

Conservatoire National des Arts et Métiers
École Supérieure des Géomètres et Topographes

LA MESURE *IN SITU* DU DÉBIT SOLIDE
DES COURS D'EAU

par
Jean-Paul GRANIER

Mémoire présenté en vue
de l'obtention du titre
d'Ingénieur diplômé ESGT

ORSFOM
Service hydrologique

Juin 1963

LA MESURE IN SITU DU DEBIT SOLIDE
DES COURS D'EAU

par

Jean-Paul GRANIER

Remerciements à Monsieur CALLEDE et aux services de l'ORSTOM .

LA MESURE IN SITU DU DEBIT SOLIDE

DES COURS D'EAU

I N T R O D U C T I O N

I - G E N E R A L I T E S

I-I : Production, transport et dépôt des sédiments

I-I-I : L'abrasion des sols - Les facteurs d'abrasion

I-I-I-I : La pluie

I-I-I-2 : Le ruissellement

I-I-2 : Le transport des sédiments

I-I-2-I : Capacité de transport d'un cours d'eau

I-I-2-2 : Le débit solide : les deux formes fondamentales qu'il affecte

I-I-2-3 : Caractéristiques dimensionnelles des éléments transportés

I-I-2-4 : Origine des matériaux transportés

I-I-2-5 : Importance relative des deux modes de transport

I-I-2-6 : Transport solide et débit liquide

I-I-2-7 : Mesure des deux modes de transport

I-I-3 : Les effets du transport solide

I-2 : Evaluation des quantités de terres érodées

I-2-I : Principe des observations : définitions

I-2-2 : But des mesures

I-2-3 : Les différents paramètres et leur influence sur la vulnérabilité
des sols

I-2-4 : Conséquences pour les observations

I-2-5 : Les réseaux d'observation du débit solide en suspension

I-2-5-I : Les petits bassins versants représentatifs

I-2-5-2 : Les grands bassins versants

I-2-6 : Conclusion

I-3 : Préviation des apports en sédiments

- I-3-I : Exemples d'ouvrages pouvant nécessiter la mise en oeuvre d'une étude de transports solides .
 - I-3-I-1 : Les barrages de retenues
 - I-3-I-2 : Les bassins de décantation
 - I-3-I-3 : Autres ouvrages
- I-3-2 : Détermination des apports
- I-3-3 : Conclusion

II - MESURE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

2-I : Théorie - Mécanisme - Principe des mesures

- 2-I-I : Equilibre des particules en suspension
 - 2-I-I-1 : Vitesse de chute : Loi de Stokes
 - 2-I-I-2 : Equation d'équilibre : Loi Schmidt - Rouse
- 2-I-2 : Répartition des vitesses et des concentrations dans une section
 - 2-I-2-1 : Répartition des vitesses du courant
 - 2-I-2-2 : Répartition des concentrations
 - 2-I-2-2-1 : Variations avec la profondeur
 - 2-I-2-2-2 : Variations transversales
- 2-I-3 : Débit solide instantané
- 2-I-4 : Détermination du débit liquide et de la concentration moyenne
 - 2-I-4-1 : Détermination de Q_1
 - 2-I-4-2 : Détermination de C_m

2-2 : Le tarage des stations

- 2-2-1 : Choix de la section
- 2-2-2 : Les moulinets
- 2-2-3 : Utilisation des moulinets
 - 2-2-3-1 : Montage sur perche
 - 2-2-3-2 : Matériel suspendu
 - 2-2-3-3 : Treuils
 - 2-2-3-4 : Angle du câble avec la verticale
- 2-2-4 : Densité des mesures
- 2-2-5 : Calcul du débit
- 2-2-6 : Courbes de tarage

- 2-3 : La méthode par jaugeages complets de prélèvements et corrélation avec un échantillon témoin
 - 2-3-I : Prélèvement et analyse des échantillons
 - 2-3-I-I : Les appareils de prélèvement
 - 2-3-I-I-I : Les échantillonneurs
 - 2-3-I-I-2 : Prélèvements à la pompe
 - 2-3-I-2 : Analyse des échantillons
 - 2-3-I-2-I : Pesée
 - 2-3-I-2-I-I : Opérations préliminaires
 - 2-3-I-2-I-2 : Obtention d'un résidu sec
 - 2-3-I-2-I-3 : Pesée du résidu
 - 2-3-I-2-I-4 : Conclusions
 - 2-3-I-2-2 : Mesure du volume des matériaux décantés
 - 2-3-I-2-3 : Mesure de la densité
 - 2-3-I-2-4 : Mesures de turbidité - Mesures par radioactivité
 - 2-3-I-2-5 : Analyse granulométrique
 - 2-3-I-2-5-I : Méthodologie
 - 2-3-I-2-5-2 : Répartition granulométrique suivant la profondeur
 - 2-3-2 : Pratique du jaugeage
 - 2-3-2-I : Choix de la section
 - 2-3-2-2 : Densité et répartition des prélèvements
 - 2-3-2-2-I : Densité des prélèvements
 - 2-3-2-2-2 : Mesures près du fond et des berges
 - 2-3-2-3 : Procédés de jaugeage
 - 2-3-2-3-I : Jaugeage à partir d'une embarcation
 - 2-3-2-3-I-I : Embarcations
 - 2-3-2-3-I-2 : Jaugeage au câble
 - 2-3-2-3-I-3 : Jaugeage au cercle
 - 2-3-2-3-2 : Jaugeage aérien
 - 2-3-2-3-2-I : Jaugeage à partir d'un pont
 - 2-3-2-3-2-2 : Jaugeage à partir d'une passerelle
 - 2-3-2-3-2-3 : Transporteurs aériens
 - 2-3-2-3-3 : Jaugeage à gué
 - 2-3-3 : Calcul de la concentration moyenne réelle instantanée à partir des jaugeages
 - 2-3-3-I : Calcul à partir du jaugeage complet

- 2-3-3-I-I : Calcul des concentrations aux points de mesure des vitesses
- 2-3-3-I-2 : Calcul du débit solide
- 2-3-3-I-3 : Concentration moyenne
- 2-3-3-2 : Moyenne arithmétique des concentrations
- 2-3-3-3 : Jaugeage de surface ou jaugeage partiel
- 2-3-3-4 : Jaugeage par intégration
 - 2-3-3-4-I : Principe
 - 2-3-3-4-2 : Remarques
 - 2-3-3-4-3 : Critique de la méthode
- 2-3-4 : Corrélation avec un échantillon témoin
 - 2-3-4-I : Localisation et mode de prélèvement
 - 2-3-4-2 : Erreur due au mode de prélèvement
 - 2-3-4-3 : Corrélation entre c et Cm
- 2-3-5 : La Sanaga à Nachtigal : méthodologie des mesures et bilan des transports solides pour l'année 1969
 - 2-3-5-I : Caractéristiques du bassin versant
 - 2-3-5-2 : La rivière et la station
 - 2-3-5-3 : Méthodologie
 - 2-3-5-4 : Résultats
- 2-3-6 : Autres résultats
- 2-3-7 : Conclusion
- 2-4 : Les autres systèmes
 - 2-4-I : Les différentes méthodes
 - 2-4-2 : Prélèvement à la main en un point unique
 - 2-4-3 : Automate Fritsch
 - 2-4-4 : Mesure de la turbidité
 - 2-4-4-I : Principe
 - 2-4-4-2 : Relation entre turbidité et concentration
 - 2-4-4-3 : Utilisation
 - 2-4-5 : Les sondes nucléaires
- 2-5 : Conclusion

III - MESURE DU CHARRIAGE

3-1 : Théorie de l'entraînement des particules - Equation de Du Hoys

3-2 : Les formules semi-empiriques

3-2-1 : Les différentes formules : leurs conditions d'emploi

3-2-2 : Emploi de la formule de Meyer Peter : détermination des différents paramètres

3-2-2-1 : Calcul de τ

3-2-2-2 : Calcul de τ_c : choix d'un diamètre caractéristique

3-2-2-3 : Conclusion

3-3 : Modèles réduits à fond mobile

3-4 : Prélèvements à la nasse

3-4-1 : Les nasses

3-4-2 : Utilisation des nasses

3-4-3 : Coefficient d'efficacité

3-4-4 : Faiblesse de la méthode

3-4-5 : Variabilité spatio-temporelle du phénomène de charriage

3-4-6 : Conclusion

3-5 : Les traceurs

3-5-1 : Les traceurs colorés

3-5-1-1 : Principe et limites de la méthode

3-5-1-2 : Renseignements obtenus

3-5-1-2-1 : Evaluation quantitative du charriage

3-5-1-2-2 : Renseignements semi-quantitatifs

3-5-1-3 : Conclusion

3-5-2 : Les traceurs radioactifs

3-5-2-1 : Introduction

3-5-2-2 : Fabrication et emploi

3-5-2-2-1 : Les isotopes utilisés

3-5-2-2-2 : Marquage des sédiments

3-5-2-2-3 : Immersion

3-5-2-2-4 : Détection

3-5-2-2-5 : Utilisation sur les modèles réduits

- 3-5-2-3 : Les méthodes de mesure quantitative
 - 3-5-2-3-I : Les méthodes d'intégration dans le temps
 - 3-5-2-3-I-I : Méthode par dilution ponctuelle
 - 3-5-2-3-I-2 : Méthode par dilution continue
 - 3-5-2-3-I-3 : Influence de l'épaisseur de la couche charriée
 - 3-5-2-3-2 : La méthode d'intégration dans l'espace
 - 3-5-2-3-2-I : Cas des sables
 - 3-5-2-3-2-2 : Cas des galets
- 3-5-2-4 : Conclusion

3-6 : Conclusion

IV - MESURE DES VOLUMES DEPOSES

- 4-1 : Généralités
- 4-2 : Les plaines d'alluvionnement
- 4-3 : Les fosses à sédiments
- 4-4 : Mesure de l'envasement dans les retenues de barrage

CONCLUSION

I N T R O D U C T I O N

Le cours d'eau, en tant qu'agent de transport des matériaux, joue un rôle prépondérant dans le processus d'érosion-sédimentation .

Le transport solide est la conséquence partielle de la perte en terre des sols au niveau du bassin versant; il est la cause directe de la sédimentation dans les ouvrages hydrauliques .

L'évaluation des quantités de sédiments transportées par un cours d'eau présentera donc un grand intérêt à la fois pour la conservation des sols et pour la conception des ouvrages hydrauliques .

Or, le phénomène de transport solide dépend d'un si grand nombre de paramètres que sa complexité et sa variabilité sont énormes. Une évaluation par le calcul à partir de l'observation des différents paramètres qui le conditionnent s'avère le plus souvent insuffisante dans l'état actuel de nos connaissances .

Dans la grande majorité des cas, il ne peut être évalué que par la mesure in situ. Mais ici encore, on se heurte à de sérieux problèmes d'observation que nous mettrons en évidence tout au long de cet exposé .

Le transport solide, de par sa complexité et les difficultés que l'on rencontre quand il s'agit d'en interpréter les causes ou d'en prévoir les conséquences, ne saurait être introduit ici d'une manière brutale . C'est pourquoi, avant d'aborder les méthodes de mesure proprement dites, il convient de définir les conditions de production, de transport et de dépôt des sédiments; à la suite de quoi nous examinerons les raisons qui peuvent motiver la mise en oeuvre d'une étude de transports solides et la nature des renseignements que l'on doit recueillir suivant le but et les conditions de l'étude. C'est ce qui va faire l'objet de notre premier chapitre .

I-I : PRODUCTION , TRANSPORT ET DEPOT DES SEDIMENTS

I-I-I - L'abrasion des sols - Les facteurs d'abrasion

Le phénomène de départ est l'abrasion des sols, c'est à dire l'arrachement et l'entraînement des particules de la couche superficielle .

Outre les conditions spécifiques à certaines régions (érosion glaciaire, érosion éolienne,...), les deux principaux agents de l'abrasion sont la pluie et le ruissellement .

I-I-I-I : La pluie

L'impact des gouttes de pluie sur les sols provoque leur désagrégation mécanique et la mise en suspension des éléments fins .

L'action de la pluie est liée au degré de cohésion du sol, à son état d'humidité, à l'importance de la protection végétale et, bien sûr, à la nature de la pluie elle même : son intensité, sa durée, la grosseur des gouttes .

I-I-I-2 : Le ruissellement

Le ruissellement intervient ensuite en tant qu'agent d'érosion et de transport .

— L'érosion due au ruissellement est liée à la fois à l'importance et à la puissance de ce dernier. D'une manière plus générale, elle dépendra :

- . de l'intensité des précipitations
- . de la pente du terrain
- . de la résistance des sols
- . des possibilités d'infiltration, donc en particulier, de la perméabilité des sols du fait de leur constitution pédologique, de la capacité de rétention qui augmente avec la profondeur d'enracinement de la végétation, du degré de saturation des sols en eau qui dépend des pluies antérieures
- . de l'état et de la forme du terrain : tassement des sols, mode de travail des sols, existence de petits ravins qui favorisent la concentration du ruissellement .

- En tant qu'agent de transport, le ruissellement entraîne les particules jusqu'au réseau hydrographique, du moins, celles qu'il ne dépose pas contre les obstacles divers qui peuvent se présenter, y compris la végétation .

I-I-2- Le transport des sédiments

I-I-2-I : Capacité de transport d'un cours d'eau

Les sédiments qui atteignent le cours d'eau par l'intermédiaire du ruissellement vont être transportés par ce dernier s'il en est capable .

On appelle capacité de transport d'un cours d'eau sa possibilité optimum de transport de sédiments; cette possibilité est liée au débit liquide et à la vitesse du courant .

Si la capacité de transport est trop faible pour évacuer les produits de l'abrasion, une partie des matériaux va se déposer .

Si la capacité de transport est suffisante, tous les sédiments fournis par l'abrasion seront transportés; l'eau conservera un reliquat d'énergie qu'elle pourra employer au creusement du lit et à l'érosion des berges .

Signalons à ce sujet que dans certaines zones drainées par des cours d'eau à lits très érodables et où des travaux de conservation des sols ont été réalisés de façon particulièrement efficace, on a assisté à des reprises d'érosion du lit importantes; de même qu'à l'aval de certains barrages où, la sédimentation dans la retenue étant importante, le cours d'eau se débarrasse de la majorité de sa charge solide, et sa capacité de transport est restituée intacte .

La capacité de transport est variable dans le temps et dans l'espace .

- Dans le temps, puisqu'elle est liée au débit liquide. Si une crue survient, la capacité de transport du cours d'eau augmente, les alluvions déposées en période d'étiage vont être reprises par la crue .
- Dans l'espace, puisqu'elle est liée aux vitesses de courant. Si, le long du parcours d'un cours d'eau, les vitesses se trouvent réduites, par un changement de pente par exemple, la capacité de transport va diminuer et les matériaux vont se déposer .

I-I-2-2 : Le débit solide : les deux formes fondamentales qu'il affecte

On appelle débit solide dans une section donnée le poids de matériaux en phase solide qui traverse la section pendant un intervalle de temps déterminé. En général, et suivant son importance, on l'exprime en kg ou en tonnes par seconde.

Le débit solide d'un cours d'eau est constitué par deux modes de transport :

- Le transport en suspension : concerne les particules fines qui sont maintenues en suspension sous l'effet de la turbulence des eaux (argiles, limons, sables fins) .
- Le transport par charriage, ou transport de fond : il affecte uniquement les matériaux grossiers (sables moyens ou grossiers, graviers, gros blocs) .

Le charriage s'effectue :

- . Par saltation : sables moyens et grossiers, plus rarement graviers et galets. Les matériaux se déplacent par petits bonds successifs au-dessus du fond .
- . Par roulement sur le fond du lit : sables et cailloux .
- . Par glissements en vrac au fond : galets et gros blocs .

Nous indiquons ci-dessous la classification granulométrique des éléments la plus couramment utilisée :

Blocs et galets	64 à 6.000 mm
Graviers	2 à 64 mm
Sables	62 à 2.000 μ
Limons	4 à 62 μ
Argiles	0,24 à 4 μ

I-I-2-3 : Caractéristiques dimensionnelles des éléments transportés

La différenciation du mode de transport des particules en fonction de leur diamètre citée ci-dessus est simplement indicative. En effet, certains matériaux peuvent rester immobiles au fond, être charriés, ou être transportés en suspension suivant les conditions hydrauliques .

Le mode de transport d'une particule est lié au degré de turbulence de l'écoulement liquide, l'accroissement de la turbulence augmentant le calibre des matériaux susceptibles d'être transportés en suspension. Dans les régimes de turbulence moyenne, les éléments qui "hésitent" entre les deux modes de transport sont les sables .

I-I-2-4 : Origine des matériaux transportés

Le charriage s'alimente surtout par érosion du lit et des berges du cours d'eau. Il contribue pour une large part à la formation et à l'équilibre du lit, modelant ainsi le profil en long du cours d'eau .

Le transport en suspension concerne principalement les matériaux produits par l'abrasion des sols. Aussi sa détermination est très utile en agronomie, car ce sont les éléments les plus fertilisants qui sont ainsi transportés : particules fines, éléments chimiques et matières organiques. Etant donné que notre étude se limite à l'évaluation du débit solide, nous ne différencierons pas ces éléments, mais signalons pour mémoire que l'analyse minéralogique des éléments transportés peut être très utile pour localiser leur origine .

Citons enfin l'existence du phénomène de laves torrentielles. Ce sont des coulées boueuses de forte densité résultant de glissements ou d'effondrements des berges. Ce mode de transport, spécifique aux torrents de montagne, est particulièrement redoutable .

I-I-2-5 : Importance relative des deux modes de transport

Elle varie énormément d'un cours d'eau à l'autre. En général, le transport en suspension est de loin le plus important, environ 90% du transport total; pour certains cours d'eau, le charriage peut être pratiquement nul, mais, pour les torrents de montagne à forte pente, le débit de charriage peut égaler, ou même dépasser, le débit de matériaux en suspension .

La répartition des deux modes de transport dépend en grande partie de l'aptitude du bassin versant à fournir les matériaux en suspension, donc des possibilités d'abrasion, ainsi que des possibilités d'affouillement du lit et du degré d'érodabilité des berges .

I-I-2-6 : Transport solide et débit liquide

Le transport solide en suspension est un phénomène assez continu dans l'espace. Les sédiments sont transportés sur de longues distances et à la vitesse du courant. Mais il est très discontinu dans le temps puisqu'il est conditionné par le phénomène d'abrasion qui, comme nous l'avons vu, ne dépend pas exclusivement de la nappe d'eau ruisselée. Aussi, il est généralement impossible de relier le débit liquide et le débit solide pour un même cours d'eau .

