

Bernard BILLON *

Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad)

A la suite des travaux de Colombani et de son équipe (Togo et Dahomey), des études méthodologiques concernant la mesure des transports solides ont été commencées par la section hydrologique du Centre O.R.S.T.O.M. de Fort-Lamy. L'objet de la présente note est principalement d'indiquer l'esprit dans lequel ces études sont entreprises et de donner un aperçu des résultats obtenus, certes fragmentaire mais qui peut être utile à des spécialistes préoccupés par des problèmes analogues.

* Maître de Recherches de l'O.R.S.T.O.M.

I. - MÉTHODE

Sur le terrain, l'eau est prélevée dans des bouteilles en verre dont la contenance est voisine de 10 litres. Le type de bouteille choisi est la dame-jeanne généralement utilisée dans le commerce.

Pour le transport, ces bouteilles sont protégées par un tressage d'osier inamovible (type Nabao), ou bien sont placées dans un panier que l'on peut facilement retirer après avoir enlevé la protection plastique qui recouvre le goulot. C'est ce dernier genre de dame-jeanne qu'il faut recommander car le panier, très utile pour les manipulations sur le terrain, est retiré en arrivant au laboratoire ce qui permet un chauffage plus commode au bain-marie et la possibilité de contrôler à tout instant le siphonnage qui, lorsque l'opération touche à sa fin, doit être surveillé de très près. Il est également facile, avec ces bouteilles, de contrôler que le rinçage a été fait correctement.

Les bouteilles sont numérotées arbitrairement à la peinture. Chaque bouteille est marquée à la base du goulot d'un trait repère et le volume jusqu'au trait repère est mesuré une fois pour toutes avec précision et noté sur fiche. Les capacités varient de 9,8 litres à 10,3 litres. Sur le terrain, le remplissage se fait au trait repère et, grâce à l'étroitesse du goulot, on obtient une erreur sur le volume inférieure à 20 ml, soit une erreur relative maximale de l'ordre de 2 pour mille, erreur très inférieure aux 2 à 5 % dont parle M. Gouzy (Analyse des sols, eaux et végétaux au Centre de Lomé).

Le matériel de jaugeage utilisé est un montage Sonas-Aras de chez OTT avec contact de fond électrique. Le tube de prise d'eau est soudé sur une plaquette métallique, elle-même boulonnée sur la tige métallique de suspension du saumon, ce qui lui assure d'être toujours parallèle au courant. Le tuyau de caoutchouc fixé à l'autre extrémité du tube a un diamètre intérieur de 10 mm. Il est relativement épais et renforcé par une armature textile noyée dans la masse.

L'autre extrémité du tuyau de caoutchouc est reliée à une pompe Japy fixée à côté du treuil Nawa, sur le porte-à-faux métallique.

Il est possible avec un Zodiac Mark II de placer 12 bouteilles de 10 litres dans l'embarcation, c'est-à-dire de faire 3 verticales avant de retourner sur la berge reprendre un autre chargement de bouteilles vides.

Au bureau, qui nous sert de laboratoire, on ajoute dans chaque bouteille 5 ml d'acide chlorhydrique et on les chauffe au bain-marie jusqu'à 50° C. Cette opération de chauffage, non indiquée dans la méthode d'analyse de M. Gouzy, m'a été fortement conseillée par les Pédologues et Chimistes de Fort-Lamy qui soutiennent que l'efficacité de l'acide chlorhydrique s'en trouve activée et renforcée. Après repos de 24 heures, on siphonne des bouteilles chauffées une eau parfaitement limpide, alors que sans chauffage l'eau est un peu plus trouble, ce qui est en faveur de la méthode utilisée ici. Cependant, pour savoir si le gain de précision est intéressant, il conviendra de se livrer à des essais comparatifs plus précis.

Après 24 heures de repos, on procède au siphonnage. Cette opération est très délicate car il est facile, par une manœuvre maladroite, de remettre les éléments en suspension.

Il faut éviter tout déplacement de la bouteille. Pour notre part, nous nous contentons de l'incliner légèrement et doucement à partir de sa position de repos, pour glisser en dessous une baguette de bois qui la maintiendra légèrement inclinée. Le tube de siphonnage, recourbé en bout sur 4 cm, est introduit au point le plus bas. L'introduction du tube, même faite avec précaution, remet toujours quelques particules en suspension. Il faut donc attendre quelques instants avant de commencer le siphonnage. Par transparence, il est facile de contrôler qu'il ne reste plus rien en suspension.

La fin du siphonnage est également délicate car les dépôts sont, dans la toute dernière phase, entraînés sur le fond incliné de la bouteille vers le tube de siphonnage. Il faut donc veiller à ce qu'ils ne soient pas aspirés.

