

J. COLOMBANI *

Contribution à la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension

Conjointement avec les mesures de qualité des eaux entreprises au Togo et au Dahomey, nous avons effectué des mesures de débit solide en suspension. En 1965, notre but était d'essayer de mettre au point une méthode de prélèvement qui puisse être mise en pratique en 1966. La présente note expose les résultats auxquels nous sommes parvenus.

Le principe de la méthode n'est pas nouveau. Bien des mesures de débit solide ont déjà été faites de cette façon, en particulier par les hydrologues de l'O.R.S.T.O.M. Mais nous avons cru bon de nous attarder sur le détail des mesures et des dépouillements.

* Maître de Recherches
avec la collaboration de MM. TOURNE, GOUZY et DOSSOU-YOVO.

I. — MATÉRIEL ET TECHNIQUES UTILISÉS

Comme nous l'avons indiqué, nos mesures de débit solide se faisaient en même temps que celles de qualité des eaux. Le matériel utilisé sur le terrain est le même : essentiellement, en dehors du matériel hydrologique classique, la pompe Japy et des jerricans de 10 litres en plastique.

Une objection est souvent faite à l'utilisation de la pompe Japy : le champ des vitesses au voisinage de l'ajutage serait modifié de telle sorte que la distribution granulométrique des sédiments prélevés ne serait pas identique à celle des sédiments transportés, la turbidité étant elle-même modifiée. En réalité, dans les rivières qui nous intéressent, les sédiments transportés en suspension sont très fins, sauf peut-être à proximité immédiate du fond. Ces éléments sont peu sensibles à des variations de vitesse. On s'efforce, en dirigeant l'ajutage de prise face au courant et par une cadence rapide et continue du pompage, de limiter au maximum le ralentissement.

La vitesse de l'eau dans l'ajutage, dans les conditions où nous opérons, est de l'ordre de 30 à 80 cm/s. Dans les zones à forte vitesse (1,5 à 2 m/s assez fréquemment) on a un ralentissement sensible mais pratiquement sans effet sur les éléments fins. Au voisinage immédiat du fond (nos points de prise les plus bas sont à 30 cm du fond), le ralentissement est bien moins sensible et se transforme dans certains cas en accélération, sans que les écarts de vitesse soient considérables. Dans ce cas, l'effet perturbateur est réduit au minimum, même pour des éléments plus grossiers (sables fins).

Notons encore que la part de la tranche d'eau voisine du fond et des berges dans le transport solide total est faible, eu égard aux faibles vitesses qu'on y rencontre et à la faible portion de section intéressée, cela malgré une turbidité élevée.

La méthode de la pompe Japy a déjà été utilisée, en particulier au Tchad par M. BOUCHARDEAU, et a donné des résultats satisfaisants.

Un avantage certain de la pompe Japy est de pouvoir prélever un volume d'eau important sans opérations multiples. Nos prélèvements sont de 10 litres par point, exceptionnellement 5 litres quand la nécessité de transporter des échantillons sur un long parcours fluvial impose une charge limite en rapport avec la capacité des canots pneumatiques. Les teneurs observées étant en moyenne de l'ordre de 50 à 150 g/m³, les poids des résidus correspondant à 10 litres sont de l'ordre de 0,5 à 1,5 g. Des prélèvements de 1 litre dans les mêmes conditions ne nous donneraient que 0,05 à 0,15 g. Les balances de précision permettent de mesurer avec précision des poids inférieurs à 0,05 g, mais par contre les erreurs et pertes en cours de manipulation risquent d'être d'autant plus importantes en valeur relative que le poids du résidu est faible.

Les mesures granulométriques et les déterminations chimiques effectuées sur les sédiments nécessitent des poids relativement importants qu'on atteint à grand-peine, même avec des prélèvements de 10 litres. L'opération de prise de 10 litres dure approximativement 1 minute, ce qui permet une intégration dans le temps et supprime à peu près complètement l'influence des fluctuations de turbidité dues à la turbulence.

Les prélèvements de 10 litres sont décantés sur place dans des seaux en plastique avec adjonction de 5 cm³ d'acide chlorhydrique pour 10 litres. Le résidu, après siphonnage, est mis en bouteille et ramené à Lomé où il est séché et pesé. Le personnel a été entraîné à opérer avec le plus grand soin pour éviter toute perte de matière.