Le transport par charriage est très discontinu à la fois dans le temps et dans l'espace. C'est un phénomène très localisé puisqu'il est conditionné, entre autres, par la pente et la constitution du lit, qui peuvent varier d'un tronçon de cours d'eau à l'autre. Par contre, pour une même section de cours d'eau, il peut être lié au débit liquide, donc, dans certaines conditions, il se prête mieux à l'étude théorique et à l'élaboration de formules .

Il convient cependant de distinguer les rivières à fonds caillouteux où le charriage est pratiquement nul pour les débits d'étiage, mais peut se mettre brusquement en action et atteindre des valeurs très importantes en période de crue, et les rivières à lits de sables pour lesquelles le charriage est un phénomène continu, dont la progression est souvent étroitement liée aux variations de débit liquide .

I-I-2-7 : Mesure des deux modes de transport

La suspension concerne toute la hauteur de la masse liquide en mouvement, le charriage et la saltation s'effectuent à proximité du fond. La limite entre la saltation et la suspension est assez floue. La saltation est un phénomène mal connu, on ne sait généralement pas quelle hauteur au-dessus du fond elle affecte .

En pratique, on différenciera ces deux modes de transport d'après la façon de les mesurer. On mesure souvent le transport en suspension jusqu'à quelques dizaines de centimètres du fond, distance minimale d'accès aux appareils de prélèvement. Le charriage est éventuellement mesuré dans la zone qui reste .

La suspension et le charriage posent tous deux de gros problèmes de mesure, mais pour des raisons différentes, le charriage étant de loin le plus difficile à évaluer. Le plus souvent, on se contente donc de mesurer le débit.

solide en suspension et d'évaluer le débit total en considérant qu'on a ainsi mesuré un certain pourcentage (environ 90%) de ce dernier .

I-I-3- Les effets du transport solide

Sans parler de l'affouillement du lit, résultat de la puissance érosive du courant qui est liée à la charge solide du cours d'eau, le transport et le dépôt des sédiments ont de nombreuses conséquences qu'il serait fastidieux d'énumérer, citons cependant :

- L'exhaussement du lit aval des cours d'eau, qui augmente les risques d'inondation.
- Les sédimentations localisées qui peuvent remettre en cause la navigabilité des fleuves. De sérieux problèmes ont été rencontrés sur le fleuve Niger.
- Les énormes dépôts de sable dans la plaine de Kairouan (Tunisie), apportés lors des crues catastrophiques de 1969 par les oueds Zeroud et Merguel-lil, qui ont rendu stériles plusieurs centaines de km².
- Les risques de contournement. Les débits d'étiage de la Medjerda (Tunisie), dans sa basse vallée, ne peuvent plus emprunter l'ancien lit à la suite des crues de mars 1973 .
- La sédimentation dans les ouvrages hydrauliques qui rend parfois leur coût d'exploitation élevé. Nous reviendrons sur ce problème .

I-2 : EVALUATION DES QUANTITES DE TERRES ERODEES

I-2-I- Principe des observations : définitions

Dans l'évaluation de l'érosion par la méthode hydrologique, on ne prend que rarement en compte le charriage, ceci pour deux raisons :

- La difficulté de mesure de celui-ci
- Les produits de l'abrasion contribuent pour une large part au transport en suspension, plus accessible aux mesures .

L'observation du débit solide de matériaux en suspension dans une section contrôlant une certaine surface de bassin versant permettra de suivre le phénomène d'érosion à toutes les échelles de temps: échelle de l'évènement pluvieux, échelle mensuelle, annuelle, ou variations interannuelles .

Sur la période considérée, on peut chiffrer la dégradation des terres par:

- L'érosion spécifique $E = \frac{P}{S}$ en tonnes par km² de bassin versant .

P étant le poids de matériaux ayant traversé la section pendant la période d'observation .

S étant la surface du bassin versant contrôlée par la section .

- L'épaisseur de la nappe de terre érodée exprimée en millimètres. Mais cette expression n'est pas très significative car elle nécessite le passage aux volumes de sédiments, ce qui suppose que la densité des sols en place est connue .

Le calcul du débit solide de matériaux en suspension se fait par la relation simple :

$$Q_s = C \cdot Q_l$$

Q_s = débit solide sur la période considérée

Q_l = débit liquide sur cette période

C = concentration, ou turbidité de l'eau en matériaux en suspension, exprimée généralement en grammes par litre ou par m³ suivant son importance .

On peut tracer les variations de ces différentes valeurs en fonction du temps (cf fig 2 ; 31 ; 32). La courbe obtenue s'appelle :

- L'hydrogramme pour les variations de débit liquide .

- Le turbidigramme pour les variations de concentration .
- La courbe des variations de débit solide n'a pas reçu d'appellation .

Une autre méthode d'évaluation des produits de l'abrasion est la mesure du volume des sédiments déposés dans les retenues de barrage. Ces mesures intègrent le charriage. Remarquons que dans ce cas, on se contente souvent d'exprimer la dégradation des terres en volume, ce qui ne présente pas grand intérêt puisque la densité des dépôts ne correspond pas à la densité des sols en place. L'inconvénient est que la mesure des dépôts ne permet d'obtenir qu'une moyenne annuelle, il est donc impossible de faire une étude suivie de l'érosion; de plus, la méthode ne s'applique évidemment qu'à un nombre limité de bassins .

I-2-2 : But des mesures

L'observation du transport solide au sein même de l'écoulement contribue à la connaissance des lois de l'érosion, dont l'intérêt au point de vue agronomique n'est plus à démontrer :

- Localiser les zones les plus sensibles afin de les aménager en priorité et de prévoir la nature des aménagements : protection contre l'entraînement des particules par le ruissellement au moyen de banquettes, haies, bandes laissées incultes, ...
- Evaluer les conséquences d'un certain mode d'occupation des sols sur l'érosion (mise en culture, déboisement, efficacité d'un reboisement, ...). Citons à ce propos le programme Ecérex (écoulement, érosion, expérimentation) mis en oeuvre par l'ORSTOM en Guyane Française et qui a pour but l'étude des possibilités de mise en valeur de l'écosystème forestier. Il utilise des bassins versants expérimentaux sur lesquels est mesurée l'érosion, d'abord sous forêt primaire, puis après déforestation et aménagements .

Il importe donc, pour que les mesures fournissent des informations suffisantes, c'est à dire pour qu'elles puissent éventuellement être extrapolées à des régions de caractéristiques analogues qui n'ont pas fait l'objet de mesures de transport solide, d'observer parallèlement les facteurs qui conditionnent l'érosion, afin d'interpréter au mieux leur influence .

L'interdépendance des facteurs, leur variabilité dans le temps, font que

l'interprétation des mesures d'érosion constitue sans aucun doute la branche la plus difficile de l'hydrologie de surface. Cela ne fait pas l'objet de notre exposé, aussi nous contenterons nous de n'aborder le sujet que très sommairement dans ce qui suit .

I-2-3 : Les différents paramètres et leur influence sur la vulnérabilité des sols

On peut distinguer :

- Les facteurs géologiques , pédologiques et morphologiques, stables et pratiquement immuables, donc, en principe, observables et mesurables une fois pour toutes .
- Les facteurs climatiques (température, humidité, vents, ensoleillement) et surtout la pluviométrie, sa répartition saisonnière, l'intensité des averses. Nous verrons ci-dessous, sur un exemple, l'importance que peut avoir la répartition des pluies sur l'érosion. La pluviométrie se mesure par l'installation de pluviomètres ou pluviographes répartis sur tout le bassin versant, ils nécessitent des relevés fréquents, si possible à chaque évènement pluvieux .
- Les facteurs sur lesquels l'homme peut intervenir ou est déjà intervenu, en particulier, la couverture végétale. La mise en culture a presque toujours pour effet d'augmenter la vulnérabilité des sols, la couverture primaire étant remplacée par des cultures à enracinement moins profond. Le facteur végétation est, dans certains cas, variable dans le temps, ce qui sera mis en évidence aussi dans l'exemple ci-dessous. Notons que la pente du terrain, facteur morphologique, peut être modifiée par des cultures en terrasse .

Les régions méditerranéennes d'Afrique du Nord et les régions tropicales sont caractérisées par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison pluvieuse. Pendant la saison sèche, la couverture végétale se dégrade progressivement jusqu'à atteindre le taux de flétrissement. Les averses les plus intenses se produisent au début de la saison des pluies, c'est à dire au moment même où les sols, dépourvus de protection végétale, sont les plus vulnérables. La violence des précipitations peut alors provoquer le ruissellement si leur intensité est supérieure à la vitesse d'infiltration, la surface du sol étant ainsi littéralement nettoyée. Avec l'avancement dans la saison des pluies, la végétation se développe, limitant l'érosion. La majeure partie de l'érosion a donc lieu

sur une période très restreinte et la variabilité interannuelle de l'érosion sera liée presque exclusivement à l'intensité et à la répartition des pluies en début de saison pluvieuse .

On conçoit dès lors que :

- Les régions les moins vulnérables sont celles où les précipitations sont abondantes et réparties uniformément dans l'année de façon à assurer la couverture végétale .

Régions tempérées humides d'Europe continentale et septentrionale.

Régions équatoriales humides .

- Les régions les plus vulnérables sont caractérisées par des saisons sèches qui compromettent la couverture végétale au début de la saison des pluies .

Régions méditerranéennes .

Régions tropicales et continentales à saison sèche .

Ajoutons à cela les régions de montagne à torrents glaciaires et les régions d'altitude élevée de l'Asie centrale très vulnérables lors du dégel printanier .

Les dégradations spécifiques atteignent des valeurs records de l'ordre de 7.000 tonnes par km² et par an en moyenne annuelle, pour certains oueds d'Afrique du Nord et sur les affluents du Fleuve Jaune qui drainent des sols de loess. On a enregistré des concentrations supérieures à 500 g/l dans ces derniers .

I-2-4 : Conséquences pour les observations

La vulnérabilité des sols conditionnera l'urgence de l'établissement des réseaux d'observation du transport solide .

Dans les régions peu vulnérables, les régimes des cours d'eau sont caractérisés par des évolutions lentes et régulières du niveau d'eau et de la concentration. Dans certains cas, à la suite d'observations de débit solide sur une certaine période, il est possible d'établir des relations simples de la forme : $Q_s = a Q_1^n$ $C = b Q_1^m$ $a, b, n, m = \text{constantes}$

Ces débits étant exprimés à l'échelle journalière ou mensuelle. Par la suite, l'érosion pourra être évaluée approximativement en suivant l'évolution

du débit liquide seul, facilement observable aux stations hydrométriques .

De toute façon, l'estimation de la perte en terre ne présente qu'un intérêt secondaire dans ces régions .

Dans les régions très vulnérables, il est impossible d'établir, ne serait-ce qu'un semblant de corrélation entre le débit liquide et la concentration des matériaux en suspension. On obtient, en coordonnées logarithmiques, un nuage de points très dispersés (fig I). Il est donc nécessaire de procéder à des mesures in situ, ce qui pose de nombreux problèmes .

En effet, les cours d'eau de ces régions sont caractérisés par des crues rapides et souvent imprévisibles; c'est pendant ces crues que la majorité des sédiments est transportée, il est donc indispensable de pouvoir effectuer des mesures de concentration et de débit liquide à chaque crue. D'autre part, il arrive souvent que les cours d'eau soient situés dans des zones très retirées, les mesures doivent être alors confiées à un observateur local non spécialisé .

On cherchera donc à intervenir par des opérations simples et rapides, la précision des mesures ayant beaucoup moins d'importance que leur continuité .

Toutefois, les crues d'un caractère exceptionnel qui peuvent, dans ces régions, avoir une influence déterminante sur le transport solide sont difficiles, voire même dangereuses, à observer .

I-2-5 : Les réseaux d'observation du débit solide en suspension

Signalons tout d'abord qu'on peut procéder à des mesures sur parcelles expérimentales. Elles permettent de connaître la quantité de terre perdue par un champ sous l'effet du ruissellement. Le champ expérimental est doté en aval d'un système récepteur et de partiteurs qui permettent de ne recueillir qu'une fraction connue de l'eau ruisselée. Le coût de tels dispositifs ne permet pas de généraliser leur utilisation. Aux U.S.A., les mesures sur parcelles expérimentales ont permis d'établir l'équation "universelle" de perte en sol, qui, dans certaines limites, peut être adaptable à différents climats .

En ce qui concerne le transport solide, les relations entre les quantités de sédiments arrachés aux terres et celles mesurées dans les cours d'eau sont très variables, et ceci pour deux raisons :

-- Une partie des produits de l'abrasion se dépose à la limite des parcelles

OUED ZEROUD

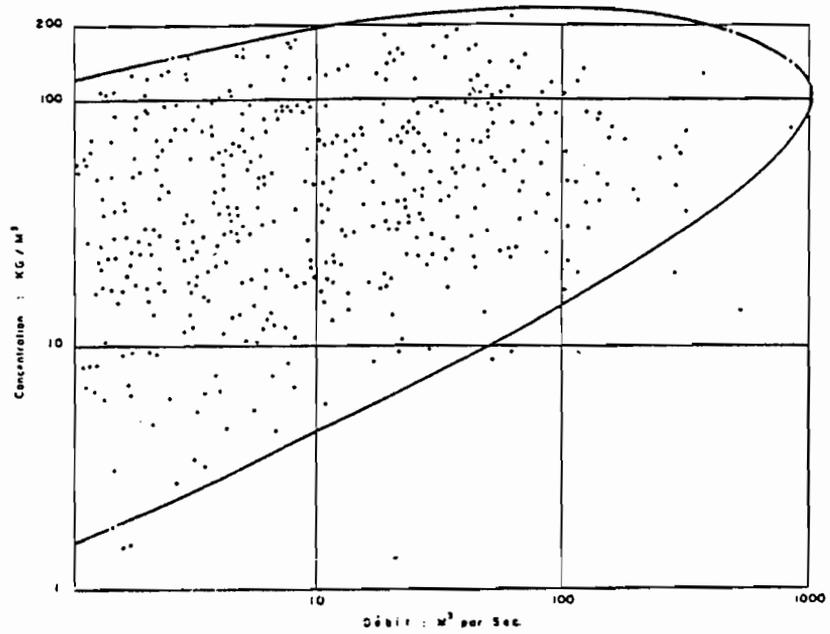


Fig. I : Domaine de dispersion des mesures de teneurs en suspension

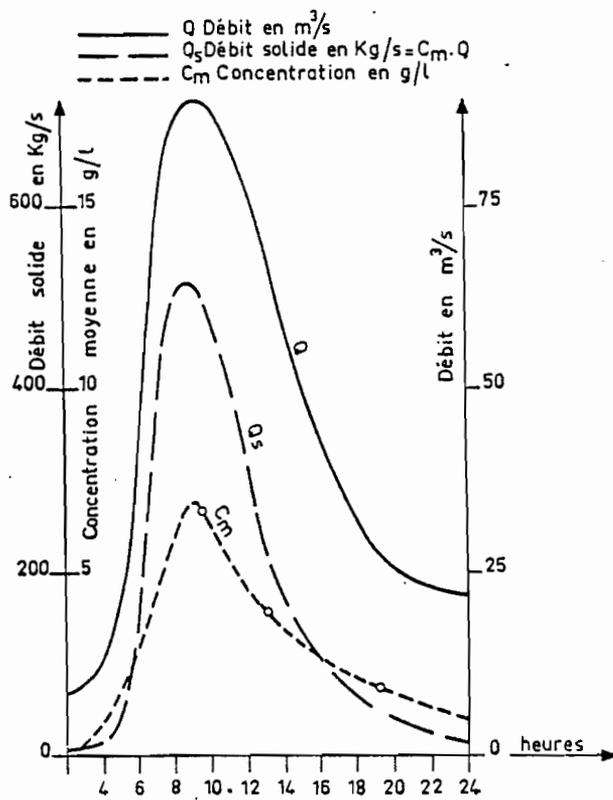


Fig. 2

dans les zones d'épandage, où la vitesse du courant se trouve réduite, ou dans les plaines d'inondation, échappant aux mesures .

-- Inversement, une partie du débit solide est empruntée aux berges, au lit du cours d'eau, aux glissements de terrains en masse, et parfois même aux terrains inondables lors de crues importantes .

D'une manière générale, et compte tenu de ces deux tendances, les mesures de transport solide ne donnent qu'une estimation par défaut de l'érosion et seront d'autant plus significatives qu'elles se situeront plus près de la source de l'évènement .

Nous allons discuter de la qualité des renseignements obtenus suivant le niveau de mesure, nous distinguerons les petits bassins versants et les grands bassins versants, mais les mesures peuvent se faire à tous les niveaux intermédiaires .

I-2-5-I : Les petits bassins versants représentatifs

On peut les appeler indifféremment représentatifs ou expérimentaux, le terme bassin versant expérimental étant plutôt réservé à de très petits bassins destinés par exemple à l'étude de l'effet d'un certain mode de mise en culture sur le processus de dégradation des sols. Leur superficie peut être très variable, de l'ordre de 1 km^2 à quelques centaines de km^2 . Comme leur nom l'indique, ils permettent d'extrapoler les résultats des mesures à une région donnée .

Leur choix sera guidé, entre autres critères, par leur représentativité climatique de la région. Ils seront divisés en plusieurs sous bassins. Les sous bassins seront choisis suivant leur homogénéité, chacune représentative si possible des conditions régionales : unité morphologique, géologique, pédologique, type d'occupation des sols,... qui rendront plus facile l'interprétation des mesures .

Ils feront l'objet d'une étude de facteurs détaillée. Il est important de signaler à ce sujet que, la plupart du temps, le but de ce genre d'étude est d'obtenir un bilan hydrologique complet du bassin. On dispose donc de données importantes sur les facteurs de base, qui ne sont interprétées que du point de vue purement hydrologique. Pourtant, nous pensons qu'une méthodologie simple et peu contraignante permettrait d'effectuer des prélèvements et d'en mesurer, même sommairement, (c'est à dire sans qu'il soit nécessaire de disposer d'un équipement important) les concentrations. On pourrait ainsi

recueillir des indications précieuses, quoiqu'approximatives, sur le régime des transports solides .

L'intérêt de l'étude sur les divers sous bassins versants, chacun de caractéristiques homogènes, est que, soumis à un régime pluviométrique unique, ils permettent d'évaluer les effets des différents facteurs et de mesurer le sens dans lequel ces facteurs agissent sur l'érosion .

Au niveau d'un petit bassin, le lien pluie-transport est assez immédiat, le temps de réponse est court, l'étude se fera donc à l'échelle de la crue. La figure 2 montre les résultats obtenus au cours d'une crue pour un bassin versant de superficie déjà importante. Par comparaison des hydrogrammes, turbidigrammes et pluviogrammes (ou hyétogrammes), on pourra interpréter les mesures .