Il est indispensable avant le siphonnage d'avoir des bouteilles très propres extérieurement de façon à pouvoir bien suivre les différentes phases de l'opération.

Le volume restant est de l'ordre de 300 ml. Il paraît difficile de descendre à 100 ml (Gouzy) sans une seconde opération, transvasement dans un récipient étroit et nouvelle décantation de 24 heures. Ce qui prendrait beaucoup de temps.

L'évaporation suivie de la dessiccation se fait dans un bécher. Mais on constate qu'en faisant

la pesée, le poids augmente en fonction du temps, phénomène dû à l'absorption d'humidité par le résidu sec. Comme il n'est pas possible de trouver des bouchons pour béchers, nous avons d'abord employé des boîtes en aluminium, à couvercle assurant une étanchéité suffisante, mais nous n'avons pas pensé immédiatement que l'acide chlorhydrique, même à si faible dose, attaquait les boîtes : les résidus secs s'en trouvaient majorés. Nous sommes donc revenus aux béchers de 600 ml dont on assure une étanchéité à peu près satisfaisante, au prix d'un bricolage qui convient pour quelques mesures mais ne peut se généraliser.

La pesée du résidu sec desséché pendant 15 à 20 heures sur plaque chauffante ou à l'étuve se fait actuellement sur un trébuchet dont la sensibilité de 5 mg est trop juste pour les eaux faiblement chargées. Au début des mesures, les poids à mesurer étaient supérieurs à 1 000 mg et la précision du trébuchet était largement suffisante, mais actuellement nous descendons parfois en dessous de 300 mg. Il faudra donc envisager l'achat de balances dont la précision devra être au moins du milligramme.

Malheureusement, ces balances ne sont pas transportables sur le terrain aussi devons-nous sans doute modifier les dispositions que nous comptons prendre pour réaliser la totalité des opérations sur place.

Dépouillement. Il se réalise de façon classique. En chaque point on effectue le produit (concentration) \times (vitesse) qui permet de tracer les « paraboles » dont le planimétrage donne, en équation aux dimensions :

$$\frac{M L^{-3}}{\text{concentration}} \cdot \frac{L T^{-1}}{\text{Vitesse}} \cdot L = M L^{-1} T^{-1} \text{ profondeur}$$

L'intégration de ces « produits unitaires » le long de la section aboutit à $ML^{-1} \cdot T^{-1} \cdot L = MT^{-1}$ que l'on exprime en kg de matière en suspension transporté par seconde.

II. - CAUSES D'ERREURS

1. Mode de prélèvement.

Cette cause d'erreur figure au programme des essais systématiques que nous allons entreprendre (chapitre programme de mesures). Un timide essai a été réalisé en prélevant en surface au même point une première fois 10 l à la pompe Japy et ensuite 10 l en immergeant la bouteille verticalement. Pour ces deux modes de prélèvement bien différents, nous avons trouvé 1,60 g et 1,66 g, donc des résultats assez voisins.

2. Dispersion sur un même point.

Nous n'avons pour l'instant aucune idée sur la variation dans le temps de la concentration en un même point.

3. Volume prélevé.

L'erreur faite est négligeable puisque nous avons vu qu'elle était de l'ordre de 1 à 2 pour mille.

4. Répartition et densité des points de mesure.

Il y a, au sujet du dépouillement, un point qui nous paraît fondamental : la précision de la mesure du débit solide ne peut être supérieure à la précision du débit liquide déterminé avec les seuls points de mesure effectués. Une des premières opérations à faire est de calculer ce débit liquide à l'aide des seuls points de mesure qui ont été réalisés en nombre forcément limité. Si l'erreur par rapport à la courbe d'étalonnage atteint 5,10 ou 20 %, l'erreur sur le débit solide ne pourra pas être inférieure à l'erreur sur le débit liquide.

Ce calcul préliminaire permet d'avoir l'ordre de grandeur de l'erreur, a priori difficile à préciser, due à la répartition et à la densité des points de mesure. Il est donc possible de savoir si

le nombre de points de mesure choisi est suffisant ou non, compte tenu de la précision que l'on désire obtenir.

Pour le Chari à Fort-Lamy, nous avons retenu la disposition suivante : 8 verticales et 4 points de mesure par verticale. Pour apprécier l'erreur due au nombre de points de mesure, le débit liquide a été déterminé à partir de ces 32 points et comparé à chaque fois à la courbe d'étalonnage.

Date	31-7-67	26-8-67	26-9-67	12-10-67	20-10-67
H TP	303	446	678	716	762
Q 1	789	1 489	2 911	3 172	3 501
Q 2	819	1 557	3 010	3 319	3 450
E %	+ 3,8	+ 4,6	+ 3,4	+ 4,7	- 1,4

Q 1. Débit d'après courbe d'étalonnage.

Q 2. Débit calculé par 32 points.

