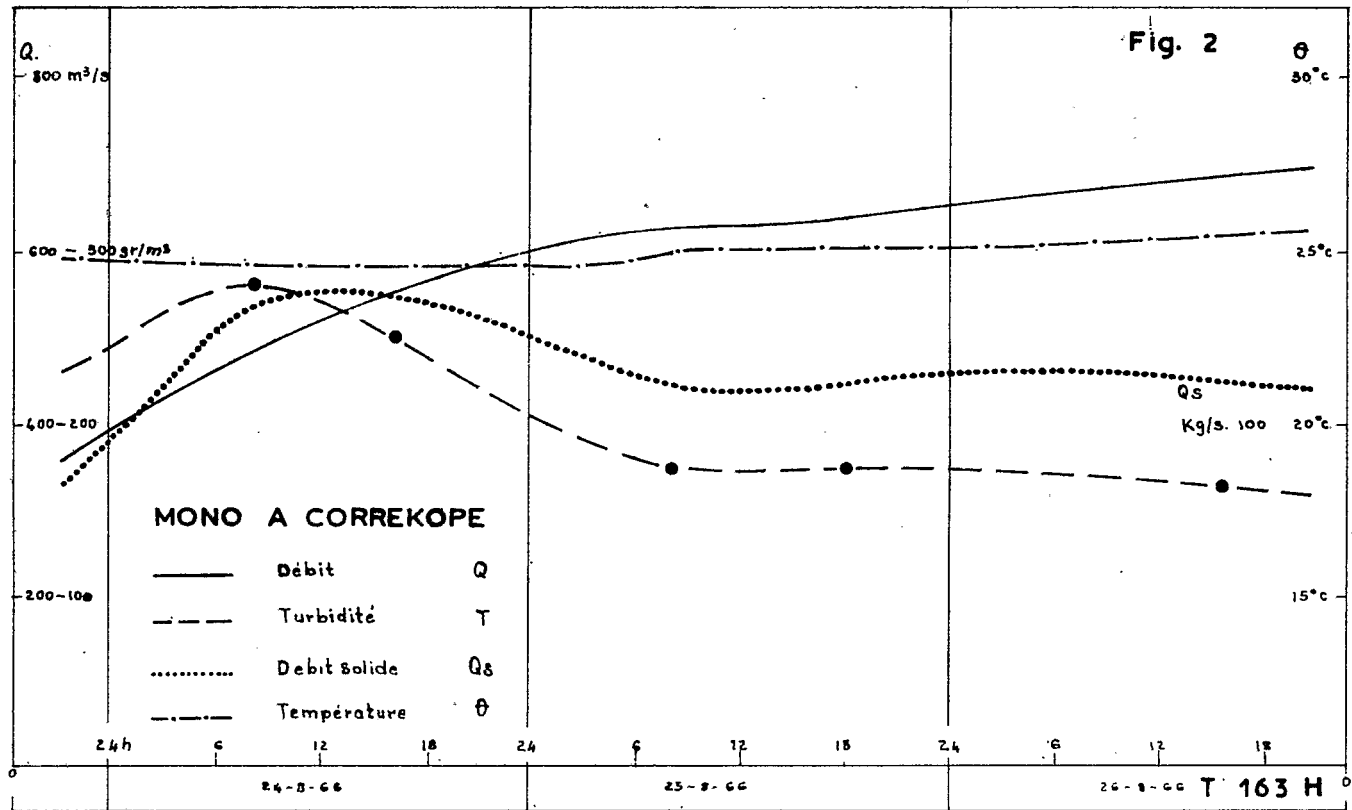
CONCLUSION DU PARAGRAPHE V

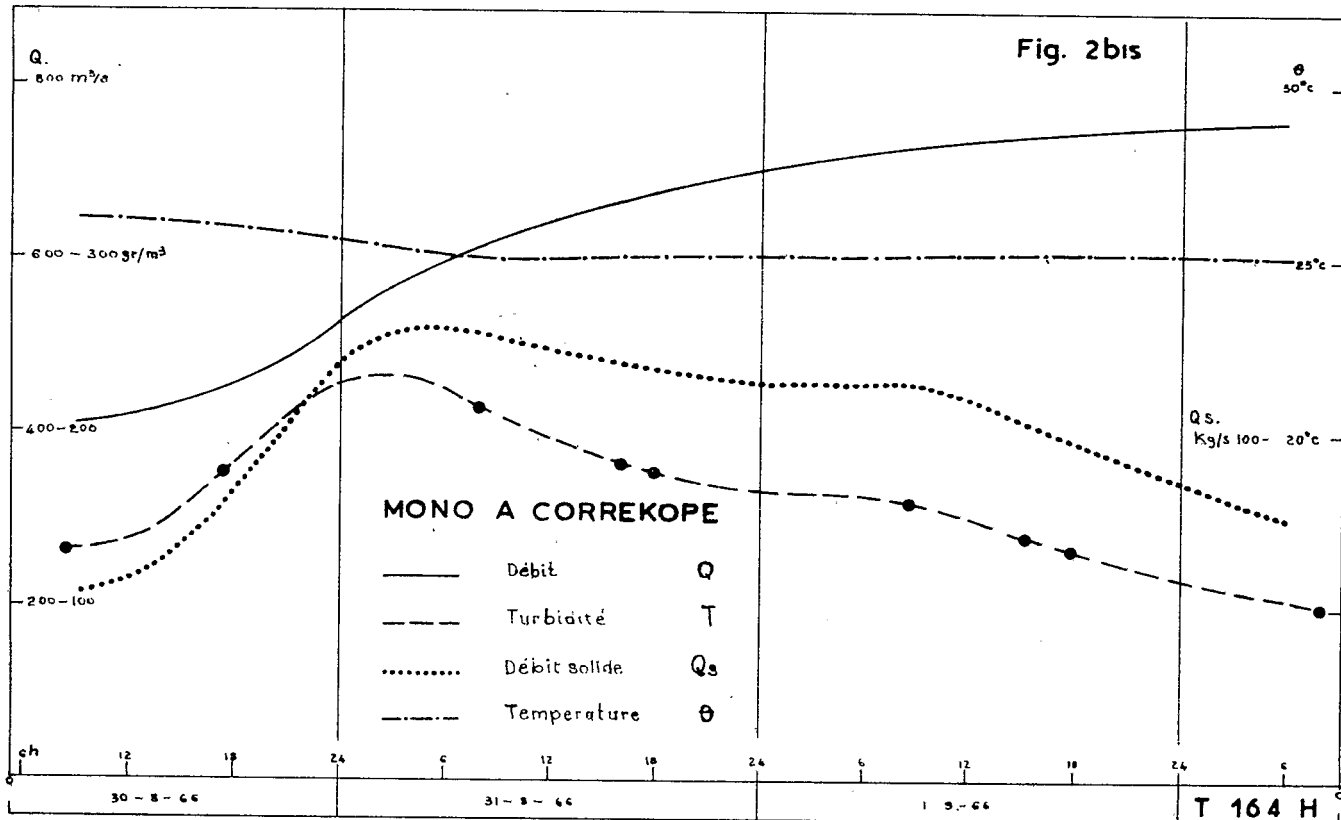
Toutes les causes d'erreur envisagées ci-dessus nous conduisent à une erreur relative possible de 12% à 15%. En fait, l'erreur due à la dissolution du résidu par l'acide chlorhydrique est toujours par défaut, tandis que celle due à l'emploi de la moyenne arithmétique est par excès. Ceci réduirait l'erreur à 8 à 11%. En fait, pour tenir compte des nombreuses incertitudes qui subsistent et aussi de l'erreur sur la mesure du débit liquide, nous croyons prudent d'évaluer la précision globale des mesures de débit solide à 15%.