I-2-5-2 : Les grands bassins versants

Les sections d'observation du transport solide en suspension doivent englober une certaine unité climatique, ce qui est généralement réalisé aux stations hydrométriques, c'est pourquoi ces dernières sont largement utilisées pour la mesure des concentrations. L'observation détaillée des facteurs est inutile, mais l'intérêt est qu'on intègre ici les paramètres géomorphologiques hétérogènes en caractéristiques moyennes, donc, on ramène le régime des transports solides aux seuls critères climat-végétation .

Au niveau d'un grand bassin, l'expression de la dégradation spécifique n'est pas représentative de la perte en terre des sols, pour les raisons que nous avons déjà énoncées .

D'autre part, les matériaux sont déposés, puis transportés à plusieurs reprises suivant les variations de la capacité de transport du cours d'eau. Seules les particules les plus fines peuvent être transportées en suspension jusqu'à la section sans discontinuité. En conséquence, la répercussion des phénomènes est beaucoup plus lente à ce niveau. Dans de telles études, on s'intéressera donc plus particulièrement aux variations saisonnières du transport solide. Pour les résultats, on se reportera aux figures 31 et 32 . Dans le cas de la Sanaga, on constate une évolution assez lente du débit liquide et des concentrations, mais ce n'est pas une règle générale; en particulier, pour les grands oueds d'Afrique du Nord, on peut assister à des crues très violentes étalées sur quelques jours seulement .

Plus généralement, on enregistre parfois des variations de concentration importantes sans variation notable du niveau de l'eau. En effet, un évènement pluvieux se déplaçant au dessus du bassin versant peut engendrer un débit liquide stable, mais des concentrations variables suivant l'érodabilité des sols sur lesquels il agit. Donc, l'étude des variations saisonnières impose des mesures de concentration assez fréquentes, si possible quotidiennes en saison pluvieuse .

I-2-6 : Conclusion

Dans les régions les plus vulnérables, où l'équilibre naturel des sols est déjà précaire, la mise en valeur des terres par des modes de culture mal appropriés a pour effet d'accélérer dans des proportions considérables leur processus de dégradation, témoins les déboires extrêmement coûteux qui ont été rencontrés dans la mise en valeur de certains pays neufs par suite de l'insuffisance des connaissances sur l'érosion .

Mais le phénomène est d'une approche difficile. Cette difficulté est souvent augmentée par la disparité des observations; il est donc à souhaiter que des mesures, même simples, soient effectuées régulièrement sur les stations hydrométriques existantes .

La méthode idéale serait d'étudier l'érosion dans une région climatique homogène à la fois sur des bassins versants représentatifs de dimensions limitées et sur quelques parcelles réparties sur ces bassins et de mesurer la quantité de terres définitivement perdue par les sols sur une station contrôlant un grand bassin versant, de façon à ce que cet ensemble de données se prête mieux à l'interprétation. Mais un tel degré de coordination n'est que rarement atteint, c'est cependant dans ce sens que peuvent et doivent s'orienter les recherches .

I-3 : PREVISION DES APPORTS EN SEDIMENTS

L'évaluation des apports en sédiments au niveau du réseau de drainage permettra à la fois une meilleure conception des ouvrages d'exploitation, et en particulier des barrages de retenues, et une meilleure connaissance de la nature et de l'importance des ouvrages de protection à mettre en oeuvre .

Nous nous intéresserons ici exclusivement à la prédétermination, et, par là même, à la prévision des apports dans les ouvrages hydrauliques .

I-3-I : Exemples d'ouvrages pouvant nécessiter la mise en oeuvre d'une étude de transports solides

I-3-I-I : Les barrages de retenues

Une retenue constitue en quelque sorte un piège à sédiments de grande envergure. Les matériaux transportés par la rivière vont se déposer, les matériaux charriés vont contribuer à la formation d'un delta en tête de retenue, les matériaux les plus fins vont se décanter sur toute la longueur de la retenue jusqu'au barrage .

La conséquence de l'envasement d'une retenue est la perte de capacité utile du réservoir. Le rythme annuel de comblement de la retenue est le rapport, exprimé en pourcent, du volume de matériaux déposés par an au volume total de la retenue lors de sa mise en eau .

Le rythme annuel de comblement dépendra à la fois des apports solides annuels, donc de la vulnérabilité du bassin versant, et du mode d'exploitation du barrage. Ainsi, dans certaines retenues d'Afrique du Nord, on a mesuré des rythmes de comblement de 3%, ce qui estime la durée de vie du barrage à une trentaine d'années; citons l'exemple spectaculaire du barrage sur l'oued El Kebir en Tunisie qui s'est effectivement envasé en 30 ans .

Or, bien que préoccupant pour l'aménageur, ce phénomène ne remet que rarement en cause la construction du barrage, notamment pour les ouvrages destinés à assurer la régularisation des débits dans les régions qui présentent un net déficit d'eau pendant la saison sèche, et qui sont malheureusement les régions les plus vulnérables à l'érosion, donc celles où les rythmes de comblement risquent d'être élevés. Outre les mesures de protection des sols et la réalisation coûteuse d'ouvrages de protection contre l'entrée des sédiments dans la retenue, la solution consiste à prévoir des aménagements au niveau du barrage .

Dans l'étude du transport solide, il faudra bien sûr déterminer les quantités de sédiments transportés, mais aussi définir les proportions respectives des différentes catégories de matériaux, de façon à pouvoir, par le calcul, prévoir la conformation des dépôts (pente, répartition) qui conditionnera la nature et l'efficacité des aménagements à projeter. Une description des solutions à adopter nous entraînerait trop loin, mais nous citerons :

- L'évacuation par des vannes : utilise le phénomène des courants de densité. Il permet d'évacuer des quantités appréciables de sédiments en limitant les pertes en eau, ce qui est intéressant dans le cas de retenues interannuelles .
- Les chasses : la turbulence créée par leur ouverture remet les sédiments en suspension, ils s'évacuent d'eux-mêmes par la chasse. Les pertes en eau sont importantes .

I-3-I-2 : Les bassins de décantation

Ce sont des ouvrages exclusivement conçus pour favoriser le dépôt des sédiments par réduction de la vitesse du courant : bassins de délimonage ou de dessablage .

Ils peuvent être nécessaires par exemple en tête de canaux ou à l'amont des barrages pour limiter l'entrée des sédiments .

Entre autres applications, nous citerons le bassin de délimonage de Cadarache en tête du canal de dérivation des eaux de la Durance vers l'étang de Berre. Mis en service en novembre 1980, il doit limiter les apports en sédiments vers l'étang de Berre afin d'en préserver les caractéristiques écologiques. Sa surface est de 122 hectares, capacité 12,5 hm³, durée de vie estimée à 24 ans .

La mesure du transport solide permettra de prévoir les caractéristiques d'un bassin suivant la fonction qu'il doit remplir : longueur qui sera liée à la composition granulométrique des matériaux transportés, capacité, durée de vie, mode d'exploitation (dragages) .

I-3-I-3 : Autres ouvrages

Tous les ouvrages qui contribuent à la sédimentation peuvent éventuellement faire l'objet d'une étude de transport solide : barrages au fil de l'eau, barrages dits de correction pour nos régions de montagne, fosses à graviers,...

Signalons la fosse de Livron, dans le lit aval de la Drôme qui avait

dû être étudiée préalablement sur un modèle réduit .

I-3-2 : Détermination des apports

Signalons tout d'abord que les méthodes ci-dessous ne sont pas exclusives, mais pourront se compléter utilement .

Si les circonstances sont opportunes, on peut procéder par analogie; soit avec un ouvrage identique, par exemple une retenue voisine dans laquelle on a mesuré les dépôts; soit d'après les résultats de mesures effectuées à une station d'observation contrôlant un bassin versant de caractéristiques analogues, d'où l'intérêt que l'on a (et ce n'est pas la seule raison) de procéder systématiquement à l'analyse granulométrique des sédiments transportés aux stations. Notons cependant que la méthode par analogie est assez incertaine étant donnée la spécificité du processus de transport .

Si on le juge rentable, on peut avoir recours à un modèle réduit à fond mobile pour évaluer le charriage, mais le coût de tels dispositifs ne les rendent applicables qu'à des aménagements de grande envergure .

Le plus souvent, on prédétermine les apports en sédiments dans les retenues à partir de modèles mathématiques. Ce sont des formules empiriques qui permettent d'estimer la production des sédiments en tenant compte d'un nombre plus ou moins grand de caractéristiques du bassin versant .

Parmi les modèles élaborés, un des plus intéressants nous vient du Canada : il consiste à découper le bassin versant en entités homogènes de superficie de 1 ha, pour chacune desquelles est estimée la production de sédiments par application de l'équation universelle de perte en sol. La valeur obtenue par addition des quantités de sédiments produites par chaque entité est affectée d'un coefficient empirique d'apport solide qui permet de tenir compte des pertes en sédiments par dépôt entre leur origine et le réseau hydrographique .

Mais ces modèles ne sont qu'approximatifs, leur précision sera liée à la qualité des renseignements recueillis par l'observation des facteurs in situ. De plus, ils ne sont applicables qu'à des régions données et dans des conditions bien déterminées .

Pour évaluer les apports, rien ne remplace la mesure in situ du transport solide car, par ce procédé, on intègre toutes les causes d'apport ou de captage de sédiments dues aux conditions locales en amont de la section de mesure (glissements de terrains, poussières des régions minières, aménagements divers en amont de la section,...) .

La station d'observation peut ne pas se situer au niveau du projet, mais il est préférable que l'apport solide entre la section de mesure et la section du projet ne soit pas trop important .

Des exemples cités précédemment, il ressort que l'on doit tenir compte du transport en suspension, et dans la mesure du possible du transport par charriage, suivant son importance relative par rapport au débit solide total, et bien sûr suivant le but de l'étude. S'il s'agit de déterminer les caractéristiques d'une fosse à graviers, par exemple, on s'intéressera uniquement au débit de charriage .

I-3-3 : Conclusion

D'une manière générale, les multiples interventions de l'homme dans le lit du cours d'eau ont encore des conséquences mal appréciées. Aussi convient-il d'être prudent lorsqu'on décide la construction d'un ouvrage destiné à modifier le comportement d'un cours d'eau. Cette prudence pourra être guidée efficacement par des mesures de transport solide, sous réserve cependant que des phénomènes paroxysmaux n'interviennent pas. Ces phénomènes, qui caractérisent les régions semi arides (Afrique du Nord, Nord-Est du Brésil,...), peuvent en effet modifier sensiblement les prévisions d'apport en année moyenne .

L'oued Zeroud en est un exemple significatif. Il aurait transporté, lors des crues de l'automne 1969, quelque 400 millions de tonnes de sédiments. Ce chiffre a été obtenu par cubage des dépôts dans la plaine de Kairouan et à partir des observations à la station de Sidi Saad, contrôlant un bassin versant de 8.000 km^2 ; ce qui donne une érosion spécifique de 50.000 T/km^2 pour l'année 1969, alors que la moyenne interannuelle est de 2.300 T/km^2 .

II MESURE DU TRANSPORT SOLIDE
EN SUSPENSION

2-I : THEORIE - MECANISME - PRINCIPE DES MESURES

2-I-I : Equilibre des particules en suspension

La suspension est un état d'équilibre entre la vitesse de chute due à la pesanteur qui entraîne les particules vers le bas et la vitesse de dispersion des particules dont l'intensité et la direction sont fonction des variations de turbulence au sein du liquide .

2-I-I-I : Vitesse de chute : Loi de Stokes

La vitesse de chute ω d'une particule sphérique dans un liquide au repos est donnée par la loi de Stokes :

$$\omega = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\mu} \right) g d^2$$

d = diamètre de la particule

ρ = densité du liquide

ρ_s = densité du solide

μ = coefficient de viscosité cinématique du liquide

g = accélération de la pesanteur

Les différentes théories sont basées sur la loi de Stokes et tiennent compte de paramètres tels que la forme de la particule et le coefficient de traînée qui dépend du nombre de Reynolds pour la particule .

2-I-I-2 : Equation d'équilibre : Loi de Schmidt - Rouse

Si y est la hauteur d'un point au-dessus du lit d'un cours d'eau, c la concentration, le débit solide vertical en ce point est :

$c \cdot \omega$ = débit solide dû à la décantation des matériaux en l'absence de toute turbulence .

- E $\frac{dc}{dy}$ = composante verticale du débit de transfert des matériaux vers le haut (dû à la turbulence) .

E = coefficient de mélange traduisant la turbulence

Cette expression a été introduite pour la première fois par O'Brien .

$$\text{D'où l'équation d'équilibre vertical : } c \cdot \omega = - E \frac{dc}{dy}$$

Ce qui donne, après intégration sur la verticale, et en supposant E constant :

$$\frac{c}{c_a} = e^{-\frac{\omega}{E}(y-a)} \quad (I)$$

c_a = concentration à la hauteur a

Pour un écoulement en canal de largeur infinie, la turbulence est créée par la seule résistance du fond, E est fonction de la vitesse de fond u et l'utilisation de (I) aboutit à la formule dite de Schmidt - Rouse :

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{\frac{D}{z} - 1}{\frac{D}{a} - 1} \right)^z$$

D = profondeur totale de l'écoulement

$$z = \text{Nombre de Schmidt - Rouse} = \frac{\omega}{0,4 u}$$

Mais cette loi de répartition des concentrations est assez théorique. En particulier, elle ne tient compte ni de l'influence des berges, ni du degré de turbulence de l'écoulement et elle suppose E constant, ce qui est rarement vérifié .

Il serait donc hasardeux de l'appliquer à un cours d'eau pour déterminer les concentrations aux différentes profondeurs à partir de la seule mesure de c_a , en un point A de la verticale .

Cependant, l'examen de la formule, que nous ne détaillerons pas ici, nous permet de dégager deux tendances assez logiques qui sont le plus souvent confirmées par les observations, à savoir :

- que la concentration croît avec la profondeur
- que l'on trouve une plus forte proportion d'éléments grossiers au voisinage du fond qu'en surface .

2-I-2 : Répartition des vitesses et des concentrations dans une section

2-I-2-I : Répartition des vitesses du courant

Il est bien connu que le courant se trouve ralenti au voisinage des berges et du fond du fait de la rugosité des parois et du lit .

La courbe de répartition des vitesses sur une verticale a reçu le nom de parabole des vitesses. Nous donnons figure 3 quelques exemples de paraboles de vitesses (d'après M. Roche) .

2-I-2-2 : Répartition des concentrations

Il semble difficile de généraliser les constatations et il nous apparaît que les théories sont bien fragiles, la répartition des concentrations étant liée à la turbulence des eaux bien sûr, mais aussi à la granulométrie des éléments transportés, à l'érodabilité des berges, à l'influence de la saltation au voisinage du fond; autant de paramètres dont l'influence est difficile à déterminer .

Cependant, nous avons essayé de dégager certaines conclusions, mais ces conclusions doivent être considérées avec beaucoup de réserve. Les exemples ci-dessous ne sont donnés qu'à titre indicatif .

2-II-2-2-I : Variations avec la profondeur

— Si l'écoulement est propice à un bon brassage (chutes, rapides en amont de la section), on constate souvent, en échelle linéaire, que les concentrations se répartissent autour d'une droite.

La figure 4 donne l'exemple d'une telle section: la Sanaga à Nachtigal (Cameroun) .

— Si l'écoulement est quasi laminaire sur une grande longueur en amont de la section, on pourra s'attendre à une croissance exponentielle des concentrations dans le sens surface-fond, on se rapproche ainsi de la répartition théorique de Schmidt - Rouse .

Mais on observe souvent en échelle semi-logarithmique deux ou plusieurs segments de droites. Les coudes étant localisés assez haut au-dessus du fond, le phénomène est difficilement attribuable à la saltation .

Figure 5 : le Chari à Fort Lamy (Tchad)

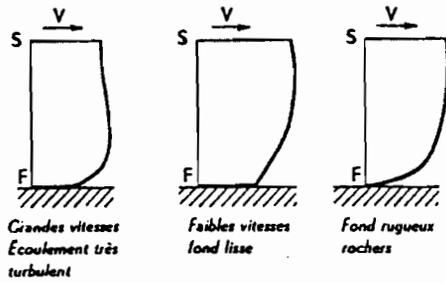
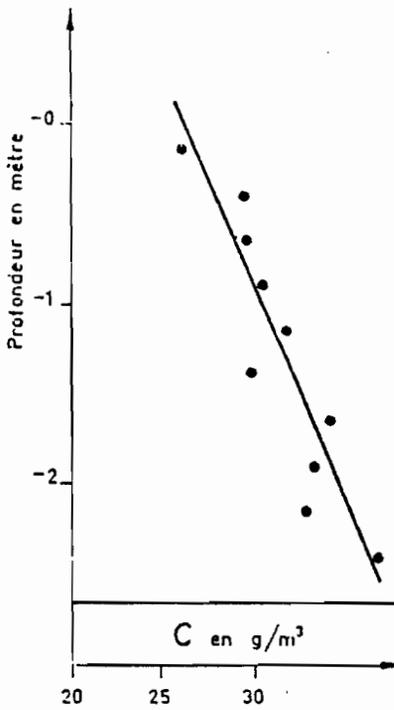
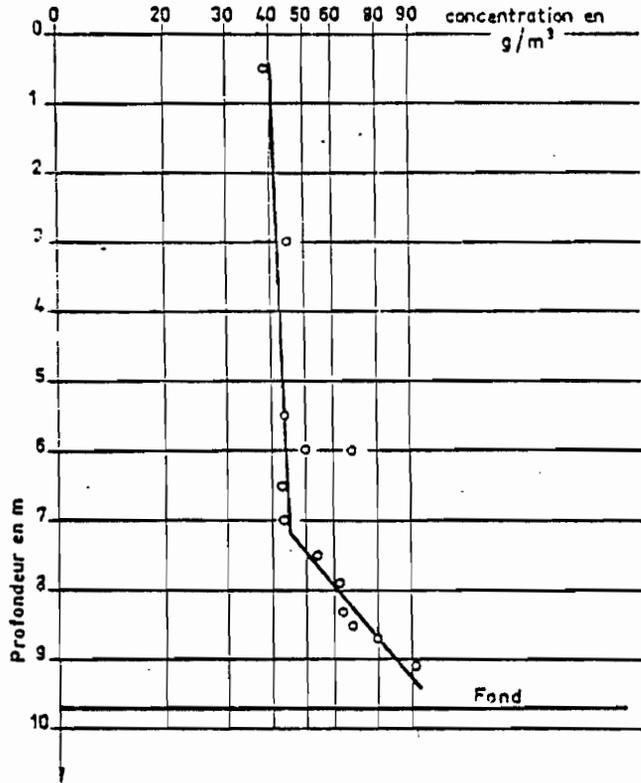


Fig. 3



SANAGA A NACHTIGAL.
Variations de la turbidité avec la profondeur.