II. RÉSULTATS OBTENUS

Nous ne donnerons pas ci-dessous les résultats bruts complets des mesures effectuées en 1965. Cela serait sans intérêt, ces mesures étant trop dispersées dans le temps. Nous nous bornerons à exposer les points qui nous ont paru intéressants.

2.1. — Répartition des points de prélèvements dans la section, calcul de la turbidité, calcul du débit solide en suspension.

Les prélèvements ont été effectués en 12 points répartis dans la section sur 5 verticales, exactement les mêmes que pour les mesures de qualité des eaux. On obtient ainsi 12 valeurs de la turbidité. Le problème qui se pose est d'évaluer avec le plus de précision possible le débit solide, à partir de ces 12 valeurs.

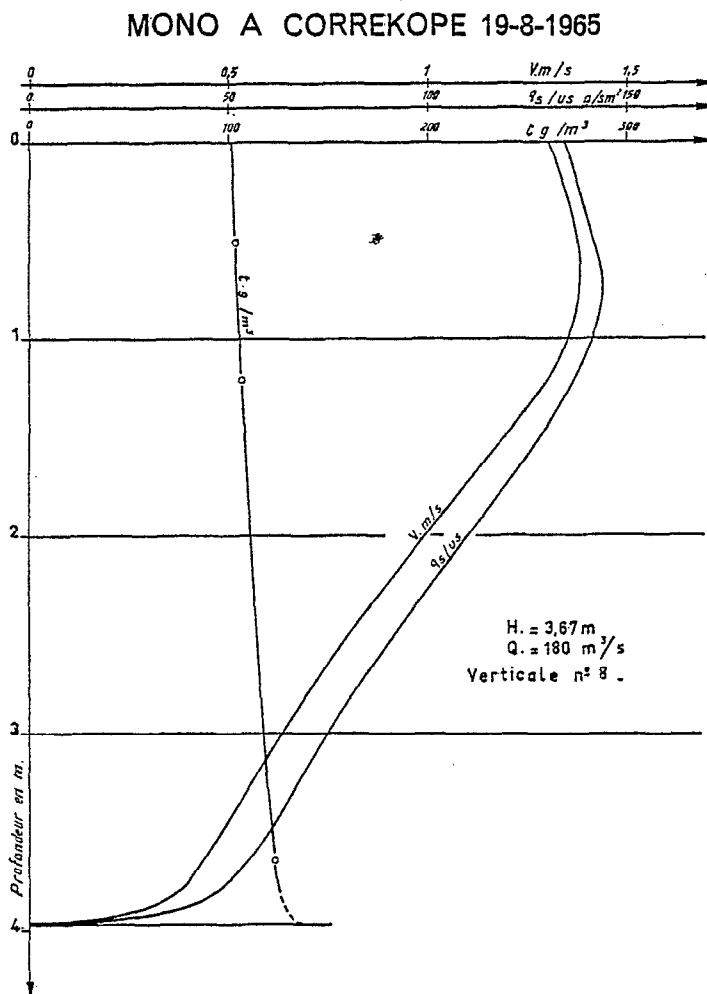


FIG. 1.

La méthode la plus simple consiste à effectuer la moyenne arithmétique des 12 valeurs de turbidité. La valeur obtenue, que nous noterons T_{ma} , multipliée par le débit liquide Q , donne une valeur approchée du débit solide Q_s soit $Q_{s1} = QT_{ma}$.

Si les points de prélèvements sont répartis uniformément dans la section, cette méthode sommaire conduit à surestimer le débit solide en donnant la même importance aux turbidités fortes du fond, dans la zone de superficie réduite des faibles vitesses, qu'aux turbidités plus faibles du reste de la section, où les vitesses sont notablement plus élevées.

Il faut donc, pour obtenir une meilleure approximation, pondérer les turbidités par les vitesses aux points de prélèvement. Le produit de la turbidité par la vitesse de l'eau en un point représente le débit solide par unité de surface de la section, que nous noterons q_s/u_s . On obtient donc 12 valeurs du débit solide par unité de surface. L'interpolation graphique de ces valeurs fournirait un réseau de courbes d'égal débit solide par unité de surface. Le planimétrage des surfaces limitées par ces courbes fournirait directement le débit solide total.