E. Erreur par rapport à la courbe d'étalonnage.

L'erreur est inférieure à 5 % dans les cinq cas. Cependant, pour les 4 premiers jaugeages elle aurait pu être réduite sans une négligence que nous n'avons rectifiée qu'à la fin et qui constitue la cause d'erreur n° 5. Compte tenu du dernier résultat nous pensons qu'à l'avenir, pour Fort-Lamy, l'erreur sera inférieure à 3 %.

5. Pousée de l'eau sur les éléments immergés.

Avec un montage Sonas-Aras (OTT) et 10 m de profondeur, le maître couple est de l'ordre de 400 cm² pour le câble et 200 cm² pour le saumon soit 600 cm². Sur la plupart des stations du Tchad, il n'est pas nécessaire dans un jaugeage normal de mesurer avec ce saumon (25 kg) l'angle du câble avec la verticale.

L'adjonction du tuyau de pompage de l'eau fait passer le maître couple à 2 000 cm² et la mesure de l'angle que fait le câble avec la verticale devient indispensable, étant donné que nous ne disposons pas de saumon de plus de 25 kg.

6. Mesures près du fond.

Au cours des mesures que nous avons effectuées, nous nous sommes arrêtés généralement à une distance du fond voisine de 1 m. Pour préciser ce qui se passait vers le fond, nous avons effectué neuf prélèvements sur une même verticale :

Profondeur	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	7,90	8,30	8,70	9,10
Concentration (g/m ³)	44	50	43	43	54	62	64	80	104

auxquels nous avons adjoint les résultats obtenus la veille sur une verticale située au même emplacement que la précédente :

Profondeur	0,50	3,00	6,00	8,50
Concentration (g/m ³)	39	45	68	68

La variation de la concentration est représentée sur le graphique de la figure 1 en coordonnées semi-logarithmiques.

En dehors d'un point nettement aberrant, les points s'alignent suivant deux segments de droite qui font penser à deux types de transport différents : transport en suspension pour la tranche supérieure; quant à la partie inférieure il est difficile de préciser à quoi elle correspond, l'épaisseur de la tranche atteint en effet, dans ce cas-là, 2,50 m : peut-on encore parler de transport de fond?

Quoi qu'il en soit, de nouveaux profils détaillés seront nécessaires pour préciser leurs variations éventuelles tout le long de la section. S'il se confirmait que cette disposition est la plus courante, les mesures de débit solide s'en trouveraient bien compliquées car, pour chaque verticale, il faudra pouvoir définir chaque segment de droite, c'est-à-dire presque doubler le nombre de prélèvements par verticale qui augmenteront de 4 à 6, ou même 8. Comme, par ailleurs, il semble difficile de réduire le nombre de verticales, nous nous acheminerons vers certaines difficultés. A moins qu'il puisse être montré, ce qui semble peu probable, que le segment de droite inférieur correspond au transport de fond. Il est cependant intéressant de noter qu'en passant de 32 à 40 points de mesures (8 verticales de 5 points) le temps de dépouillement n'est pas augmenté.

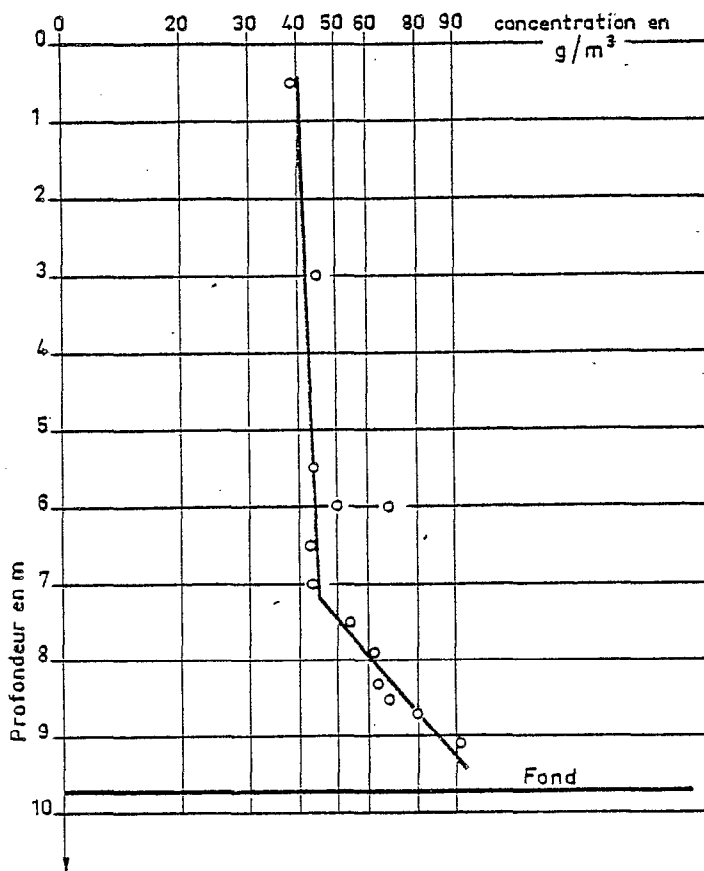


FIG. 1. — CHARI à FORT-LAMY. Variation de la concentration le long d'une verticale.