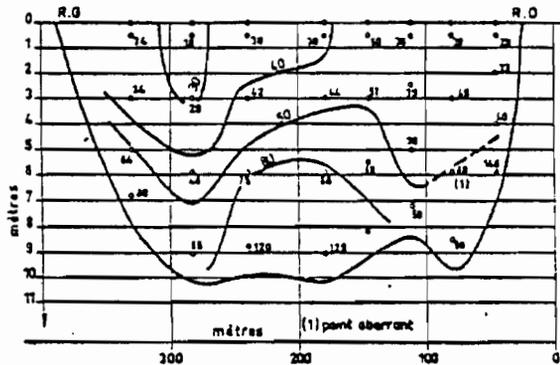
Fig. 4



CHARI A FORT-LAMY. Variation de la concentration le long d'une verticale.

Fig. 5

Crue du
20 OCTOBRE 1967
HTP = 762cm



CHARI A FORT-LAMY. Courbes d'égal concentration (en grammes par m³).

Fig. 6

2-I-2-2-2 : Variations transversales

En général, plus le régime est turbulent, et plus les concentrations sont susceptibles de variations transversales brusques. La figure 6 montre le Chari lors d'une crue, le régime restant quand même relativement peu turbulent. Malgré les apparences, les variations sont peu rapides si l'on tient compte du rapport des deux échelles (largeur et hauteur) . .

On constate sur la figure que la concentration augmente sensiblement au voisinage des berges. Ce phénomène est assez fréquent, mais une fois de plus très fluctuant. Citons parmi ses causes de fluctuation :

- érodabilité des berges, bien sûr
- débit liquide
- charge solide du cours d'eau (son influence a déjà été soulignée)
- montée de crue ou décrue (pour un même débit liquide, on conçoit que les berges sont plus vulnérables en montée de crue) .

2-I-3 : Débit solide instantané

Soit une section de cours d'eau de largeur L , de profondeur totale P à la verticale d'abscisse l sur la section .

Considérons un point à la profondeur p sur cette verticale. Si l'on a mesuré la vitesse v du courant et la concentration c en matériaux solides en ce point, le débit liquide sur un élément de surface ds de la section à proximité du point sera :

$$q_1 = v \cdot ds$$

$$\text{et le débit solide: } q_s = c \cdot q_1 = c \cdot v \cdot ds$$

Le débit solide total sur la section sera :

$$Q_s = \iint_S q_s = \iint_S c \cdot v \cdot ds = \int_0^L \int_0^P c \cdot v \cdot dl \cdot dp$$

$$\text{Le débit liquide total : } Q_1 = \iint_S v \cdot ds$$

Donc, théoriquement, pour connaître le débit solide du cours d'eau à un instant déterminé, on doit procéder à des mesures de concentration et de vitesse en divers points de la section :

- Les mesures de vitesses se font au moulinet .
- Les mesures de concentrations se font en général à l'aide d'appareils de prélèvement d'un échantillon d'eau chargée en matériaux en suspension, les échantillons étant par la suite analysés au laboratoire .

L'analyse consiste à mesurer le volume V de l'échantillon prélevé, puis à le filtrer de façon à obtenir un résidu sec que l'on pèsera (poids P), la concentration est alors :

$$C = \frac{P}{V}$$

Pour des raisons pratiques que nous examinerons par la suite, on n'effectue pas simultanément des mesures complètes de vitesses et de concentrations, nous appellerons :

- Jaugeage des vitesses l'exploration du champ des vitesses .
- Jaugeage des prélèvements l'exploration du champ des concentrations .
- Jaugeage complet la réunion de ces deux opérations .

Ceci afin d'éviter toute ambiguïté, fréquemment rencontrée dans les différents ouvrages, sur le terme jaugeage, à l'origine destiné uniquement à désigner les mesures de vitesses, et qui, par extension, a été appliqué aux prélèvements .

Les mesures de vitesses et de concentrations se font par verticale; on procède aux mesures sur plusieurs verticales de la section .

Un jaugeage complet est très long : le jaugeage des vitesses et le jaugeage des prélèvements prennent chacun quelques heures. Il est donc impossible de procéder fréquemment à de telles opérations. Nous allons voir comment, dans la pratique, on simplifie le processus de mesure .

2-I-4 : Détermination du débit liquide et de la concentration moyenne

On appelle concentration moyenne réelle dans une section à un instant donné la grandeur C_m telle que :

$$Q_s = C_m Q_1$$

2-I-4-I : Détermination de Q_1

Le débit liquide est lié à la cote H du plan d'eau par une relation plus ou moins étroite appelée relation de tarage : $Q_1 = f(H)$

Le tarage d'une station consiste à effectuer des jaugeages de vitesses, dont on déduira le débit liquide, pour différentes valeurs de H . On pourra ainsi tracer la courbe de tarage (fig. II, I2, I3) qui permettra d'obtenir le débit liquide par la seule lecture de H .

La hauteur du plan d'eau est déterminée :

- Soit par lecture directe sur un limnimètre , qui est une simple mire verticale .
- Soit par enregistrement à l'aide d'un limnigraphe . Un stylet lié à un système de flotteur et contrepoids permet l'enregistrement direct de la hauteur d'eau sur un tambour animé d'un mouvement de rotation uniforme. D'autres systèmes enregistrent la pression de l'eau qui est liée à sa hauteur. On obtient ainsi la courbe des variations de cote du plan d'eau en fonction du temps ou limnigramme .

L'hydrogramme : $Q_1 = f(t)$ pourra être tracé facilement à partir du limnigramme : $H = f(t)$ et de la courbe de tarage : $Q_1 = f(t)$.

2-I-4-2 : Détermination de C_m

Mais la principale difficulté réside dans la détermination de la concentration moyenne. Schématiquement, il existe deux façons de suivre son évolution dans le temps :

- Soit l'on estime que la turbulence est suffisamment forte pour que la concentration en un point soit égale à la concentration moyenne dans la section, et on suit les variations de la concentration en un point unique .

L'inconvénient évident de cette méthode est son imprécision. Il n'en reste pas moins qu'elle est largement employée du fait de sa simplicité. Par ailleurs, nous verrons qu'elle se prête à l'enregistrement automatique .

- Soit l'on effectue des jaugeages de prélèvements, associés ou non à des jaugeages de vitesses. Ils permettront d'obtenir une valeur précise de la concentration moyenne réelle à l'instant des mesures .

Simultanément, sera prélevé d'une façon simple (prélèvement au seau et au bord du cours d'eau, par exemple) un échantillon, dit échantillon témoin, dont la concentration C sera mesurée .

Cette opération, effectuée à différentes époques, permettra d'établir une relation de corrélation entre C et C_m : $C_m = K(C)$.

Par la suite, des prélèvements d'échantillons témoins seuls seront effectués à la cadence que l'on aura choisie. On pourra alors calculer la valeur de C_m à partir de la corrélation .

Différents types de jaugeage peuvent être utilisés pour mesurer la concentration moyenne réelle :

- Jaugeage complet : c'est évidemment la méthode la plus précise, mais aussi la plus longue .
- Jaugeage de prélèvements seul : la concentration moyenne est estimée égale à la moyenne arithmétique des concentrations C_a .
- Jaugeage de surface : Les prélèvements sont faits uniquement en surface. Ce mode de jaugeage ne permet pas d'accéder directement à la concentration moyenne, mais, par corrélation avec un jaugeage complet, il peut-être revalorisé et assimilé à ce dernier .
- Jaugeage par intégration sur les verticales : par ce procédé, on obtient directement la concentration moyenne des eaux sur une verticale. Le principe de mesure et de calcul est ici différent, le procédé sera étudié séparément .

On conçoit dès à présent que la précision des mesures sera étroitement liée à la fréquence des jaugeages, qui permettront de définir la corrélation entre c et C_m .

Or, le jaugeage est une opération délicate qui nécessite l'intervention d'une équipe de techniciens bien entraînés, ce qui pose un problème de disponibilité du personnel qualifié, sans parler du matériel. Il est donc difficile, notamment dans les régions éloignées, de procéder régulièrement à de telles opérations .

Cela explique qu'on se contente souvent de la méthode d'observation en un point unique. Mais, même dans ce cas, il sera utile de procéder ne serait-ce qu'à une seule opération de jaugeage complet (ou de jaugeage de prélèvements), de façon à avoir une idée de la représentativité du point de mesure .

D'une manière générale, la fréquence des jaugeages dépendra largement des moyens mis en oeuvre .

L'ORSTOM a procédé depuis 1965 à des études systématiques de transport en suspension dans divers pays d'Afrique. En particulier, des observations sur plusieurs années sur les réseaux hydrométriques des grands cours d'eau du Cameroun (Sanaga, Mbam) et du Tchad (Chari et Logone), ainsi que sur des rivières de moindre importance (Tsanaga au Cameroun), et sur des bassins représentatifs (Sarki en République Centrafricaine), ont permis de mettre au point une méthodologie de mesure dans ces cours d'eau intertropicaux peu chargés.

Ces études ont été suffisamment approfondies pour que nous nous y référions fréquemment. La présence quasi-continue de techniciens et ingénieurs lors des missions permettait d'effectuer des jaugeages assez fréquents (tous les 15 jours en moyenne en période de hautes eaux pour les grands cours d'eau) .

2-2 : LE TARAGE DES STATIONS

Une description très sommaire du tarage des stations par jaugeages de vitesses au moulinet nous a paru utile pour une meilleure approche de l'étude du jaugeage des prélèvements .

Pour plus de détails, nous renvoyons à l'ouvrage très complet de M. Roche: " Hydrologie de surface ". La plupart des illustrations sont tirées de cet ouvrage .

2-2-I : Choix de la section

Les critères de sélection indiqués ci-dessous sont établis en fonction, d'une part de la facilité des mesures au moulinet, d'autre part de la stabilité de la loi hauteur-débit. La section idéale aurait les caractéristiques suivantes :

- Fond et berges stables (lit rocheux idéal) .
- Filets liquides parallèles, donc écoulement quasi-laminaire, afin d'éviter les perturbations du champ des vitesses. En particulier, pas d'irrégularités du lit et profil en travers relativement constant au voisinage de la section .
- Variations lentes de niveau et pente de la ligne d'eau à peu près constante en crue comme en décrue. (Si la première condition est réalisée, la deuxième l'est aussi en général) .
- Vitesses de courant et pente du lit suffisamment grandes .

Pour les petits cours d'eau, où les critères de choix de bonne station sont rarement rencontrés, il est souvent nécessaire de canaliser l'écoulement au moyen de digues .

2-2-2 : Les moulinets

Pour l'hydrologue, les mesures de vitesses se font presque toujours au moulinet, parfois à axe vertical, mais le plus souvent à axe horizontal (fig. 7) .

Il est composé d'une hélice montée sur un axe, et d'un système de démultiplication qui actionne une roue. Un contacteur électrique émet un signal à chaque tour de roue. Le signal est transmis en surface par un organe compteur (lumineux, sonore ou enregistreur) .

L'opérateur est muni d'un chronomètre, il comptera le nombre d'impulsions pendant le temps qu'il jugera suffisant pour avoir une évaluation de la vitesse moyenne du courant au point de mesure (en général, 30 secondes à 1 minute). La connaissance du rapport de démultiplication lui permettra d'obtenir par un calcul simple la vitesse moyenne de rotation de l'hélice, soit n , en tours par seconde, pendant cet intervalle de temps .

Il existe, pour une certaine gamme de vitesses, une relation linéaire entre n et la vitesse du courant v .

$$v = a \cdot n + b$$

a caractérise l'hélice

b = vitesse dite de frottement de l'appareil .

Les valeurs de a et de b sont données par le constructeur .

Les différents constructeurs (Neyrpic en France, O T T en Allemagne) présentent un grand choix de modèles répondant aux différentes conditions d'utilisation .

Les hélices les plus sensibles sont précises jusqu'à une limite inférieure de vitesse de 5 cm / s .

Si l'on constate la présence de débris flottants lors de crues, on utilisera des hélices robustes qui ont moins de chance d'être endommagées .

On considère que les mesures sont difficiles, voire même impossibles pour des vitesses de courant dépassant 5 m / s .

2-2-3 : Utilisation des moulinets

Les accessoires présentés dans ce qui suit sont aussi utilisés pour les échantillonneurs .

2-2-3-I : Montage sur perche

Le moulinet (ou l'échantillonneur) est fixé au bout d'une perche graduée pour lire la profondeur. La perche est manipulée à la main par un opérateur. Ce montage est utilisable pour de faibles profondeurs et de faibles vitesses de courant. Pour les mesures en eau trouble, un index fixé en haut de la perche permet d'orienter le moulinet face au courant .

2-2-3-2 : Matériel suspendu

La plupart du temps, les moulinets sont montés sur un saumon suspendu à un câble (fig. 8) .

Les saumons sont des poids de lestage profilés, munis d'ailettes de façon à ce qu'ils s'orientent d'eux mêmes face au courant .

Des saumons de 25, 50 ou 100 kg sont le plus couramment employés. On choisira toujours le saumon le plus petit possible, mais d'un poids suffisant pour qu'il soit stable, donc peu sensible aux turbulences du courant, et ne crée pas un angle de câble, par rapport à la verticale, trop important (ceci restant valable pour les échantillonneurs) .

Les saumons sont parfois munis d'un contact de fond électrique : un circuit électrique est fermé par une languette souple située sous le saumon lorsque ce dernier touche le fond. L'opérateur en est averti par un signal .

2-2-3-3 : Treuils

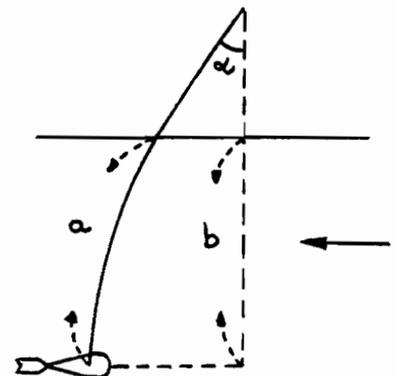
Ils servent à manoeuvrer l'appareil (saumon ou échantillonneur) en mode suspendu. Ils permettent d'amener sans peine l'appareil à la profondeur désirée. Ils sont munis d'un système de branchement des câbles électriques permettant de transmettre les différents signaux aux organes récepteurs .

La mesure de la profondeur se fait, soit à l'aide d'une poulie sur laquelle passe le câble, soit directement sur le tambour d'enroulement du treuil si celui-ci ne supporte qu'une couche de câble. Le compteur est mis à zéro au moment où l'axe de l'appareil suspendu est au niveau de la surface de l'eau. Si le treuil ne comporte pas d'accessoires de comptage, le câble sera préalablement gradué .

2-2-3-4 : Angle du câble avec la verticale

La profondeur mesurée est a , la profondeur réelle est b , la mesure de a tend donc à surestimer la profondeur.

On néglige l'erreur pour des angles $\alpha < 10^\circ$. Pour $\alpha > 10^\circ$, il faut mesurer l'angle; on utilise pour cela un rapporteur à pendule, instrument simple dont le nom même nous dispense d'une description .



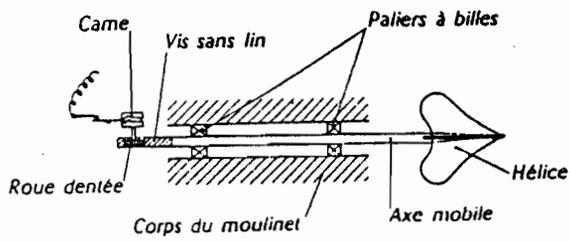


Fig. 7 : Moulinet à axe horizontal

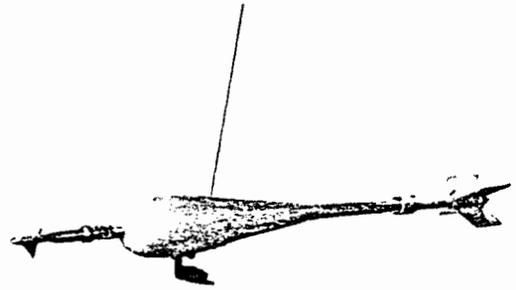


Fig. 8 : Moulinet monté sur saumon

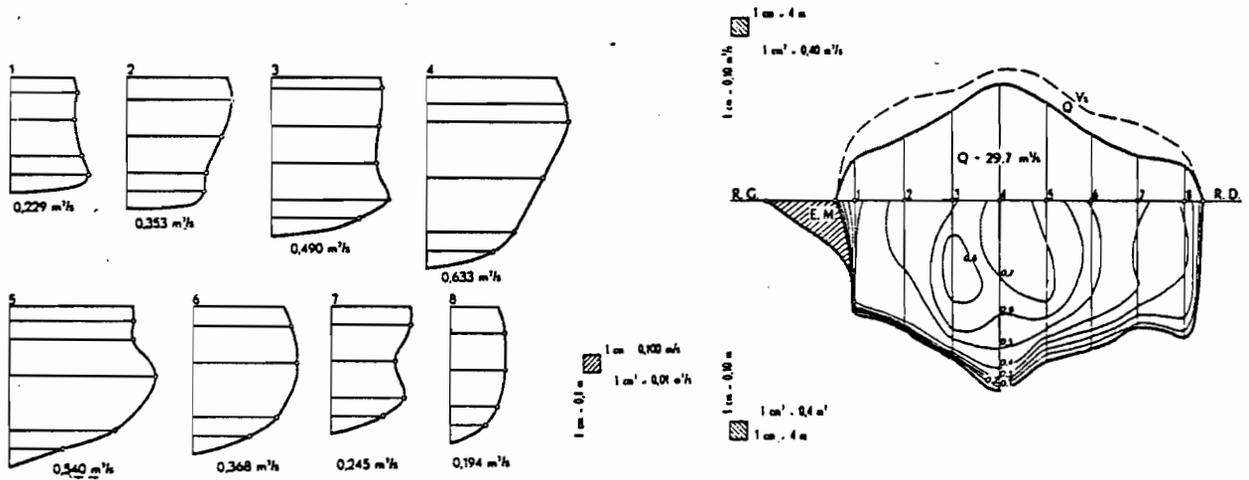


Fig. 9 : Méthode des paraboles

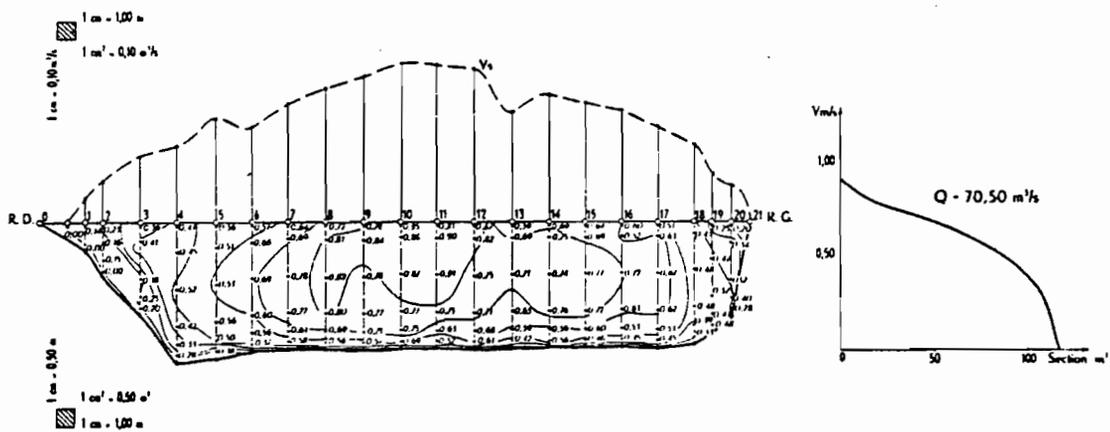


Fig. 10 : Méthode des isotaches

Des tables donnent la valeur du coefficient de correction k tel que
 $b = k \cdot a$ pour un angle α . $k < 1$ évidemment.