VI. CORRÉLATION ENTRE DÉBIT LIQUIDE ET DÉBIT SOLIDE

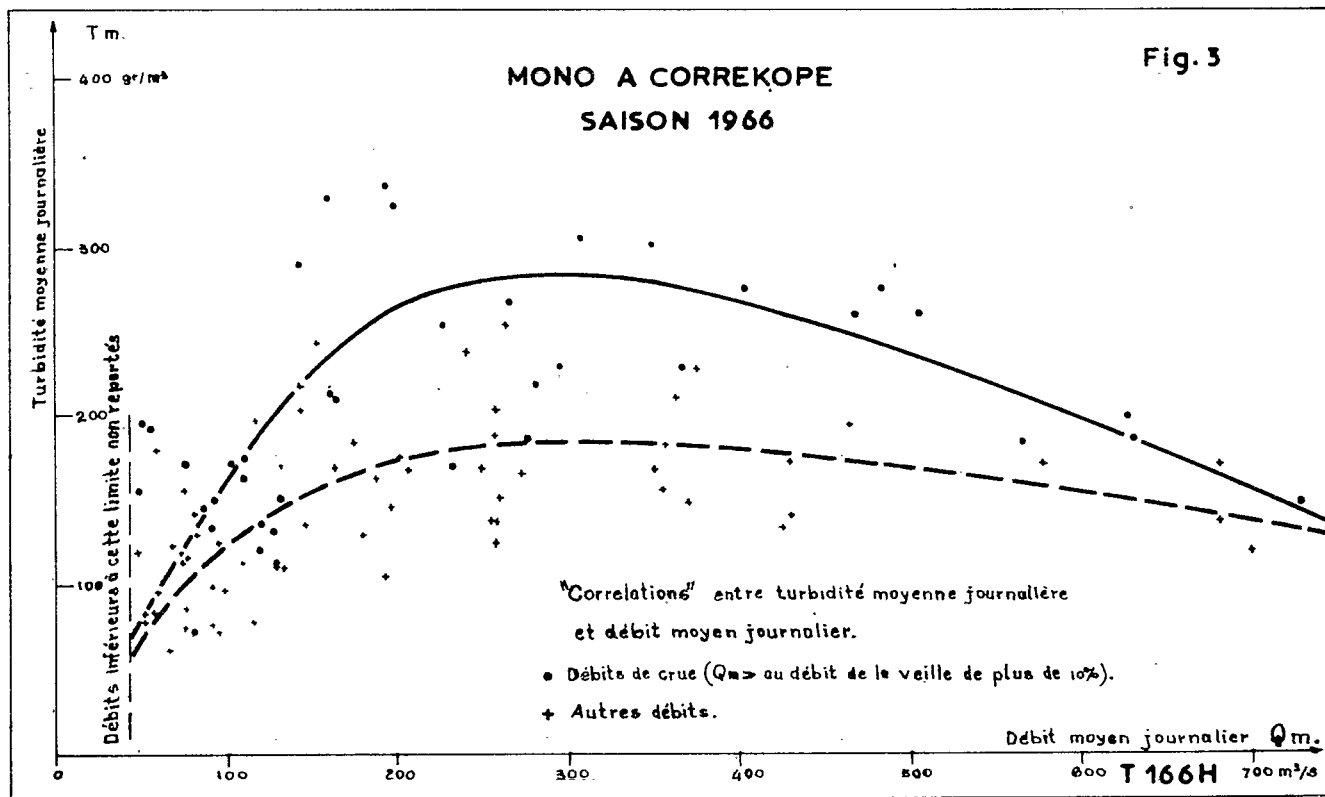
Il est aisé de constater (cf. fig. 2 et 2 bis) que la turbidité instantanée n'est pas une fonction univoque du débit instantané. Pour un bassin de cette taille (un peu moins de 10.000 km²), trop de facteurs interviennent dans le phénomène de transport pour qu'il puisse en être autrement (intensité de la pluie, répartition spatiale de la pluie, état des sols soumis à l'érosion, etc.). D'après divers auteurs, il a déjà été constaté que le tonnage annuel de transport en suspension est en nette corrélation avec le volume annuel d'eau écoulée. Cependant pour mettre cette corrélation en évidence, nous pensons qu'il faut bien un minimum de dix ans de mesures.