7. Chauffage au bain-marie.

Les bouteilles de 10 litres, dégagées de leur panier protecteur, sont chauffées dans une petite lessiveuse à 50° C après adjonction des 5 ml de HCl. Ne pas oublier de poser la bouteille sur une plaque de bois au fond de la lessiveuse sinon la bouteille se casse au cours du chauffage : en effet, les points de contact de la bouteille avec le fond métallique de la lessiveuse sont portés assez rapidement à haute température alors que le reste de la bouteille s'échauffe plus lentement.

Le chauffage conduit à une meilleure précipitation des éléments fins. Bien que l'opération soit un peu longue, elle est théoriquement à conseiller. Après essais systématiques, on peut affirmer que cette sujétion fournit seule un résultat correct (meilleure précision).

8. Pesée.

Étant donné la précision générale des mesures de débit solide, il n'est pas indispensable de rechercher à tout prix une précision exceptionnelle sur la pesée. Pour des concentrations comprises entre 50 et 500 g/m³, une balance précise au mg est largement suffisante. Cependant, en l'absence de toute mesure, il est difficile a priori d'évaluer des concentrations minimales auxquelles on descendra en étiage. Il est donc prudent, en l'absence de laboratoire effectuant les premières mesures, de prévoir peut-être une précision supérieure.

9. Sels en solution.

En plus des matières en suspension, argiles, limons, existent en solution dans l'eau des sels qui, après évaporation, s'ajoutent au résidu sec des matières en suspension. Le poids de ces sels peut être estimé et représente parfois une proportion non négligeable du poids de matière en suspension. Il importe donc, dans toute mesure de débit solide, de préciser si les sels sont ou non inclus dans la mesure effectuée.

Pour le Chari à Fort-Lamy, le poids des sels en solution est de l'ordre de 50 mg/litre. L'acide chlorhydrique les transforme en chlorures dont le poids total devrait être supérieur au poids des sels. Mais parmi ceux-ci, les carbonates, qui s'y trouvent en proportion relativement importante, se décomposent en gaz carbonique. Finalement, l'adjonction d'acide chlorhydrique ramène le poids de chlorures aux valeurs extrêmes de 22 et 49 mg/litre, soit une valeur de 35 mg/litre avec un écart théorique possible de $\pm 50\%$.

Le volume évaporé est limité à 0,3 litre environ. Le poids de sels qui doit se retrancher de chacun des points de mesure est donc de 12 mg \pm 5 mg.

Le poids de matières en suspension a varié de plus de 5 000 mg à moins de 300 mg au cours de nos mesures. En début de saison des pluies, les concentrations de matières en suspension sont très fortes et la proportion de sels négligeable. Mais avant même que la décrue ne soit amorcée, le poids de matière en suspension pour 10 litres est tombé en certains points en dessous de 300 mg. Qu'obtiendrons-nous en fin d'étiage? Il n'est pas impossible qu'avec la décroissance observée on descende à 100 mg ou en dessous et, dans ce cas, les sels représenteront 10 à 20 % du poids mesuré et il deviendra nécessaire de les dissocier donc de mesurer, en même temps que les débits solides, les conductivités. Nous avons déjà fait à plusieurs reprises des mesures simultanées de conductivité aux mêmes points que les prélèvements, ce qui nous a permis d'établir la répartition des concentrations en sels dans la section de mesure. Il suffira, avec les faibles variations de conductivité rencontrées dans la section, de 5 ou 6 prélèvements à des emplacements choisis pour avoir une bonne idée de la conductivité moyenne et connaître le poids de sels contenu dans nos béchers à moins de 10 % près, ce qui abaissera l'erreur due à la présence des sels à moins de 1 %.

10. Pesée d'un corps à température non ambiante.

Un corps posé chaud sur le plateau d'une balance crée, au-dessus de lui, une dépression qui le fait paraître moins lourd. La variation apparente de poids d'un bécher Pyrex de 600 cm³ posé à une température de 120° C sur le plateau de la balance est la suivante :

Temps (mn)	0	3	5	12	30	600
Poids	167,88	167,91	167,92	167,94	167,95	167,96

Voir également le graphique de la figure 2.