2-2-4 : Densité des mesures

Le procédé du jaugeage au moulinet étant simple et relativement rapide, on peut se permettre d'effectuer des mesures en de nombreux points.

D'une manière générale, pour les cours d'eau importants, on effectuera les mesures sur une quinzaine de verticales ou plus en prenant 6 à 8 points par verticale. Un jaugeage classique sur une section de 200 mètres de large comporterait à peu près 150 mesures, soit environ une demi-journée de travail.

Mais le niveau de l'eau doit rester constant pendant le jaugeage, on peut donc, sur les cours d'eau à variations rapides de niveau, être amené à adopter des densités de mesures plus faibles.

Les premières mesures de vitesses sont faites à 20 ou 30 cm au-dessous de la surface, les mesures les plus près du fond à 20 ou 30 cm au-dessus du fond.

2-2-5 : Calcul du débit

Il existe deux méthodes, d'ailleurs absolument équivalentes puisqu'elles reposent chacune sur une double interpolation.

-- Méthode des paraboles (fig. 9) : c'est de loin la méthode la plus employée car elle se prête mieux au calcul informatique. On trace la parabole des vitesses pour chaque verticale, la surface est planimétrée, ce qui donne pour chaque verticale un débit par unité de largeur $q / u \cdot l$ en m^2 / s . On porte ensuite au droit de chaque verticale les valeurs de $q / u \cdot l$ en ordonnées, on trace la courbe, l'aire de cette courbe représente le débit total.

-- Méthode des isotaches (ou isodromes) (fig. 10) : On trace les courbes d'égale vitesse dans la section, ou isotaches. Pour chaque isotache, on planimètre l'aire délimitée par la courbe isotache et la ligne de surface du cours d'eau. On reporte ensuite sur un graphique en abscisses les valeurs des aires planimétrées et en ordonnées les vitesses correspondantes. On trace la courbe, qui, planimétrée, donne le débit total.

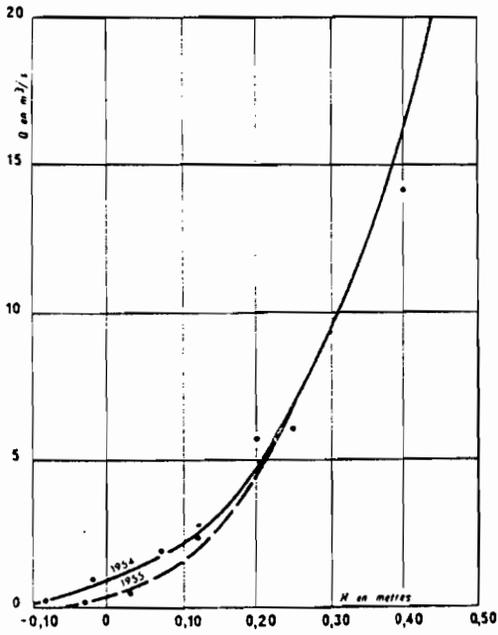


Fig. II

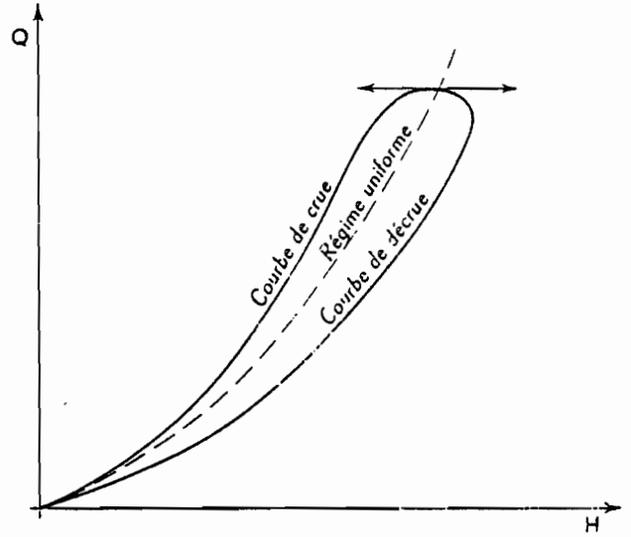


Fig. I2

COURBES DE TARAGE

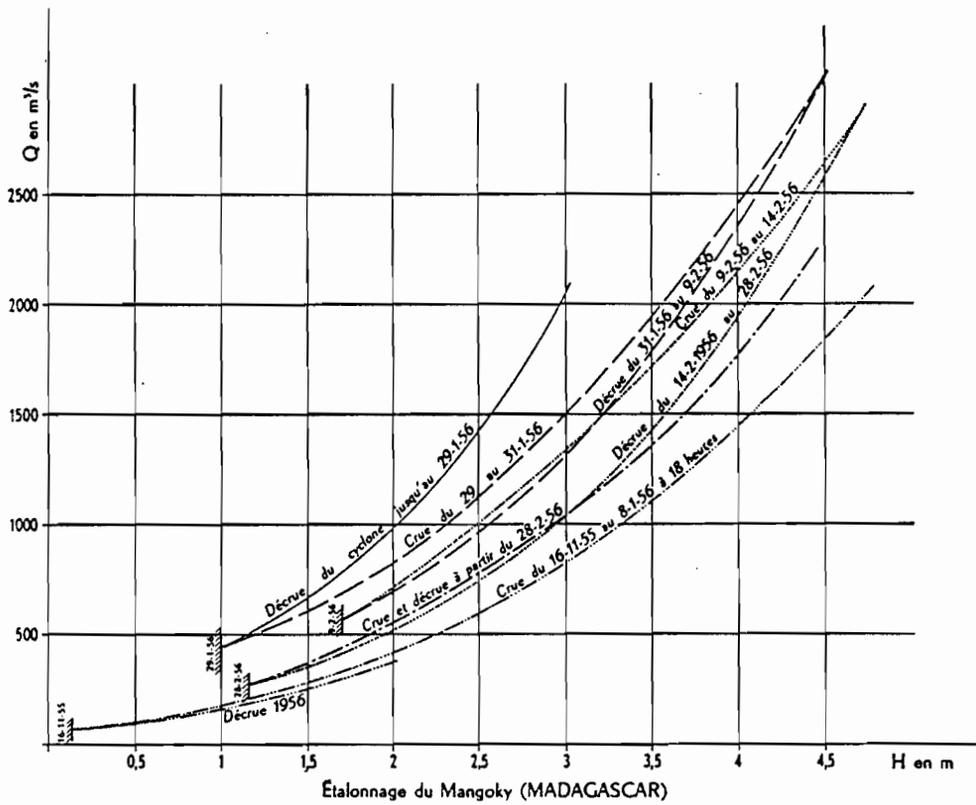


Fig. I3

2-2-6 : Courbes de tarage

On peut distinguer :

- Les sections stables à la loi hauteur-débit univoque : elles correspondent à peu près aux critères de bonne station (fig. II : courbe de tarage pour une telle section) .
- Les sections stables à la loi hauteur-débit non univoque. Ce sont généralement les sections au voisinage desquelles la pente de la ligne d'eau est faible. En montée de crue, l'eau qui arrive pousse l'eau qui est là, entraînant une augmentation de débit par accroissement des vitesses de courant sans variation de cote du plan d'eau. Le phénomène inverse se produit en décrue . (fig. I2)
- Les sections instables : sur certaines rivières dont le lit est remodelé à chaque crue par remblaiement ou affouillement, il est impossible de trouver une section à fond stable, on devra étalonner fréquemment la station . (fig. I3) .

L'erreur introduite sur le débit liquide calculé à partir de la courbe de tarage dépendra de la stabilité de la section. Elle peut dépasser 30 % pour les stations instables .

2-3 : LA METHODE PAR JAUGEAGES COMPLETS DE
PRELEVEMENTS ET CORRELATION AVEC UN
ECHANTILLON TEMOIN

2-3-I : Prélèvement et analyse des échantillons

Les mesures de concentrations reposent ici sur le prélèvement et l'analyse d'un certain nombre d'échantillons de faible volume. On va être amené à extrapoler ces mesures à une masse importante d'eau écoulée. Il est donc indispensable :

- D'une part, lors du prélèvement, d'obtenir un échantillon représentatif de l'écoulement, donc d'utiliser des appareils qui perturbent le moins possible l'écoulement .
- D'autre part, de mesurer la concentration des échantillons avec une grande précision lors des analyses .

2-3-I-I : Les appareils de prélèvement .

De même que les moulinets pour la mesure des vitesses, tous les appareils de prélèvement sont intégrateurs dans le temps, si l'on considère que seuls les appareils qui piègent les eaux qu'ils contiennent par fermeture rapide de clapets, telle la sonde Collet, effectuent un prélèvement instantané. Ces appareils, de conception simple, ne seront pas décrits ici car ils sont surtout utilisés pour des prélèvements d'échantillons en vue d'analyses de qualité des eaux (analyses de salinité, analyses chimiques,...) .

Les prélèvements d'échantillons au sein de l'écoulement liquide peuvent être effectués de deux manières :

- Par immersion d'un "récipient" dont l'ouverture et la fermeture est commandée à partir de la surface .
- Par pompage : un tube de prise, relié par un tuyau à une pompe en surface, capte l'eau. L'échantillon ainsi pompé est directement refoulé dans des bouteilles .

Avant d'aborder l'étude de ces deux systèmes, il faut dire un mot sur les appareils à décantation ou à filtration qui se rapprochent plus, par leur principe, des nasses à prélèvement utilisées pour la mesure du charriage (cf  3 - 4) :

- Les bouteilles de Delft, mises au point en Hollande, sont utilisées dans le cas où l'on s'intéresse au transport en suspension des sables. L'appareil est immergé, l'eau n'est pas retenue, mais ne fait qu'y transiter suivant un circuit complexe qui, par ralentissement des vitesses, provoque la décantation des matériaux les plus grossiers .
- Des sacs filtrants intégrateurs peuvent être fixés en différents points de la section, mais ils ne retiennent pas les particules fines .

L'avantage de ces appareils est qu'on peut toujours recueillir une quantité appréciable de sédiments en jouant sur le temps d'immersion .

L'inconvénient est qu'ils sont sélectifs, donc ne permettent d'évaluer le débit solide en suspension que si celui-ci est composé principalement de matériaux grossiers .

2-3-I-I-I : Les échantillonneurs

Un des premiers appareils était le bathymètre - tachymètre de Glouchkoff, composé d'une vessie de trois litres sur laquelle est fixé le tube d'admission. Il n'y avait pas de commande d'ouverture à distance, le bec étant simplement orienté vers l'amont pour admettre l'eau, puis tourné vers l'aval pour stopper le prélèvement .

Les appareils utilisés actuellement sont profilés à la manière d'un saumon et munis d'ailettes comme ce dernier. Ils sont généralement suspendus, les plus légers pouvant être fixés au bout d'une perche. Divers systèmes permettent de commander l'admission à distance. Ils contiennent un récipient destiné à recevoir l'échantillon. L'appareil est remonté après chaque prélèvement. Le récipient est alors remplacé ou vidé, et l'appareil est prêt pour un nouveau prélèvement .

Certains de ces appareils sont conçus pour l'intégration sur une verticale, le procédé consiste alors à descendre ou à remonter l'échantillonneur à vitesse constante, le remplissage s'effectuant tout au long de la verticale. On obtient ainsi directement un échantillon représentatif de la concentration moyenne sur la verticale. Ce procédé est évidemment beaucoup plus rapide, mais la précision en est affectée; de plus, le système n'est pas du tout évident à mettre en pratique, nous verrons pourquoi dans le chapitre consacré à l'étude du jaugeage par intégration .

La condition essentielle à laquelle doivent obéir les appareils est de ne pas effectuer une sélection des particules au voisinage de l'admission, donc, les filets liquides doivent rester parallèles. Pour un appareil bien profilé, ce qui est généralement le cas, cette condition sera réalisée si la vitesse d'admission est très voisine de la vitesse du courant .

Certains appareils ne répondant pas à la condition ci-dessus sont encore employés en raison de leur robustesse et de leur simplicité, tel le saumon creux utilisé sur certains oueds d'Afrique du Nord : deux orifices permettent, l'un l'entrée de l'eau, l'autre l'évacuation de l'air. La commande d'ouverture et de fermeture se fait à distance par un système mécanique simple. Les saumons creux ne comportant pas ce dispositif sont utilisés pour l'intégration sur une verticale .

Les appareils les plus élaborés sont le turbidimètre Neyrpic en France et les différents Standard américains (fig. I4 et I5) .

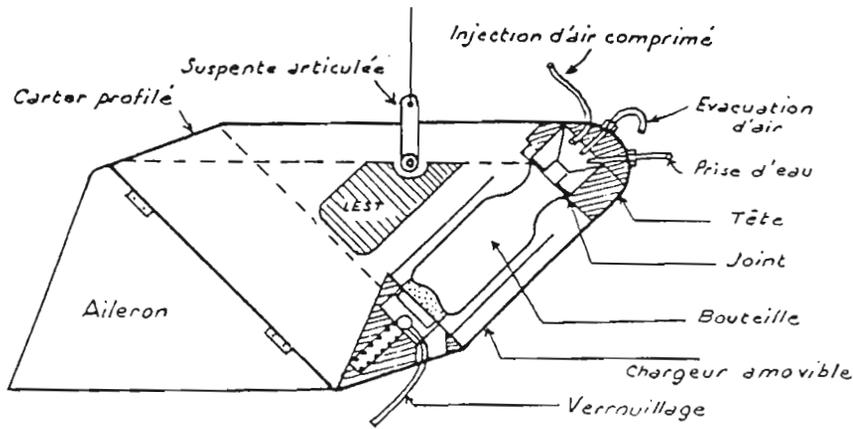
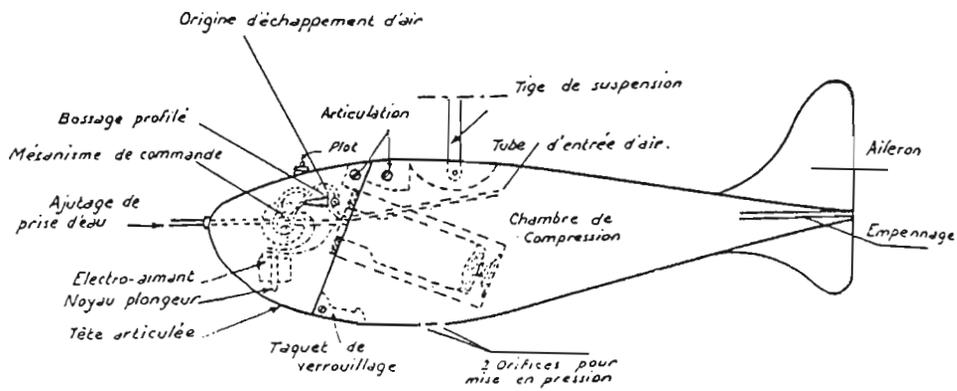
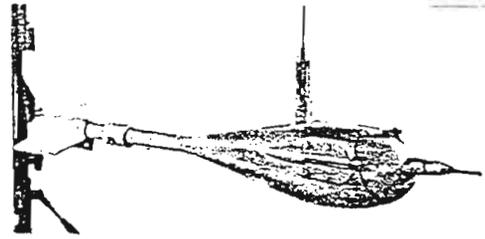


Figure I4
 Turbidisonde Meyrpic



US - P - 46

Figure I5

US - DH - 48 US - D - 49

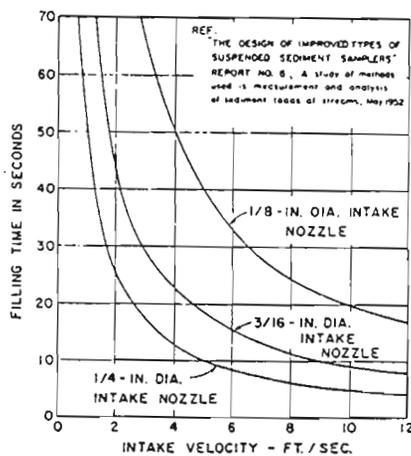
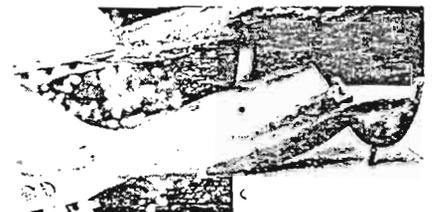
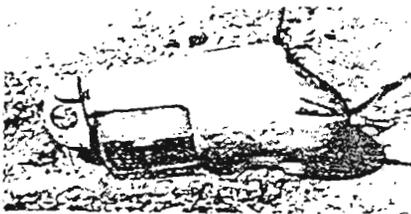


Figure I6 : Temps de remplissage

Ils contiennent une bouteille qui sera remplacée après chaque prélèvement. Un système de verrouillage rapide permet de changer la bouteille sans perte de temps. La contenance est de 0,8 litre pour la turbidisonde Neyrpic, les Standard utilisent des bouteilles de lait d'une pinte (0,57 litre).