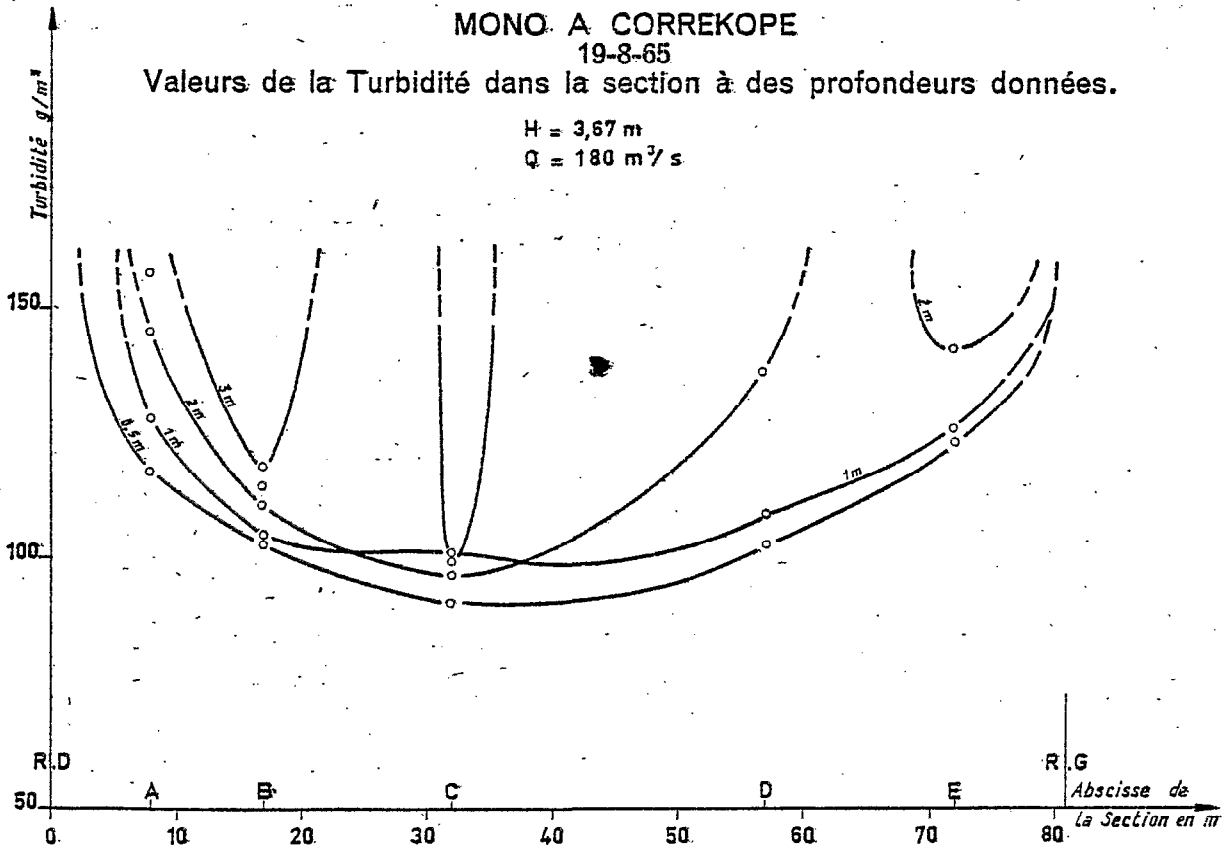


FIG. 2.

En pratique, l'interpolation entre les 12 valeurs du débit solide par unité de surface pour obtenir un tel réseau n'est guère réalisable directement.

Notons alors que, si la turbidité n'est mesurée qu'en 12 points répartis sur 5 verticales, la vitesse du courant est mesurée, elle, généralement en 40 à 50 points au moins, répartis sur une douzaine de verticales, ce dont il faut tirer parti.