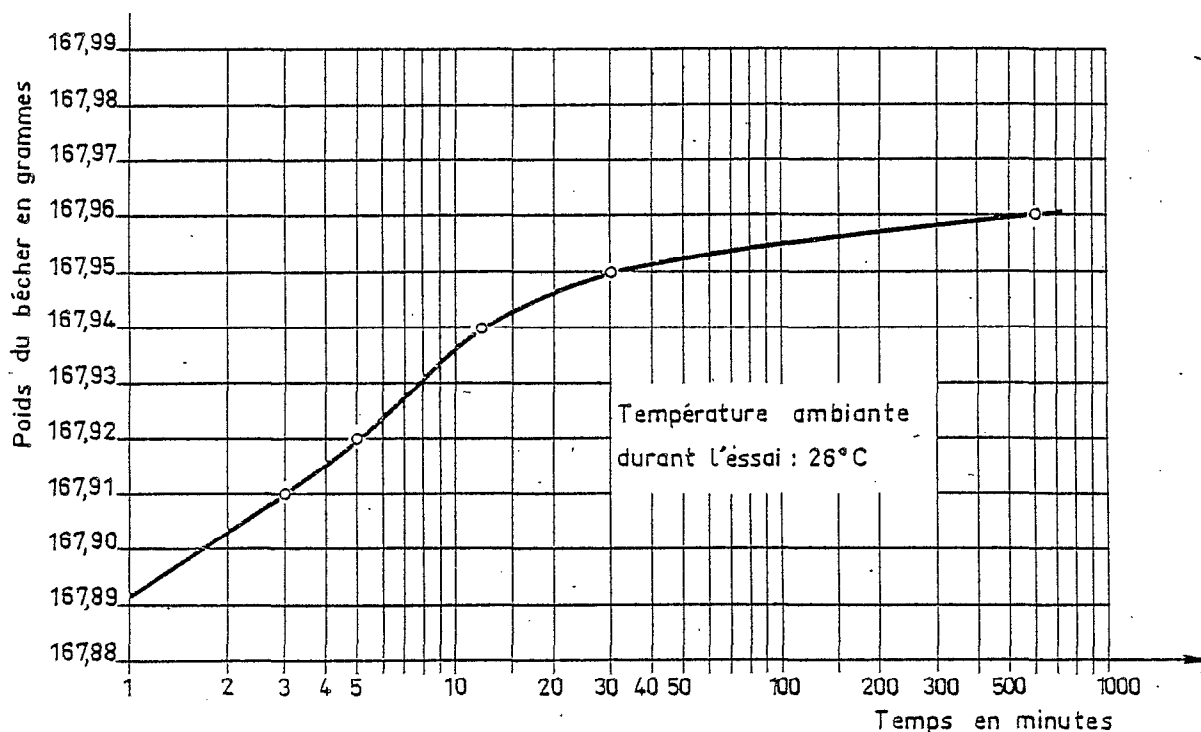


FIG. 2. — Augmentation apparente, en fonction du temps, du poids d'un bécber posé sur la balance à une température de 120° C.

11. Absorption d'humidité.

Après une vingtaine d'heures de dessiccation à 110° C, le bécber retiré de l'étuve est pesé. Il faut le laisser refroidir assez longtemps, 20 à 30 minutes, sinon la mesure est faussée. Mais le résidu sec absorbe de l'humidité. Deux essais nous ont donné — P étant le poids total bécber + résidu sec —, les résultats indiqués dans les tableaux ci-dessous et représentés, pour le premier essai, sur le graphique de la figure 3 sur lequel on a tracé la courbe de variation correspondante.

1^{er} ESSAI :

Temps (mn)	0	1	2	4	6	13	22	27	100	750
Poids (g)	168,79	168,81	168,82	168,83	168,84	168,87	168,89	168,90	168,95	168,98

Les conditions étaient les suivantes :

- Bécber et résidu sec à température ambiante au départ de l'expérience.
- Poids de matière sèche : 0,83 g — Bécber : 167,96 g.
- Température 26° — Humidité 80 % (Psychromètre à ventilation).

2^e ESSAI :