L'appareil est relié par un tuyau à une bouteille d'air comprimé située en surface, pour la turbidisonde Neyrpic, la canalisation est incorporée au câble de suspension. Pendant la descente de l'appareil, l'air comprimé est envoyé dans la bouteille de prélèvement pour éviter toute pénétration d'eau. Une fois atteint le point de prélèvement, l'envoi d'air comprimé est stoppé, l'eau entre dans la bouteille, refoulant l'air dans la canalisation.

L'ajutage de prise d'eau est situé dans le nez de l'appareil. Cet ajutage est suffisamment long pour éliminer toute perturbation causée par la proximité de l'appareil. Différents systèmes créant une légère dépression dans la bouteille permettent de compenser la perte de charge due au ralentissement de l'eau dans l'ajutage. De cette façon, la vitesse d'entrée est sensiblement la même que celle du courant.

La turbidisonde Neyrpic pèse 90 kg, donc peut être utilisée pour de fortes vitesses. Elle permet des prélèvements jusqu'à 12 cm du fond.

Standard offre une gamme d'appareils très complète.

Le temps de prélèvement est lié à la vitesse du courant et au diamètre de l'ajutage. La figure I6 donne le temps de remplissage pour différents diamètres ($\frac{1}{8}$ in. = 3,2 mm ; $\frac{3}{16}$ in. = 4,7 mm ; $\frac{1}{4}$ in. = 7,3 mm).

Certains appareils sont plus spécialement conçus pour une utilisation par intégration, mais peuvent être utilisés pour des prélèvements ponctuels en adaptant un diamètre d'ajutage plus gros. Lors de prélèvements par intégration, on utilise des ajutages très fins, étant donné le temps plus long de prélèvement.

Les principaux modèles sont :

l'US-DH-48 : très léger (2kg), il est monté sur une perche.

On l'utilise exclusivement pour l'intégration sur de faibles profondeurs.

l'US-D-49 : "D" signifie Depth integrating. Il pèse 30 kg, mais un lest de 25 kg est adaptable pour des vitesses plus grandes.

Utilisé en mode suspendu évidemment, de même que

l'US-P-46 : "P" = Point integrating, d'un poids supérieur (45 kg).

Ces derniers appareils (Neyrpic et Standard) permettent de prélever des échantillons d'une représentativité de l'écoulement presque parfaite. Hélas, les échantillons sont de faible volume et l'erreur relative sur la détermination des concentrations en sera augmentée. Ils sont inutilisables pour de faibles concentrations. Notons d'autre part qu'on ne peut pas facilement adapter le poids suspendu aux différentes vitesses de courant .

2-3-I-I-2 : Prélèvements à la pompe

Ce mode de prélèvement a été mis au point par l'ORSTOM lors de ses études sur les cours d'eau peu chargés et transportant des éléments fins .

L'ORSTOM utilise un saumon sur lequel est boulonné l'ajutage, orienté parallèlement à l'axe du saumon. Un tuyau de caoutchouc est fixé à l'ajutage, l'autre extrémité du tuyau est reliée à une pompe Japy actionnée à la main. On peut aussi utiliser un montage sur perche .

En chaque point est prélevé un échantillon de 10 litres. Les récipients sont des bouteilles en verre ou des jerrycans en plastique, le niveau correspondant aux dix litres est repéré par un trait .

Le temps de prélèvement est lié à la cadence de pompage et au diamètre de l'ajutage. Pour un diamètre de 17 mm , un opérateur moyen effectue le prélèvement en 30 secondes, ce qui donne une vitesse moyenne dans l'ajutage de 1,5 m/s. Pour rendre la vitesse dans l'ajutage voisine de la vitesse du courant, il faudrait jouer sur la cadence de pompage, ce qui est difficilement réalisable .

De toute façon, les sédiments fins sont peu sensibles aux variations de vitesses. Pour les limons et argiles, les perturbations peuvent être importantes sans qu'il y ait un phénomène de sélection des particules; pour des particules plus grosses, et jusqu'à une certaine limite, on considère que le rapport entre la vitesse du courant et la vitesse de prélèvement ne doit pas excéder 2 , on s'efforcera alors d'ajuster grossièrement la cadence de pompage à la vitesse du courant .

Quoi qu'il en soit, l'importance des échantillons prélevés compense largement l'imperfection du prélèvement. Les prélèvements de 10 l. permettent lors de l'analyse de travailler sur des poids de sédiment acceptables, même pour de faibles concentrations. Une concentration de 50 g/ m³ donne un poids de 0,5 g les balances utilisées sont précises au mg , les pertes occasionnées par les manipulations n'altèrent que relativement peu la précision pour des quantités de cet ordre de grandeur .

Le prélèvement de volumes importants présente quelques inconvénients :

- Le jaugeage se fait le plus souvent à partir d'embarcations dans lesquelles on ne peut placer qu'une douzaine de bouteilles, il est donc rare qu'on puisse effectuer un jaugeage complet sans avoir à retourner sur la rive .
- Les opérations de dépouillement s'en trouvent quelque peu allongées, mais nous verrons que lors de l'analyse, les prélèvements sont dans un premier temps décantés et siphonnés de façon à en réduire le volume. Ces opérations peuvent être effectuées sur place, ce qui résout le problème du transport et du stockage .

De toute façon, ces inconvénients sont liés à la nature même du transport, donc ne remettent absolument pas en cause la méthode, qui, d'ailleurs, semble peu susceptible d'améliorations .

Un grand avantage du prélèvement à la pompe est que, lors du jaugeage, il n'est pas nécessaire de remonter le système après chaque prélèvement, d'où un gain de temps appréciable. D'autre part, on peut facilement changer de saumon suivant la vitesse du courant .

En conclusion, le prélèvement par pompage est le seul procédé valable pour les cours d'eau définis ci-dessus .

2-3-I-2 : Analyse des échantillons

Les échantillons prélevés peuvent faire l'objet d'un certain nombre d'analyses : analyse minéralogique; analyse chimique (teneur en carbone, azote,...); étude de salinité par mesure de résistivité .

Mais ce qui nous importe ici est d'obtenir le poids de matériaux^{contenus} dans l'échantillon, et accessoirement, de déterminer la granulométrie des éléments transportés .

D'une manière générale, on distingue cinq méthodes :

- filtration ou évaporation, puis pesée du résidu sec
- mesure du volume de matériaux décantés
- mesure de la densité de la suspension
- mesure de la turbidité de la suspension par absorption de lumière
- mesure de l'absorption d'un rayonnement radioactif par la suspension .

La pesée du résidu sec est, bien entendu, la seule méthode qui permette d'accéder directement à la concentration. Toutes les autres méthodes mesurent une grandeur qui est liée au poids de sédiments, elles nécessitent donc un étalonnage par pesée .

2-3-I-2-I : Pesée

2-3-I-2-I-I : Opérations préliminaires

Nous avons vu que, dans le cas des volumes importants, on a intérêt à procéder préalablement à la décantation et au siphonnage .

- Décantation : les sédiments fins sont très lents à se déposer. On accélère le processus de décantation par adjonction d'acide chlorhydrique ou de sulfate d'alumine .
- Siphonnage : Après 24 heures environ, on va pouvoir enlever une grande partie de l'eau par siphonnage à l'aide d'un tube coudé vers le haut. Cette opération est très délicate car la moindre turbulence créée par l'introduction du tube, ou par aspiration lors du siphonnage, risque de remettre des éléments en suspension. Un volume initial de 10 litres peut être ainsi ramené à 0,3 ou 0,5 litre .

2-3-I-2-I-2 : Obtention d'un résidu sec

Deux méthodes sont possibles :

- La filtration : C'est la méthode la plus couramment employée en raison de sa rapidité et de sa simplicité. L'échantillon est filtré, puis séché, soit au dessiccateur, soit à l'étuve à 105° C. Le dessiccateur est un plateau sur lequel sont placés des cristaux de silicagène qui absorbent l'humidité; une cloche recouvrant le plateau permet d'éviter toute pénétration extérieure d'humidité. Le séchage à l'étuve est évidemment beaucoup plus rapide. Les filtres les plus fins permettent de retenir les particules d'un calibre supérieur à 2 μ , donc les particules perdues par filtration sont rares .
- L'évaporation : L'échantillon est transvasé dans un bécher qui est placé sur une plaque chauffante pour évaporation, puis séché au dessiccateur ou à l'étuve. Ce procédé est long, de plus, à capacité égale, on met beaucoup moins de béchers que de filtres dans l'étuve ou le dessiccateur, ce qui

peut augmenter encore le temps d'analyse. D'autre part, le transvasement peut entraîner une erreur par défaut, les particules ayant tendance à adhérer aux parois de la bouteille lors du transvasement .

2-3-I-2-I-3 : Pesée du résidu

On a grand intérêt à peser les résidus secs sur place où l'on peut disposer assez facilement de balances d'une précision de 1 à 5 mg. Quand on ne possède pas une balance suffisamment précise, on peut expédier les résidus vers un laboratoire d'analyse, mais cette méthode est à utiliser en dernier recours du fait des pertes possibles dans le transport .

Des précautions doivent être prises pour éviter les erreurs systématiques:

- Le résidu sec dans une atmosphère humide a tendance à absorber l'humidité, donc son poids augmente. Si on utilise des béchers, le problème ne se pose pas car on peut toujours les boucher .
- Un corps posé chaud sur le plateau d'une balance crée au-dessus de lui une dépression qui le fait paraître moins lourd, on doit donc laisser refroidir le bécher ou le filtre à sa sortie de l'étuve avant de le peser .

Dans le cas où les filtres sont séchés à l'étuve, la meilleure façon de procéder pour éliminer ces deux causes d'erreur est de placer les filtres dans un dessiccateur à leur sortie de l'étuve. Quand ils seront à la température ambiante, on les pèsera immédiatement .

2-3-I-2-I-4 : Conclusions

Lors du jaugeage, ainsi que lors des différentes manipulations, il est indispensable de procéder à une identification soigneuse des échantillons. Bouteilles, béchers, filtres seront datés et numérotés de façon à éviter tout risque de confusion .

La précision à rechercher dans l'analyse dépendra largement de la concentration des échantillons. Ainsi, même en prenant toutes les précautions voulues, l'erreur relative peut atteindre 20 % pour les très faibles concentrations ($C < 20g / m^3$). Pour de fortes concentrations, les opérations seront très simplifiées sans que la précision relative en soit notablement altérée .

2-3-I-2-2 : mesure du volume des matériaux décantés

L'échantillon est transvasé dans une éprouvette graduée. La lecture du

volume se fait toujours au bout du même temps de décantation (48 heures par exemple) .

Plus les particules seront fines et plus le volume occupé par un même poids de matériaux sera important (effet de tassement), et susceptible de fluctuations. D'autre part, la présence de matériaux fins rend la limite entre eau claire et matériaux décantés plus floue, ce qui gêne considérablement la lecture. La méthode est donc essentiellement applicable à des transports de sables.

Dans ces conditions, pour une même station, et sous réserve que la composition granulométrique des matériaux transportés varie peu d'une crue à l'autre, on peut établir une corrélation entre volume mesuré et poids des matériaux contenus dans l'échantillon .

2-3-I-2-3 : Mesure de la densité

L'analyse des échantillons par ce procédé a donné de mauvais résultats et son utilisation semble être abandonnée .

Signalons cependant que les densimètres industriels, qui permettent la mesure en continu de la concentration, sont très souvent utilisés pour contrôler la concentration des eaux en aval des barrages lors des opérations de dévasement .

2-3-I-2-4 : Mesures de turbidité - Mesures par radioactivité

Ces mesures sont utilisées sur échantillons dans le cadre d'un étalonnage en laboratoire des appareils de mesure en continu, soit de turbidité (cf § 2-4-4), soit par radioactivité (cf § 2-4-5). Nous n'avons pas eu connaissance de l'emploi systématique de ces procédés à seule fin d'analyse des échantillons .

2-3-I-2-5 : Analyse granulométrique

2-3-I-2-5-I : Méthodologie

On cherche à définir la courbe granulométrique des éléments transportés à partir du résidu sec. Lorsqu'on ne dispose pas d'un résidu d'importance suffisante, on peut effectuer l'analyse sur un mélange de plusieurs échantillons .

On procède de la même manière qu'en pédologie, pour l'analyse granulométrique des sols :

-- Les teneurs en sables ($d > 60 \mu$) sont déterminées par tamisage des différents diamètres (sables grossiers, moyens et fins) .

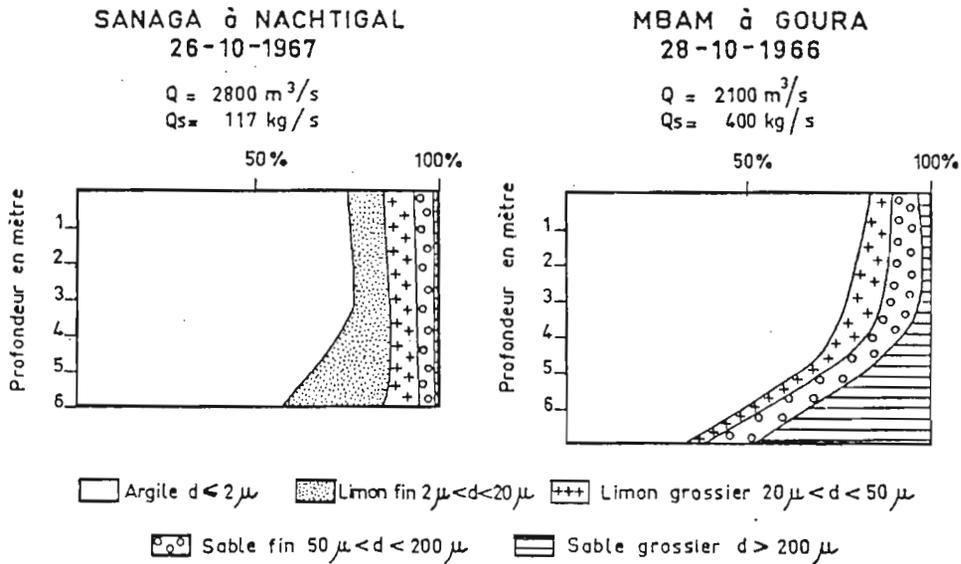
— Les teneurs en limons et argiles sont déterminées par des méthodes basées sur la loi de Stokes .

2-3-I-2-5-2 : Répartition granulométrique suivant la profondeur

Si la concentration est suffisante, l'analyse peut porter sur les résidus de chaque prélèvement d'une même verticale, on pourra ainsi déterminer la répartition granulométrique des éléments transportés en fonction de la profondeur.

Dans le cas de faibles concentrations, on peut, par le procédé de pompage, effectuer des prélèvements de plus grands volumes .

Exemples de répartition sur une verticale (fig. I7): La Sanaga qui, à la station de Nachtigal, présente un régime plus turbulent que le Mbam à Goura.



— Distributions granulométriques.

Fig. I7

2-3-2 : Pratique du jaugeage

2-3-2-I : Choix de la section

La plupart du temps, les stations existantes déjà étalonnées pour les débits liquides sont utilisées pour la mesure des débits solides. Cependant, pour les jaugeages de prélèvements, il convient d'éviter les sections où le

phénomène de transport peut subir une influence localisée (zones de dépôts importantes, méandre d'alluvionnement, berges très érodables en amont de la section,...), ceci, bien sûr, dans le cas où l'on cherche à évaluer les quantités de terres érodées .

2-3-2-2 : Densité et répartition des prélèvements

Une opération de prélèvement est plus longue qu'une mesure de vitesse au moulinet, mais ce sont surtout les problèmes de transport, de stockage et la longueur des analyses qui obligent à réduire au minimum le nombre de points de prélèvement. Dans le cas d'un jaugeage complet, on adopte toujours une densité de prélèvements très inférieure à la densité des mesures de vitesses .

Le calcul du débit solide total dans la section se fera par interpolation des concentrations mesurées aux points de mesure des vitesses. Dans l'intérêt du calcul, il est donc très souhaitable que les verticales des prélèvements coïncident avec les verticales des vitesses .

2-3-2-2-I : Densité des prélèvements

Des critères de répartition des concentrations dans la section, étudiés au début de ce chapitre, on peut déduire que, théoriquement :

- Si l'écoulement est turbulent, on devra multiplier le nombre de verticales, on pourra se contenter de peu de prélèvements sur une même verticale .
- Si l'écoulement est calme sur une grande longueur en amont de la section, on prendra suffisamment de points sur un même verticale pour préciser la répartition des concentrations. Les verticales pourront être plus espacées .

En pratique, on se contente souvent de faire 2 à 5 prélèvements régulièrement répartis sur une verticale, le nombre de points variant avec la profondeur de la verticale .

L'espacement des verticales peut aller jusqu'à 50 mètres pour les grands fleuves (cf fig. 6). Pour les rivières moyennes, on effectue de 4 à 6 verticales. Nous verrons que pour les cours d'eau à variations rapides de niveau, on peut être limité dans le temps, la densité des prélèvements est alors nettement plus faible, les mesures de vitesses sont supprimées .

Mais, en raison du caractère assez imprévisible de la distribution des

Concentrations dans une section, on aura grand intérêt, si c'est possible, à effectuer au moins une fois un jaugeage de prélèvements plus dense de façon à préciser cette distribution .

A la station de Goura, sur le Mbam, un jaugeage de 40 prélèvements répartis sur 11 verticales (alors qu'un jaugeage normal ne comportait que 20 prélèvements sur 6 verticales) a montré après calculs que l'erreur relative que l'on commettait sur le débit solide total dans la section en utilisant un jaugeage normal était de 5 %, ce qui ne justifie pas d'adopter une densité de prélèvements plus importante .

2-3-2-2-2 : Mesures près du fond et des berges

Il convient de ne pas donner une importance trop grande aux concentrations à leur voisinage .

-- A moins qu'on ne cherche à préciser l'influence de la saltation au voisinage du fond par des mesures très rapprochées, il faut absolument éviter de faire la dernière mesure très près du fond. En effet, du fait des variations rapides de concentration au voisinage du fond, l'interpolation entre les deux dernières mesures de la verticale pourrait amener à surestimer notablement l'influence des concentrations de fond lors du calcul. A titre indicatif, les derniers prélèvements pourront être faits à 50 cm du fond, les premiers sont faits, en général, à 50 cm de la surface .

-- Pour les mêmes raisons, on n'a pas intérêt à trop se rapprocher des berges. Toujours à titre indicatif, la distance entre la berge et la verticale la plus proche sera égale à l'équidistance des verticales, ou à la moitié de cette valeur .

2-3-2-3 : Procédés de jaugeage

2-3-2-3-I : Jaugeage à partir d'une embarcation

C'est le procédé le plus couramment utilisé dans le cas où les vitesses de courant le permettent .

2-3-2-3-I-I : Embarcations

Pour les vitesses de courant assez importantes ou les sections larges, on utilise des canots pneumatiques type Zodiac équipés d'un moteur .