Il est possible de faire porter l'interpolation d'abord sur les 12 valeurs de la turbidité. On trace, pour chaque verticale de prélèvement, la courbe représentant la variation de la turbidité en fonction de la profondeur. L'allure de ces courbes est assez régulière dans les cas nous avons rencontrés (fig. 1). Cela constitue une première interpolation graphique en fonction de la profondeur. Puis on établit un réseau de courbes tracées de la façon suivante : on porte en abscisse les abscisses des verticales dans la section. En ordonnée, on porte les valeurs de la

turbidité. Sur chaque verticale de prélèvement, on détermine la turbidité à une profondeur donnée, 0,5 m par exemple. On reporte les valeurs obtenues sur le graphique et on trace une courbe qui représente la variation de la turbidité à la profondeur 0,5 m en fonction de la position de la verticale. On procède de même à diverses profondeurs et on obtient un réseau de courbes de répartition des turbidités (fig. 2). Ainsi est réalisée, en deux étapes, une interpolation graphique dans la section. Cette interpolation est assez grossière mais elle présente l'intérêt de pouvoir tenir compte ensuite de toutes les mesures de vitesses, le facteur vitesse étant très important pour le calcul du débit solide.

L'étape suivante consiste à tracer sur le graphique les verticales où il n'y avait pas eu de prélèvements et à en déduire la courbe de variation de la turbidité pour chaque verticale.

Pour arriver enfin au débit solide, il faut multiplier les turbidités par les vitesses en chaque point. A chaque verticale, on obtient une courbe représentant la variation du débit solide par unité de surface en fonction de la profondeur (fig. 1). Il s'agit en quelque sorte des « paraboles » du débit solide par unité de surface, par analogie avec les méthodes de dépouillement des jaugeages du débit liquide. La suite des opérations est d'ailleurs la même que pour le dépouillement des jaugeages de débit liquide. Deux méthodes sont en effet alors possibles :

2.1.1. — On planimètre la surface limitée par chaque « parabole », obtenant ainsi le débit solide par unité de largeur dans la section, soit q_s/ul à chaque verticale. Il est facile de tracer une courbe donnant la variation du débit solide q_s/ul le long de la section (fig. 3). Le planimétrage de la surface limitée par cette courbe donne le débit solide total soit Q_s . En effet, on a $Q_s = \int_s q_s/us ds$, ce qui peut aussi s'écrire : $Q_s = \int_0^l \int_0^P q_s/us dx dp$ (x abscisse dans la section, p profondeur, l largeur totale, P profondeur totale à une verticale).

Le planimétrage des surfaces limitées par les paraboles correspond à l'opération $\int_0^P q_s/us dx dp = q_s/ul dx$.

Le planimétrage de la 2^e courbe correspond à l'opération $Q_s = \int_0^l q_s/ul dx$.

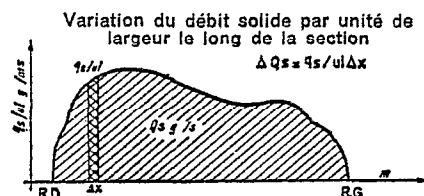


FIG. 3.

COURBES D'ÉGAL DÉBIT SOLIDE PAR UNITÉ DE SURFACE — CALCUL DU DÉBIT SOLIDE TOTAL.

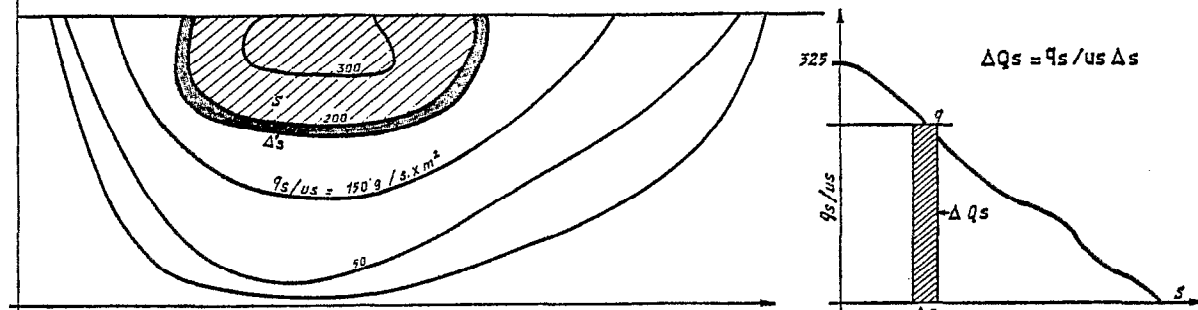


FIG. 4.