Temps (mn)	0	3	6	12	22
Poids total (g)	166,23	166,24	166,25	166,26	166,27

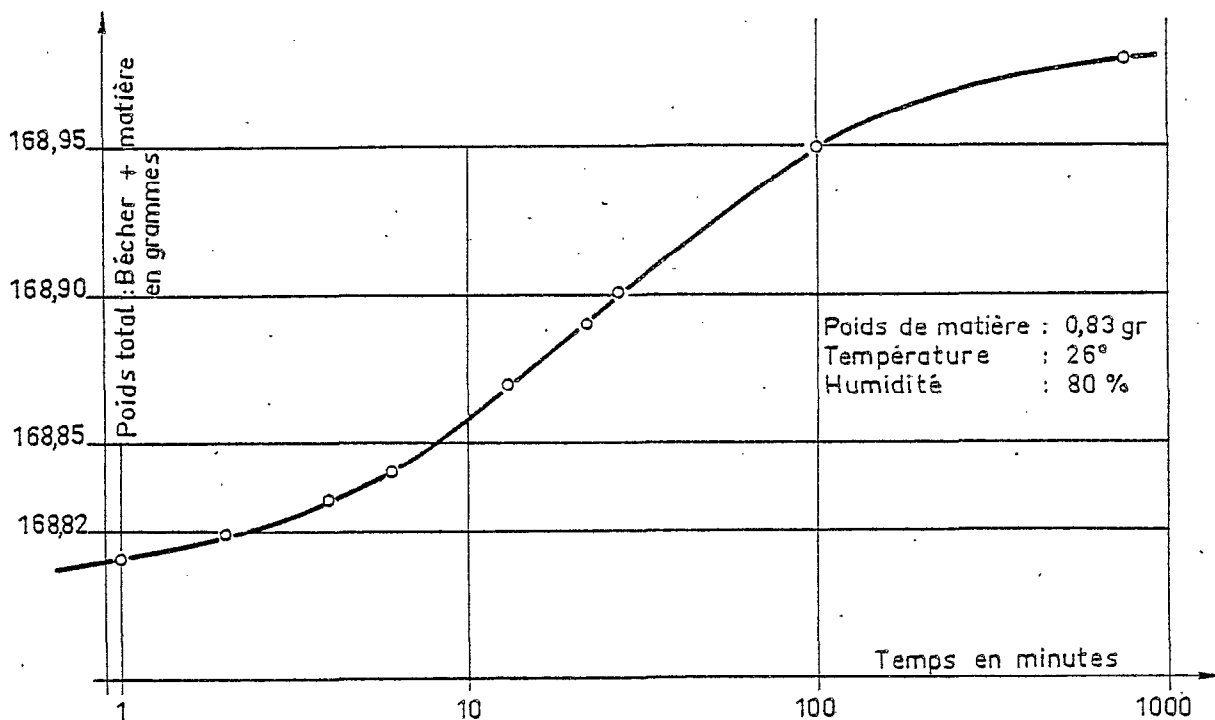


FIG. 3. — Absorption d'humidité en fonction du temps.

- Bêcher et résidu sec à t° ambiante.
- Poids de matière sèche 0,30 g — Bêcher : 165,93 g.
- Température 30° — Humidité 88 % (Psychromètre à ventilation).

Au bout de 22 minutes, l'augmentation de poids due à l'absorption d'humidité est de 12 % dans le premier cas et 13 % dans le second. Le poids d'eau absorbée est lié au poids de matière sèche, à la durée d'humidification et au taux d'humidité de l'air ambiant ce qui, évidemment, était prévisible. Mais ces essais montrent également qu'en saison des pluies où le taux d'humidité est fort, le bêcher doit être laissé à l'air libre le minimum de temps ou, mieux, être bouché hermétiquement à la sortie de l'étuve.

Il existe, pour résoudre ce problème, deux possibilités :

1. *Utiliser des récipients étanches.* Cette solution serait idéale mais ces récipients doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- Être en verre Pyrex car tout récipient métallique sera attaqué par l'acide chlorhydrique et le verre de Chimie ne résisterait pas au cours du chauffage sur plaque pour l'évaporation.
- Posséder un couvercle rodé.
- Avoir une capacité suffisante, sinon il faut multiplier les remplissages et rinçages.
- Avoir un poids maximal avec couvercle de 200 g, poids qui représente la portée maximale de la quasi-totalité des balances de précision.

Jusqu'à présent nous n'avons trouvé aucun récipient répondant à *toutes* ces caractéristiques. Ou bien la capacité est suffisante mais il n'existe pas de couvercle étanche, ou bien le couvercle existe mais la capacité est beaucoup trop faible, inférieure à 100 ml.

2. *Utilisation de dessiccateurs.* A la sortie de l'étuve, le bécher est placé immédiatement dans un dessiccateur où on le laisse, le temps de refroidir pour être ensuite pesé. Les inconvénients de la méthode sont qu'elle exige d'abord un matériel supplémentaire relativement encombrant et fragile, et que la pesée doit se faire très rapidement, ce qui est difficilement réalisable.

Si la première méthode ne peut être utilisée faute de trouver le matériel adéquat, nous emploierons la seconde en adjoignant au bécher un couvercle qui, sans être totalement étanche, limiterait au mieux l'absorption d'humidité au cours de la pesée.