Pour notre part, nous avons cherché à mettre en évidence une corrélation éventuelle entre la turbidité moyenne journalière et le débit moyen journalier. En utilisant un graphique portant en abscisses le débit moyen journalier et en ordonnées la turbidité moyenne journalière, on obtient un nuage de points très dispersés (cf. fig. 3). Il semble d'après ce graphique que la turbidité passe par un maximum pour des débits variant de 250 à 300 m³/s, puis qu'elle décroît ensuite lorsque le débit augmente. On pourrait penser que ce maximum pourrait être dû au fait que les débits moyens journaliers avoisinant 250 à 300 m³/s sont plus nombreux au début de la saison des pluies qu'à la





525



fin mais il n'en est rien, les débits de cette zone correspondant en majorité à des débits du mois de septembre après le maximum et point du tout à des débits d'octobre ni de juillet. La turbidité n'est pas une fonction croissante du débit du fleuve, mais dépend surtout de la réserve d'argiles, limons, et fines particules mobilisables sur le bassin versant. La capacité maximale de transport en suspension du fleuve est loin d'être atteinte.

Nous avons alors fait la distinction entre les jours où le fleuve est en période de crue sensible et les jours où il est en décrue ou faible crue. Arbitrairement, nous avons choisi comme définition d'un jour de crue, le jour où le débit moyen journalier est supérieur de plus de 10% à celui de la veille. Si l'on distingue sur le graphique les points correspondants (point simple pour les jours de crue, croix pour les autres jours), on constate que les turbidités des jours de crue sont en moyenne nettement plus élevées que celles des autres jours. On obtient ainsi deux nuages de points moins dispersés et l'on peut se hasarder à déterminer deux courbes moyennes donnant respectivement la turbidité en fonction du débit pour les jours de crue et pour les autres jours. Ces courbes sont mal définies pour les débits inférieurs à 6 m³/s, mais nous avons pu constater qu'une fraction égale à plus de 98% du tonnage transporté annuellement est le fait des débits supérieurs à 50 m³/s. Pour l'année 1966, nous avons calculé les débits solides de la façon suivante : le débit moyen journalier a été supposé égal au débit relevé à 8 heures, la turbidité correspondante a été déterminée à l'aide des courbes de corrélation. Le tonnage trouvé ainsi est peu différent du tonnage mesuré directement. Entre le 1^{er} juin 1966 et le 30 novembre 1966 :

— tonnage calculé : 367 859 tonnes

— tonnage mesuré : 371 205 tonnes

soit une différence de 0,9%.

(Le tonnage correspondant aux mois de décembre 1966 à février 1967 est inférieur à 100 tonnes et nous n'en n'avons pas tenu compte).

Les résultats mois par mois sont les suivants :

	Jun	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
tonnage mesuré	1 404	26 161	168 070	143 800	29 469	2 301
tonnage calculé	1 179	23 886	151 050	156 478	33 060	2 206
différence en %	-16%	-8,7%	-10,1%	+8,8%	+12,2%	-4,1%

On constate que les tonnages calculés pour juin, juillet, août, novembre sont trop faibles et ceux de septembre et octobre trop forts.

Si l'on fait abstraction du résultat de novembre (portant sur un faible tonnage), on peut expliquer cela par une érosion effectivement plus intense en début de saison des pluies. La couverture végétale se renforçant ensuite atténuerait l'érosion. Avec un an de résultats, il n'est pas question d'entreprendre des calculs plus compliqués en distinguant début et fin de saison des pluies. Si les résultats de 1967 nous donnent des courbes de corrélation peu différentes de celles de 1966 avec des résultats aussi corrects, nous pourrions espérer avoir ainsi une méthode permettant d'évaluer rétrospectivement les tonnages annuels transportés depuis le début des observations limnimétriques en 1954.

VII. CONCLUSION

· Il résulte des observations que nous avons faites en 1967 que beaucoup reste à faire pour améliorer les mesures de débit solide. Les améliorations devront porter sur l'appareillage bien sûr mais plus encore peut-être sur les méthodes. A cet égard, il serait certainement utile que des essais analogues soient entrepris dans des conditions naturelles très différentes des nôtres.