2.1.2. — On peut aussi, de même que pour le débit liquide, tracer dans la section un réseau de courbes d'égal débit solide par unité de surface (équivalentes aux courbes isotaches). On planimètre les surfaces cumulées limitées par les courbes par valeurs croissantes de débit solide. Sur un nouveau graphique, on porte en abscisse les superficies et en ordonnée, les valeurs correspondantes des débits solides par unités de surface. Le planimétrage de la surface limitée par la courbe obtenue donne le débit total Q_s (fig. 4).

Le calcul du débit solide total étant fait, on peut calculer la turbidité moyenne pondérée par la vitesse soit T_{mp} par la formule $T_{mp} = \frac{Q_s}{Q}$.

Toutes ces opérations sont assez longues et encore faut-il savoir si leur utilisation est justifiée par une différence de résultat importante.

Nous avons pratiqué cette méthode sur plusieurs mesures de débit solide, en utilisant simultanément la moyenne arithmétique. Les résultats sont rassemblés dans le tableau comparatif ci-dessous :

Stations.	Date	T_{me} g/m ³	Q_{s1} g/s	Q_s g/s	T_{mp} g/m ³	$100 \frac{\Delta Q}{Q} \%$
Mono à Corrékopé	19- 8-65	117	21 000	20 700	115	+ 1,4
So à Quinto Zoungomé	1-10-65	18,4	4 160	4 000	17,7	+ 4
	25-10-65	19,2	606	630	19,6	- 3,8
So à Togbota	1-10-65	21,2	2 760	3 100	23,8	- 11,0
	25-10-65	32,4	634	630	32,2	+ 0,7
Ouémé à Hétin Sota	2-10-65	51,5	18 800	18 900	51,8	- 0,5
	21-10-65	80,7	22 200	21 300	77,3	+ 4,2
Ouémé à Sagon	29- 9-65	55,4	31 400	30 400	53,5	+ 3,3
	12-10-65	49,4	19 000	19 800	51,4	- 4,0
	9-12-65	21,7	125	120	20,8	+ 4,2
Ouémé à Adjohon	30- 9-65	66,3	39 400	39 200	66,0	+ 0,5
	21-10-65	67,3	18 600	18 200	66,0	+ 2,2
Zou à Domé	11-10-65	84,8	8 700	8 770	85,5	- 0,8
	5-11-65	72,5	537	509	68,8	+ 5,5
	9-12-65	23,3	37,5	38,6	24	- 2,8

Dans 9 cas sur 15, l'utilisation de la moyenne arithmétique conduit à des valeurs de débit solide surestimées. L'examen des 6 autres cas nous a permis de constater qu'il n'avait pas été fait de prélèvements près du fond dans ces cas, par suite d'impossibilités techniques, et que par conséquent la moyenne arithmétique trouvée était trop faible.

Dans la mesure où les points de prélèvements sont bien répartis dans la section, on peut utiliser simplement la moyenne arithmétique des turbidités pour calculer le débit solide tout en sachant que le débit solide ainsi calculé est surestimé de 2 à 3 % en moyenne. Dans le cas de fortes turbidités, l'écart peut être plus considérable, peut-être 10 %. Cela présente l'avantage pratique de pouvoir, dans le cas où la station est bien étalonnée, se dispenser d'effectuer un jaugeage ou des mesures de vitesses si l'on est seulement intéressé par le débit solide.

Dans le cas où un jaugeage est nécessaire à la connaissance du débit liquide, on pourra effectuer les prélèvements de débit solide après le jaugeage sans inconvénients majeurs, sous réserve que la cote à l'échelle ne varie pas trop vite.

Nous nous proposons d'effectuer, en 1966, une ou deux mesures de débit solide en effectuant 30 ou 40 prélèvements au lieu de 12 pour voir la précision que l'on pourrait gagner sur le débit solide.