Pour les grands fleuves, on peut utiliser des portières réalisées avec deux canots accouplés .

Pour les sections moyennes à faibles vitesses de courants, qui permettent l'emploi d'un matériel de jaugeage léger, on utilise des embarcations légères mais suffisamment stables (canoës pneumatiques, dinghys, pirogues,...) .

Le treuil peut être monté sur le côté ou à l'avant de l'embarcation. Sur les embarcations légères, il est le plus souvent monté à l'avant afin de conserver une bonne stabilité (fig. 18) .

2-3-2-3-I-2 : Jaugeage au câble

Un câble gradué est tendu en travers de la section, il servira à la fois à se positionner dans la largeur et à maintenir l'embarcation pendant les mesures .

Le jaugeage lui-même ne pose pas de problème, mais l'installation du câble est une opération très délicate. En principe, le jaugeage au câble ne peut être pratiqué pour des largeurs supérieures à 300 mètres. On utilise un câble léger ($\phi = 4$ mm), l'embarcation doit être munie d'un moteur suffisamment puissant pour pouvoir progresser vers l'amont et ainsi compenser la force qu'exerce le courant sur le câble. On peut opérer sans moteur en déroulant dans un premier temps le câble le long de la rive, mais les risques d'accrochage aux débris de fond lors du passage du câble en seront augmentés .

2-3-2-3-I-3 : Jaugeage au cercle

Lorsqu'on ne peut pas utiliser le câble, on se positionne au cercle hydrographique. Cet appareil est basé sur le même principe que le sextant. Il permet de mesurer l'angle sous lequel on voit deux repères par superposition de leurs images à l'aide d'un système à double réflexion. L'angle est lu à la minute. Certains modèles ne permettent de mesurer que des angles inférieurs à 150° , il est préférable d'utiliser des modèles à 180° (fig. 19) grâce auxquels on peut contrôler l'alignement .

Pour le mode opératoire, on se reportera à la figure 20. Les berges et les points A,B,C,D,E,F,G, matérialisés par des jalons auront fait préalablement l'objet d'un levé .

Les jalons A,B,C sont alignés, le jaugeage s'effectue dans le sens C - A . L'espacement des verticales doit être estimé puisqu'elles ne sont pas matérialisées dans la section. On se place en amont du point à jauger, l'ancre est

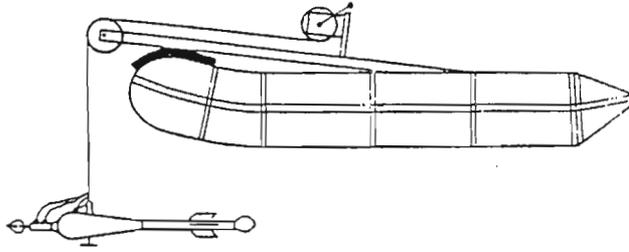


Fig. 18.

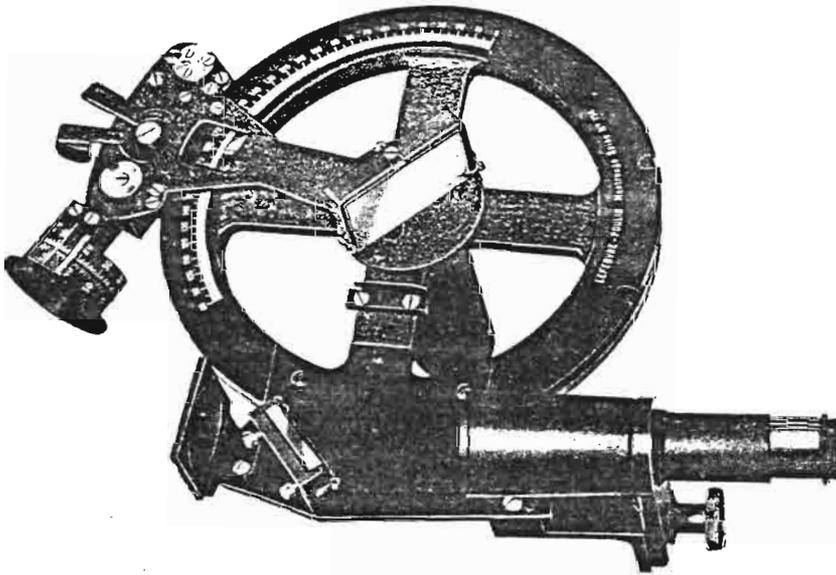


Fig. 19 : Cercle hydrographique

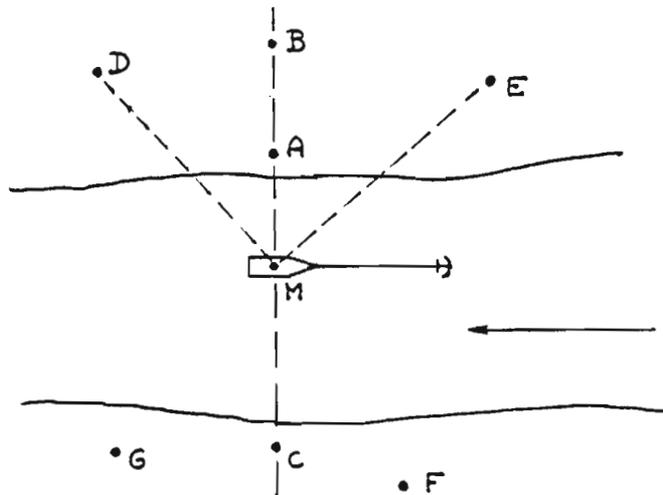


Fig. 20 : Jaugeage au cercle

descendue, lorsqu'on pense qu'elle a touché le fond, on laisse dériver l'embarcation jusqu'à l'alignement AB . On peut alors procéder au jaugeage .

Afin que les verticales de prélèvement coïncident avec les verticales des vitesses, on a grand intérêt, une fois en place, et même si le gain de temps ne le justifie pas, à effectuer les prélèvements juste après les mesures de vitesses sur les verticales où l'on a choisi de faire les deux types de mesure (une verticale sur deux par exemple) .

Pour se positionner, on vérifie d'abord au cercle que l'angle \widehat{AMC} est bien égal à 180° . Certains auteurs préconisent la mesure de plusieurs angles, nous pensons que la mesure de deux angles (\widehat{DMA} et \widehat{AME} par exemple) est suffisante. En effet, étant donné la précision recherchée ici, il ne s'agit pas d'effectuer des compensations, il suffit d'avoir un contrôle. En l'occurrence, le contrôle se fait par alignement des points A, M, C .

Deux des points D, E, F, G peuvent être utilisés suivant la position du point M , de façon à ce que les deux arcs capables se recoupent suivant un angle voisin de l'angle droit. Notons à ce propos que l'emploi de quatre points n'est pas impératif .

2-3-2-3-2 : Jaugeage aérien

Ce procédé a l'avantage, par rapport au jaugeage à partir d'une embarcation, de permettre d'opérer à peu près dans toutes les conditions, si ce n'est par des jaugeages complets, du moins par des prélèvements de surface. Le positionnement ne pose ici aucun problème .

2-3-2-3-2-I : Jaugeage à partir d'un pont

Evidemment, le procédé est tentant, mais il est rarement praticable. Il faut que le pont se situe au niveau d'une section correspondant aux critères de bonne station, en particulier, il ne doit pas comporter de piles dans l'eau qui perturbent l'écoulement; il doit être perpendiculaire au courant; il ne doit pas être trop haut au-dessus du plan d'eau (dérive importante pour les grandes vitesses, mouvement pendulaire qui gêne les mesures,...). Ces remarques sont valables pour le jaugeage liquide et pour le jaugeage solide. On voit que toutes ces conditions ne sont pas souvent réunies .

Signalons ici, car nous ne reviendrons pas sur ce sujet, que les ponts des petites rivières sont fréquemment utilisés pour les mesures expédiées de

transport solide. Le prélèvement peut se faire aisément au centre du courant. D'autre part, les piles de pont servent parfois de support à une échelle limnimétrique déjà étalonnée, dans ce cas, le débit liquide est connu simultanément au prélèvement .

Pour des rivières à montées de crues rapides et imprévisibles, la méthode est à exclure pour des raisons évidentes .

2-3-2-3-2-2 : Jaugeage à partir d'une passerelle

Pour les petits cours d'eau, on construit à peu de frais une passerelle qui peut même consister en une simple planche dans le cas de sections aménagées (constructions pour canaliser l'écoulement, fosses à sédiments,...). Le jaugeage se fait à la perche .

Pour des rivières pas trop larges, la construction d'une passerelle peut se justifier .

2-3-2-3-2-3 : Transporteurs aériens

Ce sont des téléphériques. On les utilise pour des rivières assez larges et dangereuses à pratiquer en bateau. Le plus long construit par l'ORSTOM a une portée de 425 mètres. Leur coût est élevé .

L'emploi de nacelles suspendues est à déconseiller vu les dangers encourus par l'opérateur.

Les transporteurs à mouvement double comportent deux treuils permettant de commander les déplacements horizontaux et verticaux à partir de la berge (fig. 2I). Pour les mesures au moulinet, le câble est électroporteur. Pour les prélèvements, le procédé perd de son intérêt étant donné qu'on est obligé de ramener l'échantillonneur sur la berge après chaque prélèvement, on opère donc toujours par intégration sur les verticales .

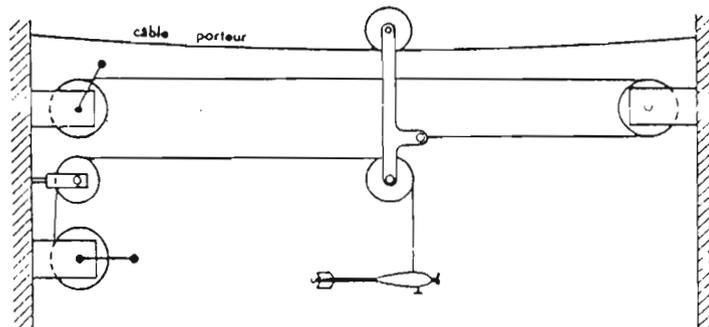


Schéma d'installation d'un transporteur aérien

Fig. 2I

2-3-2-3-3 : Jaugeage à gué

Les vitesses de courant doivent être faibles. Les perturbations causées par l'opérateur, si elles sont tolérables pour les mesures au moulinet, sont rarement admissibles pour les prélèvements. On opère face à l'amont évidemment. On peut se positionner en déroulant une cordelette dont une extrémité est fixée à la berge .

2-3-3 : Calcul de la concentration moyenne réelle instantanée à partir des jaugeages

2-3-3-I : Calcul à partir du jaugeage complet

On a effectué successivement un jaugeage des vitesses et un jaugeage des prélèvements. On se trouve donc ici devant une situation où l'on a un nombre beaucoup plus important de mesures de vitesses que de mesures de concentrations ce dont on va tirer parti en ramenant, par une double interpolation graphique, les concentrations aux points de mesure des vitesses .

On obtiendra ainsi un couple (c, v) en chaque point de mesure de vitesse; le calcul du débit solide total sur la section, qui permettra d'accéder à la concentration moyenne, peut se faire alors par deux méthodes, identiques aux méthodes utilisées pour calculer le débit liquide .

2-3-3-I-I : Calcul des concentrations aux points de mesure des vitesses .

- Figure 22 : On trace, pour chaque verticale de prélèvement, la courbe des variations de concentration en fonction de la profondeur. A l'aide de ces courbes, on interpole les concentrations à des cotes de profondeurs choisies (les points interpolés sont marqués par des croix) .
- Figure 23 : Sur ce graphique, on a reporté, en abscisses les positions des verticales, en ordonnées les valeurs des concentrations interpolées. On trace les courbes de variation de concentration à des profondeurs données, correspondant aux profondeurs pour lesquelles on a effectué l'interpolation. On en déduit les valeurs des concentrations aux différentes profondeurs pour les verticales où il n'a été effectué que des mesures de vitesses, par simple lecture au droit de ces verticales (Exemple : la verticale à l'abscisse 47 sur la figure) .

Ainsi, en tout point de mesure de vitesse, on obtient un couple (c,v)

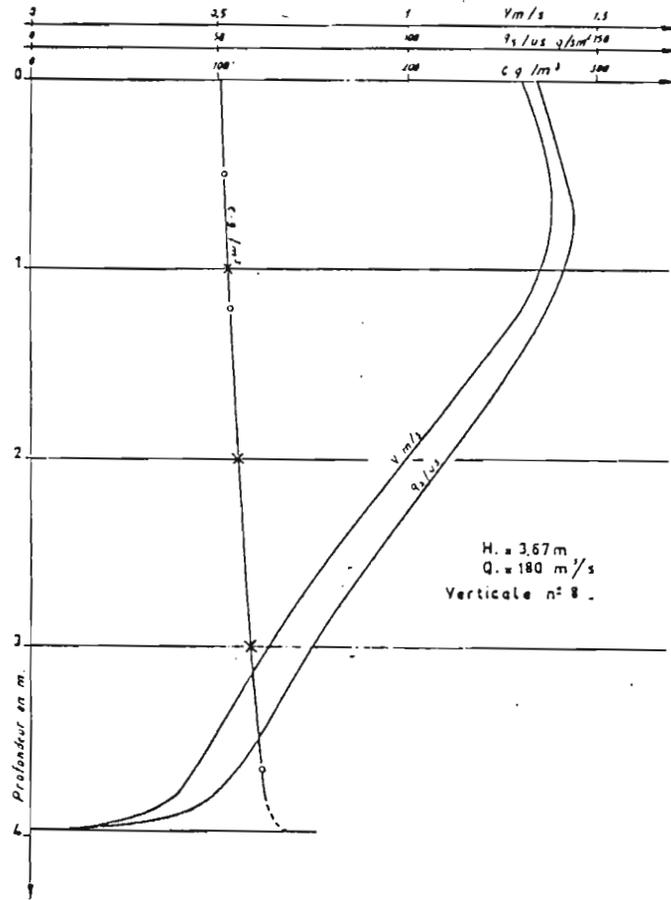


Fig. 22

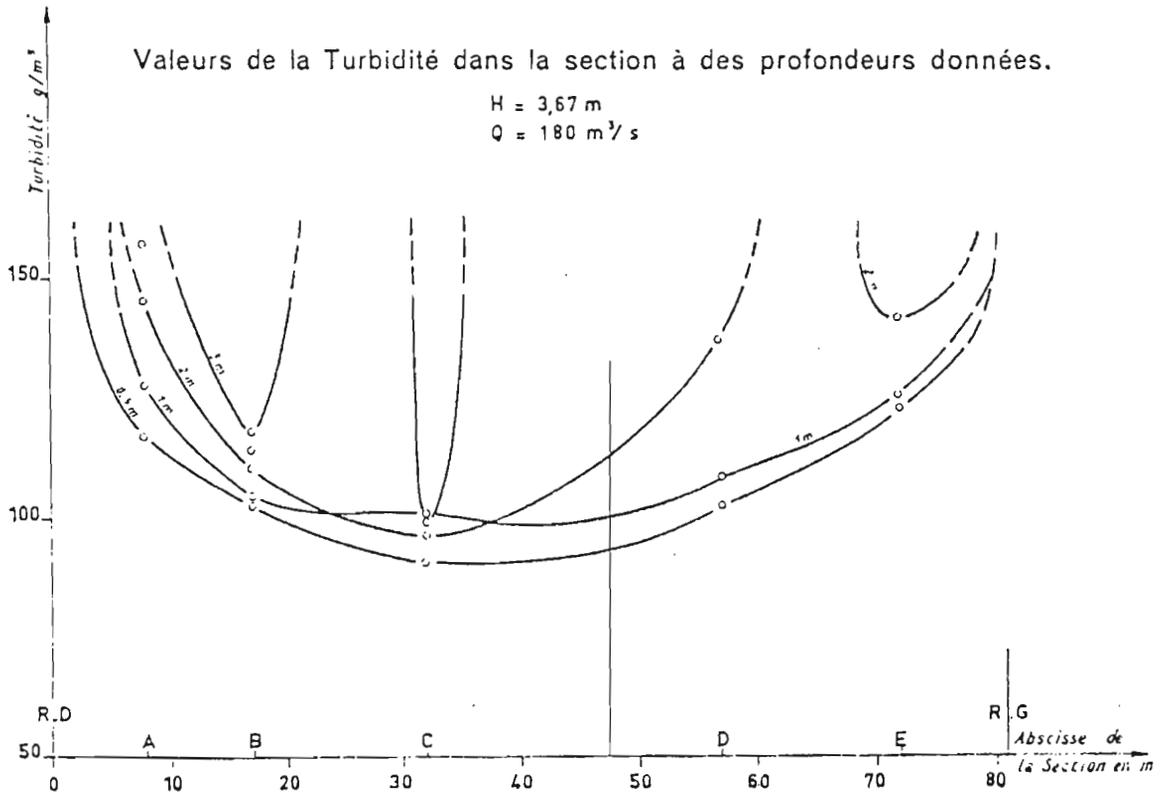


Fig. 23

dont le produit $c.v$ en $g / s / m^2$ représente le débit solide par unité de surface qu'on notera $q_s / u.s.$

2-3-3-I-2 : Calcul du débit solide

— Méthode des paraboles appliquée au calcul du débit solide : Pour chaque verticale, on trace la courbe de variation des $q_s / u.s.$ en fonction de la profondeur (fig. 22). Le planimétrage de cette courbe donne le débit solide par unité de largeur, noté $q_s / u.l.$ en $g / s / m$ de section.

On porte ensuite sur un nouveau graphique (fig. 24) , en abscisses, les positions des verticales, en ordonnées, les valeurs correspondantes de $q_s / u.l.$. On trace la courbe dont l'aire, obtenue par planimétrage, représente le débit solide total sur la section .

En effet, on a :

$$Q_s = \int_0^L \int_0^P q_s / u.s. dp dl$$

et $\int_0^P q_s / u.s. dp = q_s / u.l.$

(planimétrage des "paraboles")

donc : $Q_s = \int_0^L q_s / u.l. dl$

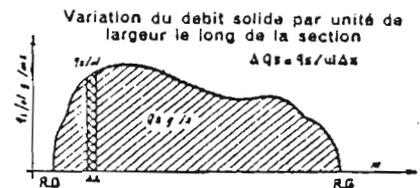


Fig. 24

— Méthode des isotaches appliquée au calcul du débit solide (fig. 25) :

On trace les courbes d'égal débit solide par unité de surface (équivalentes aux isotaches des vitesses). On planimètre les surfaces cumulées, limitées par les courbes, par valeurs croissantes de $q_s / u.s.$.