III. - PROGRAMME DE MESURES

La réalisation de ces premières mesures de transport en suspension nous a amené à nous poser un certain nombre de petits problèmes. Certains ont pu être résolus. D'autres restent en suspens. C'est pour essayer de répondre à ces derniers que nous envisageons de nous pencher sur les points suivants :

1. Dispersion des mesures en un même point. Ces mesures seront effectuées et dépouillées de façon la plus identique possible. Un prélèvement effectué toutes les 5 minutes pendant 1 heure mettra éventuellement en évidence l'influence de pulsations analogues aux pulsations de longue période enregistrées sur les débits liquides.

2. Dispersion due au mode de prélèvement. Des séries de mesures en un même point seront effectuées avec des modes de prélèvement différents et des vitesses de prélèvement différentes notamment dans le cas de la pompe Japy. Dans un des cas au moins, la vitesse d'entrée d'eau dans l'ajutage sera aussi voisine que possible de la vitesse mesurée au moulinet.

3. Influence du chauffage à 50° au bain-marie sur la sédimentation. S'il était montré que cette opération n'apporte qu'un gain de précision négligeable, sa suppression entraînerait un gain de temps appréciable.

4. Étude des 2 à 4 premiers mètres en partant du fond. A quelle profondeur doit-on s'arrêter pour ne pas mêler le transport de fond au transport en suspension? quelle est la meilleure répartition des points de mesures sur une verticale?

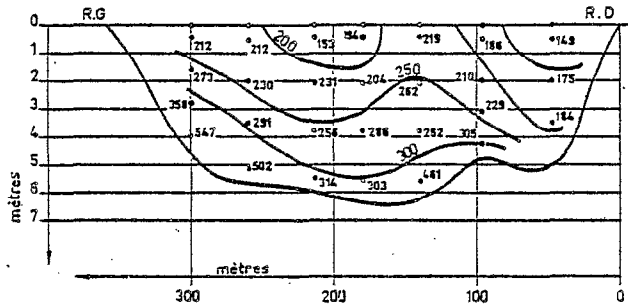
5. La dessiccation des résidus doit-elle se faire obligatoirement à l'étuve, qui nécessite des investissements supplémentaires, ou bien la dessiccation sur plaque chauffante est-elle suffisante?

IV. - RÉSULTATS DE 4 MESURES EFFECTUÉES SUR LE CHARI A FORT-LAMY

Six mesures de débit solide ont déjà été réalisées mais les deux premières, non citées dans le tableau ci-dessous, sont entachées d'erreurs et ne peuvent être retenues :

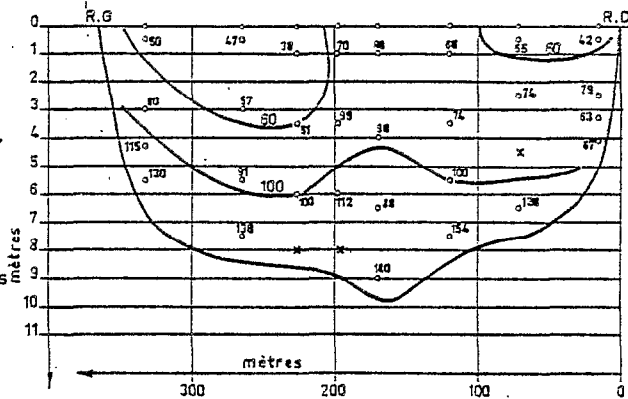
Date	26-8-67	26-9-67	12-10-67	20-10-67
H TP	446	678	716	762
Qs en kg/s	425	273	218	201
Concentration moyenne (g/m ³)	273	091	064	058