Il faut également savoir si à partir de prélèvements effectués en surface on peut extrapoler sans trop d'erreur pour trouver le débit solide total. Sur un certain nombre de mesures de débit solide en 1965, nous avons comparé les turbidités T_{ma} et T_{mp} à la moyenne T_{m3} des turbidités des trois prélèvements faits près de la surface (0,50 m de profondeur) sur les trois verticales du centre. Les résultats sont rassemblés dans le tableau comparatif ci-dessous :

Stations	Date	T_{m3}	T_{ma}	T_{mp}	$100 \frac{T_{mp} - T_{m3}}{T_{mp}} \%$
So à Quinto Zoungomé	25-10-65	19,4	19,2	19,6	+ 1,02
So à Togbota	25-10-65	30,1	32,4	32,2	+ 6,5
Ouémé à Hétin Sota	21-10-65	85,7 (1)	80,7	77,3	- 10,9
Ouémé à Sagon	29- 9-65	55,6 (1)	55,4	53,5	- 3,9
	12-10-65	47,2	49,4	51,4	+ 8,2
	9-12-65	23,3	21,7	20,8	- 12,0
Ouémé à Adjohon	30- 9-65	63,5	66,3	66,0	+ 3,8
	21-10-65	64,3	67,3	66,0	+ 2,6
Zou à Domé	11-10-65	72,4	84,8	85,5	+ 9,5
Anié à Anié	14- 9-65	293	364	non calculé	+ 19,5 (2)
Oti à Mango	14-10-65	66,8	69,0	—	+ 3,2 (2)
Mono à Corrékopé	16- 9-65	145	162	—	+ 10,5 (2)

Il sera nécessaire de poursuivre en 1966 ces comparaisons de façon systématique afin de trouver une corrélation si possible. En effet, la mesure quotidienne du débit solide en suspension ne peut être menée à bien que par des prélèvements en surface (pour des raisons matérielles), des mesures régulières avec 12 prélèvements étant faites tous les 10 jours environ. Une corrélation assez serrée pourra peut-être être établie pour chaque station étudiée.

2.2. — Étude granulométrique des sédiments transportés en suspension.

Les turbidités mesurées jusqu'à ce jour étant généralement faibles, il est difficile de procéder à des mesures granulométriques sur les résidus des prélèvements.

On peut, pour disposer d'un volume de sédiments plus important, mélanger l'ensemble des 12 prélèvements et effectuer les mesures granulométriques sur le mélange. Quand la turbidité est suffisante, on peut étudier la répartition granulométrique des sédiments en fonction de la profondeur. Nous donnons ci-dessous (fig. 5) un exemple des résultats obtenus au cours de la mesure effectuée sur l'Anié à Anié le 14-9-65 à la cote $H = 3,91$ m pour un débit

(1) Moyenne de 2 prélèvements seulement.

(2) $100 \frac{T_{ma} - T_{m3}}{T_{ma}}$.

de $142 \text{ m}^3/\text{s}$. Les prélèvements sur la verticale ont été effectués à 0,5 m, 2 m et 3 m de profondeur. La profondeur totale était de 3,43 m, mais des difficultés techniques n'ont pas permis de prélèvements plus profonds.

Nous avons pu déterminer la granulométrie des sédiments pour chacun des trois prélèvements de 10 litres, le poids des résidus variant de 3. à 6 g. Ces valeurs sont les plus fortes que nous ayons relevées en 1965.

RÉPARTITION GRANULOMÉTRIQUE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ANIE à ANIE PONT C.F.T. Verticale à 6 m de la rive gauche 14-9-1965

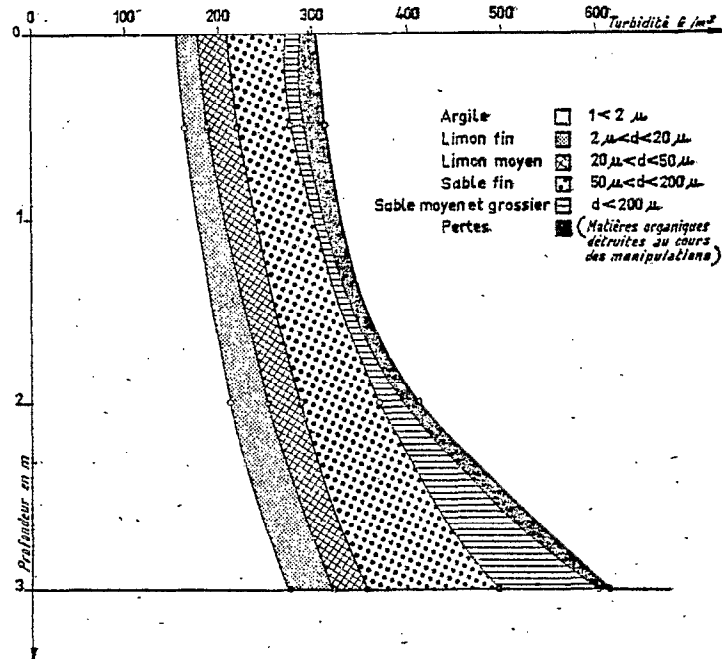


FIG. 5.

La classification granulométrique adoptée est la suivante :

- argile $d < 2 \mu$;
- limon fin $2 \mu < d < 20 \mu$;
- limon moyen et gros $20 \mu < d < 50 \mu$.

Ces trois fractions sont déterminées par une méthode fondée sur la loi de STOKES (chute des particules dans un liquide de viscosité connue).

- sable fin $50 \mu < d < 200 \mu$;
- sable moyen et grossier $d > 200 \mu$.

Ces deux fractions sont déterminées au tamis.

Notons, bien que cela n'ait pas été mesuré, qu'aucune particule ne devait dépasser 250 à 300 μ . L'examen des résultats obtenus révèle que les particules d'un diamètre inférieur à 50 μ , soit le limon et l'argile, représentent de 50 à 70 % des sédiments transportés. Les particules supérieures à 200 μ ne représentent qu'une faible fraction du transport total.

Nous avons fait figurer sur le graphique une frange teintée en noir qui représente les pertes inévitables au cours des manipulations. Les éléments perdus dont la granulométrie n'est pas connue représentent une faible fraction du total des résidus, l'erreur résultante est faible. Quand les résidus utilisés sont de l'ordre du gramme pour 10 litres, il n'en est malheureusement plus de même et, à fortiori, si l'on utilisait des prélèvements de 1 litre.

Si nous désirons à l'avenir étudier la répartition granulométrique des sédiments transportés en fonction de la profondeur, il nous faudra généralement effectuer des prélèvements spéciaux de plus grands volumes d'eau : 30 à 40 litres. Une étude de la granulométrie moyenne pourra être faite en mélangeant les résidus des prélèvements de 10 litres habituels.

2.3. — Analyse chimique des sédiments transportés en suspension.

Jusqu'à ce jour, les analyses n'ont porté que sur le carbone et l'azote. Le carbone est dosé par la méthode d'Anne, l'azote est dosé par la méthode de Kjeldhal. La teneur en matières organiques est estimée en multipliant la teneur en carbone par le coefficient 1,724 (procédé utilisé par les pédologues).

Des analyses complètes des sédiments sont envisagées pour 1966.

2.4. — Périodicité des prélèvements.

En 1965, il n'y a pas eu de prélèvements journaliers. L'intervalle séparant deux prélèvements journaliers était en moyenne de 15 à 20 jours. C'est évidemment tout à fait insuffisant pour estimer le débit solide en suspension. Nous pensons qu'il est nécessaire d'effectuer un prélèvement journalier de routine, trois prélèvements pour chaque crue notable (un au cours de la montée de la crue, un au maximum, et un à la décrue). Ces prélèvements sont faits en surface et le débit solide total évalué par corrélation. Tous les 10 jours environ, une mesure régulière avec 12 prélèvements répartis dans la section est faite. Telles sont les dispositions que nous mettrons en œuvre en 1966 pour au moins une station.

III. — CONCLUSION

Si nous avons cru bon d'exposer ici les méthodes de mesure du débit solide en suspension utilisées par nous, c'est que nous avons lu d'assez nombreux rapports et articles sur les résultats obtenus en différents pays et que ces rapports, très intéressants au demeurant, ne donnent guère de détails sur les procédés de mesure utilisés.

Dans ces conditions, la comparaison des résultats obtenus est difficile, certains étant obtenus sans doute par des procédés très élaborés, d'autres résultant de mesures plus grossières.

Nos méthodes ne sont pas particulièrement fines mais elles doivent probablement nous permettre d'obtenir des valeurs quantitatives de débit solide à 5 % ou à 10 % près. De plus, elles ont l'avantage d'être relativement peu coûteuses, de ne nécessiter qu'un matériel assez léger. Leur mise en œuvre en est facilitée dans des pays où les accès aux stations de mesures sont difficiles et les moyens disponibles réduits.