Crue du
26 AOÛT 1967
HTP = 446cm

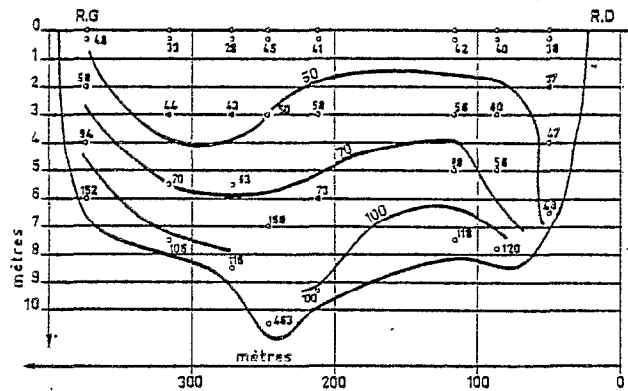


Crue du
26 SEPTEMBRE 1967
HTP = 678 cm

x : Bouteilles ou Béchiers cassés



Crue du
12 OCTOBRE 1967
HTP = 716 cm



Crue du
20 OCTOBRE 1967
HTP = 762 cm

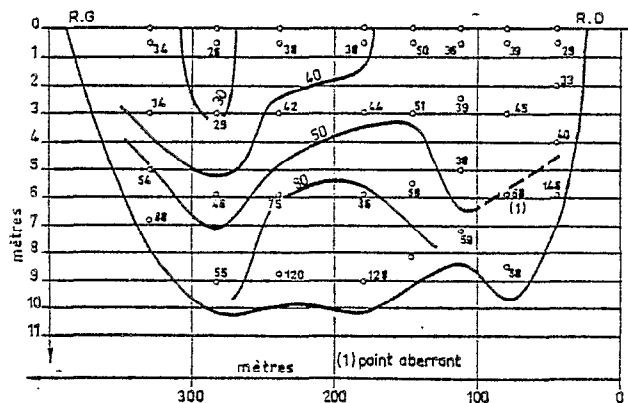


Fig. 4. — CHARI à FORT-LAMY. Courbes d'égal concentration (en grammes par litre).

Les graphiques de la figure 4 montrent la répartition des concentrations dans la section.

On note une croissance générale de la concentration dans le sens surface-fond. Traduite en coordonnées semi-logarithmiques on observe, ou quelquefois on devine, la présence des deux segments de droite bien caractérisés sur la figure 1. Dans d'autres cas, plus rares, il n'existe qu'un seul segment de droite. L'examen de ces profils montre que, souvent, quatre points de mesure par verticale ne sont pas suffisants.

On note également, dans certains cas, des variations transversales assez rapides de la concentration qui augmente de 30 à 50 % en quelques dizaines de mètres. D'où la conclusion que le nombre de verticales est également insuffisant.

Ces mesures assez fragmentaires ont permis néanmoins de se faire une idée assez bonne de la variation de la concentration moyenne des eaux du Chari durant la période couverte par les mesures. La décroissance de cette concentration moyenne est très rapide à partir de fin août. Elle se ralentit sensiblement en octobre mais n'est pas affectée par la brusque remontée des eaux à partir du 15 octobre (fig. 5).

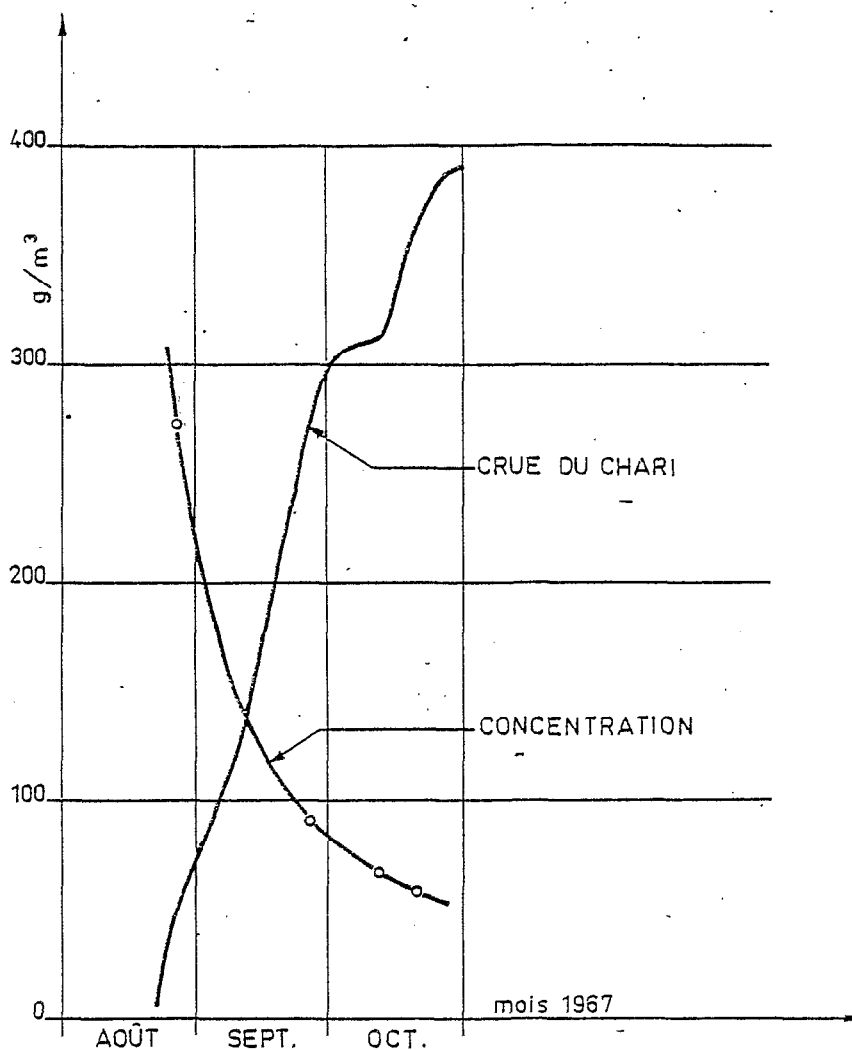


Fig. 5.