Sur un nouveau graphique, on porte en abscisses les superficies et en ordonnées les valeurs correspondantes des $q_s / u.s.$. Le planimétrage de la surface limitée par la courbe obtenue représente le débit solide total Q_s .

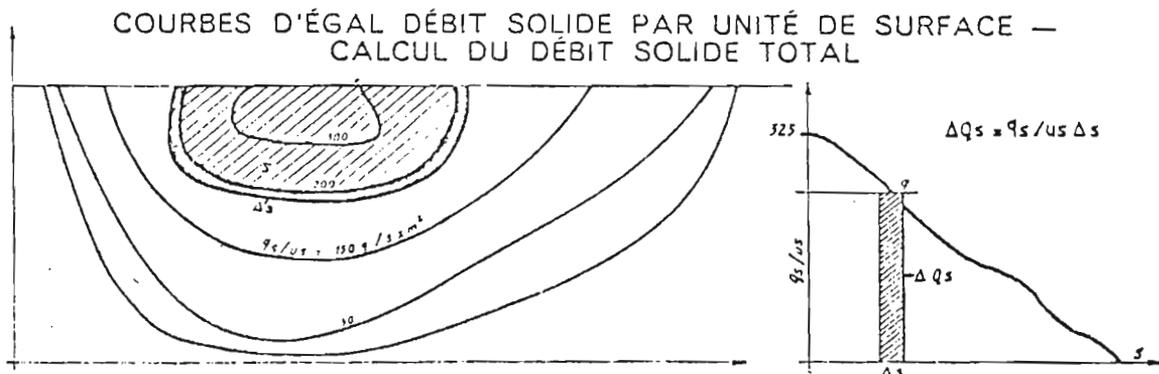


Fig. 25

2-3-3-I-3 : Concentration moyenne

Le débit liquide Q_1 est calculé comme nous l'avons indiqué au § 2-2-5.

On obtient ainsi
$$C_m = \frac{Q_s}{Q_1}$$

L'inconvénient de cette méthode est que les calculs sont assez longs comme on peut le voir, mais c'est la seule façon d'obtenir une valeur exacte de la concentration moyenne .

2-3-3-2 : Moyenne arithmétique des concentrations .

Une méthode de calcul simple consiste à estimer la concentration moyenne égale à la moyenne arithmétique C_a des concentrations des échantillons,

on aura alors : $Q_s = C_a Q_1$

Mais cette méthode ne tient pas compte de la répartition des vitesses dans la section puisque les concentrations ne sont plus pondérées par les vitesses. On ne peut mieux exprimer les conséquences de ceci qu'en citant Colombani :

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

La répartition des prélèvements est à prendre en considération : la moyenne arithmétique sera d'autant plus forte que les prélèvements auront été effectués plus près du fond, ce qui ne veut pas dire qu'on approchera mieux la concentration moyenne en effectuant des mesures assez loin du fond, on introduirait plutôt une imprécision .

Quand on a pu effectuer des jaugeages complets, c'est à dire en général pour les grandes rivières à montées de crues lentes, il est facile de comparer C_m à C_a . Plusieurs chercheurs de l'ORSTOM ont donné les résultats de ces comparaisons pour les grands cours d'eau intertropicaux, caractérisés par de faibles concentrations ($c < 500 \text{ g} / \text{m}^3$). Tous confirment que l'on surestime la concentration moyenne .

Colombani	(Togo et Dahomey)	+ 2 à 3 %
Carré	(Tchad)	+ 7 %
Nouvelot	(Cameroun)	+ 4 à 5 %

Remarquons qu'on obtiendrait la même erreur relative en raisonnant sur les débits solides .

Pour les cours d'eau d'importance plus modeste, les variations rapides de niveau ne laissent généralement pas le temps d'effectuer un jaugeage de vitesses avant le jaugeage de prélèvements en périodes de crues. On doit se contenter de la moyenne arithmétique des concentrations. Dans ce genre de crues, la turbulence crée une meilleure homogénéité verticale des concentrations, ce qui diminue l'erreur introduite par l'utilisation de C_a . Le débit liquide est calculé par la courbe de tarage, et la précision sur le débit solide est liée aussi à la stabilité de cette courbe.

Si les cotes d'eau varient très rapidement (le temps de montée de crue peut parfois être inférieur à une heure), on est amené à accélérer les opérations en adoptant une densité de prélèvements plus faible, la règle générale étant qu'il vaut mieux effectuer des mesures complètes bien que peu nombreuses plutôt que des observations plus précises, mais pendant lesquelles le niveau de l'eau est susceptible de varier. Une bonne connaissance du régime du cours d'eau permettra d'adopter la densité appropriée.

2-3-3-3 : Jaugeage de surface ou jaugeage partiel

Il consiste à effectuer des prélèvements uniquement en surface au niveau des verticales qui ont été utilisées pour le jaugeage complet. Le nombre de verticales utilisées peut varier de trois à toutes les verticales.

Les prélèvements de surface se font dans les mêmes conditions que lors du jaugeage complet, c'est à dire, par exemple, 50 cm au-dessous de la surface et avec le même matériel de prélèvement. C'est pour cette raison que l'opération est appelée jaugeage.

Pour ces prélèvements, on fait la moyenne des concentrations (C_p). Remarquons qu'en plus de la rapidité du jaugeage, l'analyse s'en trouvera simplifiée, les prélèvements pouvant être mélangés pour faire l'objet d'une analyse unique.

Le but est ici d'accéder à la concentration moyenne à partir du seul jaugeage de surface. Il faut pour cela avoir effectué quelques jaugeages complets au cours de la période d'observation. Pour chaque jaugeage complet, on calcule C_m pondéré par les vitesses, et C_p en ne tenant compte que des échantillons concernés. A l'aide des couples (C_m , C_p) ainsi obtenus, on pourra facilement établir une corrélation entre C_m et C_p . En portant en abscisses les valeurs de C_p , et en ordonnées les valeurs de C_m , on obtiendra une série de points se distribuant sensiblement autour d'une droite. La relation est alors recherchée en calculant la droite moyenne, ou droite de corrélation, qui minimise

la somme des carrés des distances des points à cette droite. Les jaugeages partiels pourront alors être revalorisés par la droite de corrélation. C'est la méthode qui a été utilisée pour la Sanaga, dont nous détaillerons l'étude des transports solides au § 2-3-5 .

Sauf cas exceptionnel, C_p est toujours inférieur à C_m . La corrélation est généralement bonne (faible dispersion des points autour de la droite) si le brassage est bon dans la section .

Remarques :

- Il semble imprudent de descendre en dessous de trois verticales, on risquerait d'ignorer les dissymétries du cours d'eau et la corrélation s'en ressentirait .
- On utilise des points en surface, pour leur commodité de prélèvement, mais le jaugeage partiel pourrait porter sur d'autres points bien choisis .
- Nous avons raisonné sur des jaugeages complets, mais la méthode est parfaitement applicable à de simples jaugeages de prélèvements en comparant C_a et C_p .

2-3-3-4 : Jaugeage par intégration

2-3-3-4-I : Principe

Les U S Samplers type DH-48 et D-49 sont spécialement étudiés pour ce mode de prélèvement. L'échantillonneur est descendu jusqu'au point le plus bas de la verticale. L'envoi d'air comprimé est stoppé, puis l'appareil est remonté à vitesse constante le long de la verticale. Comme nous l'avons vu au § 2-3-I-I-I , la vitesse de remplissage est proportionnelle à la vitesse du courant. On obtient donc un échantillon moyen pondéré par la vitesse, de concentration C_i ; le débit solide par unité de largeur est :

$$q_s / u.l. = C_i \cdot q_l / u.l.$$

avec $q_l / u.l. = \text{débit liquide par unité de largeur} = \int_0^P v dp$

L'opération est répétée sur les autres verticales. Pour passer au débit solide total, on est ramené à la seconde intégration de la méthode des paraboles appliquée au débit solide puisqu'on connaît déjà $q_s / u.l.$.

Le débit liquide par unité de largeur peut être déterminé de deux façons :

- par des mesures ponctuelles de vitesses : la parabole des vitesses est tracée pour la verticale, son planimétrage donne $q_1 / u.l.$
- par la méthode du jaugeage au moulinet par intégration sur une verticale. Le principe est le même que pour le prélèvement : le moulinet est descendu à vitesse constante. On obtient la vitesse moyenne du courant v_m sur la verticale par la formule de tarage :

$$v_m = a \cdot n + b$$

avec $n = N / T$ en tours / s

N = nombre de tours enregistrés pendant la descente

T = temps de descente

Notons que la valeur obtenue est indépendante de la vitesse de descente de l'appareil .

Et enfin, $q_1 / u.l. = v_m \cdot P$

P = profondeur de la verticale

2-3-3-4-2 : Remarques

- Théoriquement, on peut procéder à l'intégration indifféremment en descendant ou en remontant le moulinet, mais, dans la pratique, il est difficile d'obtenir une vitesse de remontée constante. On opère donc toujours en descendant le moulinet, soit en laissant filer le câble, soit en utilisant un treuil muni d'un régulateur à palettes .
- Pour le prélèvement par intégration, on doit procéder en remontant l'échantillonneur à partir du fond. Si l'on dispose d'un contacteur de fond, cela permet de se positionner exactement à l'endroit choisi comme point de départ de la verticale .
Si on utilise un saumon creux, ou tout autre dispositif ne comportant pas de commande d'ouverture à distance, l'appareil sera descendu, puis remonté à vitesse constante. Ce procédé nous semble mauvais car la vitesse n'est plus constante au voisinage du changement de sens, donc le point le plus bas fait l'objet d'un prélèvement plus important .
- S'il n'a pas été procédé à des mesures de vitesses, ce qui est le plus souvent le cas, on peut obtenir le débit solide total en multipliant la moyenne arithmétique des C_i par le débit liquide total. L'erreur introduite ici est beaucoup moins importante que pour les prélèvements ponctuels puisque les concentrations sont déjà pondérées par les vitesses

sur les verticales .

2-3-3-4-3 : Critique de la méthode

En ce qui concerne le jaugeage au moulinet, la vitesse de rotation de l'hélice est influencée par la vitesse de descente qui engendre une résistance déséquilibrant l'appareil; une composante verticale se crée, qui a tendance à surestimer la vitesse. Ce système est donc difficilement utilisable pour de fortes vitesses de courant, même en adoptant une vitesse de descente très faible. On considère que 5 cm / s est une vitesse de descente moyenne. Signalons quand même qu'il existe des hélices autocomposantes compensant automatiquement la résistance verticale .

Pour le prélèvement par intégration, les problèmes sont les mêmes : le déséquilibre dû à la vitesse de remontée influe sur l'orientation de l'ajutage qui n'est plus parallèle aux lignes de courant . Mais ici, on ne peut diminuer à souhait la vitesse de remontée, de peur de voir la bouteille remplie avant la fin de la verticale, ce qui fausserait complètement les mesures. De plus, il est difficile de calculer la vitesse à adopter pour que la bouteille finisse juste de se remplir à la fin de la verticale. On est donc amené à prévoir une marge de sécurité par estimation. Ainsi, il est rare que la capacité de la bouteille, déjà limitée, soit totalement utilisée. En conséquence, le système nous paraît utilisable sans inconvénient majeur pour de faibles vitesses de courants et de faibles profondeurs, et, bien sûr, de fortes concentrations .

Les avantages du jaugeage par intégration sont évidents : rapidité des mesures, simplicité des dépouillements, calcul y compris .

2-3-4 : Corrélation avec un échantillon témoin

Rappelons que nous cherchons à connaître les variations de débit solide à l'échelle de la crue pour les petits bassins versants, à une échelle de temps plus grande pour les grands bassins versants, et, dans les deux cas, à établir, d'après ces observations, un bilan annuel du transport solide .

Les variations de débit solide sont plus ou moins liées aux variations de débit liquide, or, si la concentration des eaux n'est pas toujours un phénomène apparent, leur hauteur, elle, est facilement appréciable .

- Pour les petits cours d'eau, la cadence des prélèvements d'échantillons témoins sera fonction des crues. On effectue au minimum un prélèvement à la montée des eaux, un à l'étale et un à la décrue. Par comparaison des turbidigrammes et des hydrogrammes, on constate souvent que le maximum de concentration est atteint avant le maximum de débit liquide, donc le second prélèvement sera effectué de préférence avant l'étale. En niveau d'étiage, les prélèvements seront beaucoup plus espacés .
- Pour les grands cours d'eau, nous avons vu que les concentrations peuvent varier sans modification notable de hauteur d'eau, on effectue donc un prélèvement périodique. Les variations de concentration et de hauteur d'eau étant lentes, en général un prélèvement quotidien est suffisant .

2-3-4-1 : Localisation et mode de prélèvement

L'idéal serait de chercher par le calcul à partir des jaugeages complets le point le plus stable de concentration égale à la concentration moyenne et d'effectuer en ce point un prélèvement avec l'appareil utilisé lors du jaugeage

En pratique, le prélèvement de l'échantillon témoin doit être une opération simple de façon à :

- ne pas mobiliser un matériel sophistiqué,
- pouvoir être effectué rapidement,
- pouvoir, éventuellement, être confiée à un observateur local non spécialisé

Le plus souvent, le prélèvement se fait au seau ou au jerrycan, et, soit au bord du cours d'eau, soit en un point éloigné de la berge si l'on dispose d'un moyen d'accès facile (passerelle par exemple). Notons que le point de prélèvement peut ne pas être situé au niveau de la section de jaugeage .

2-3-4-2 : Erreur due au mode de prélèvement

Nouvelot a effectué des mesures comparatives pour des échantillons prélevés simultanément à la pompe et en plongeant directement un jerrycan dans la rivière. 46 couples, de concentrations comprises entre 10 et 250 g / m³, ont ainsi été prélevés. L'étude a montré que la corrélation est suffisamment étroite pour que, dans cette gamme de concentrations et pour des éléments fins, l'erreur due au mode de prélèvement puisse être considérée comme négligeable .

Nous n'avons malheureusement pas d'exemple de telles études pour des concentrations et des granulométries plus élevées, mais l'expérience montre que, dans ce cas, le prélèvement au seau, au jerrycan ou à la bouteille opère une sélection des particules d'autant plus sévère que les matériaux sont grossiers

2-3-4-3 : Corrélation entre c et C_m

Les exemples ci-dessous concernent deux cours d'eau de faibles concentrations, les jaugeages ont été effectués par pompage pour différentes valeurs du débit liquide. L'échantillon témoin est prélevé au seau ou au jerrycan au bord du cours d'eau, donc, l'erreur due au mode de prélèvement est négligeable. La cote limnimétrique est lue simultanément .

Exemple 1 (fig. 26) : Station de Goura sur le Mbam (Cameroun).

Surface du bassin versant drainé à la station : 42.300 Km²

La corrélation entre c et C_m a été recherchée à partir de 7 jaugeages complets effectués entre 1970 et 1971. L'échantillon témoin était pris à 300 mètres en amont de la section de jaugeage. Ici, la corrélation est assez serrée, la dispersion des points autour de la droite calculée étant faible .

Corrélation obtenue : $C_m = 0,979 c - 0,6$

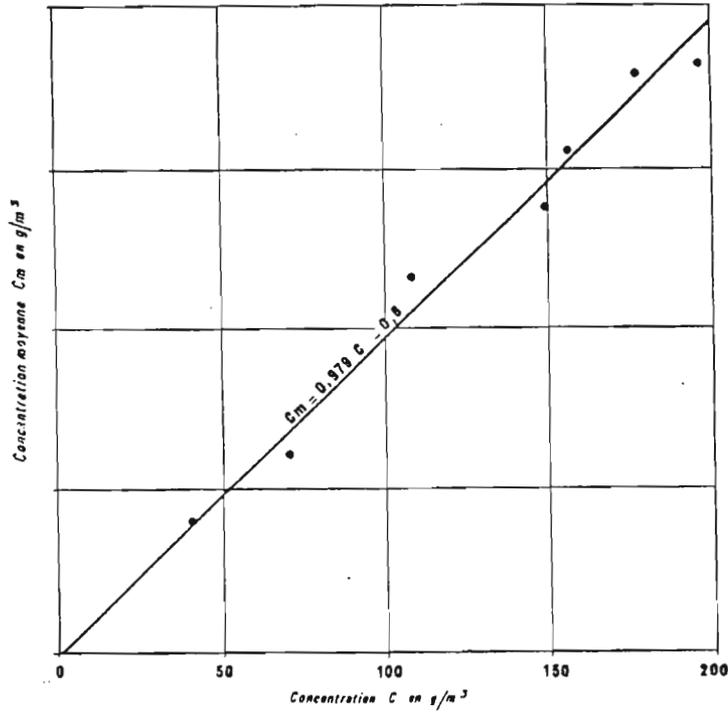
Cette relation a donc été utilisée pour calculer C_m à partir de c .

Exemple 2 (fig. 27) : Station de Nana sur la Kouï (République Centrafricaine). Bassin versant représentatif de Sarki .

Surface du bassin versant drainé à la station : 93,6 Km²

Plusieurs jaugeages de prélèvements ont été effectués entre 1969 et 1971 pour différentes valeurs du débit liquide. Le tableau donne le détail des concentrations moyennes (J) et des concentrations de l'échantillon témoin (T) . La colonne de droite fait apparaître la fluctuation importante du rapport J/T . Si l'on reportait les points correspondants, on constaterait une nette dispersion, il serait inutile de calculer la droite moyenne. Le coefficient de corrélation a finalement été estimé à 1,10 , ce qui donne la relation :

$$C_m = 1,10 . c$$



Corrélation entre la concentration moyenne C_m et la concentration C d'un échantillon témoin.

MBAM à GOURA 1970-1971

Fig. 26

Date	Débit liquide (m^3/s)	Transport en suspension (g/s)	Concentration Jaugeage (g/m^3)	Concentration Témoin (g/m^3)	J/T
17- 9-1969	7,11	3 210	452	534	0,85
30- 9-1969	8,38	378	105	110	0,95
4-10-1969	1,85	57	30,8	33,1	0,93
16-10-1969	3,14	272	86,7	79,9	1,08
28-10-1969	6,45	1 252	194	166	1,17
15- 6-1970	6,04	6 360	105		
24- 6-1970	5,76	3 000	520	462	1,12
25- 6-1970	4,73	2 130	450	356	1,26
29- 6-1970	16,8	5 920	352	302	1,16
10- 7-1970	4,61	2 320	503	369	1,36
18- 7-1970	8,04	4 050	504	347	1,45
22- 7-1970	10,6	3 640	343	317	1,08
6- 8-1970	15,8	2 480	157		
20- 8-1970	18,4	6 500	354	345	1,03
30- 8-1970	7,64	3 000	393	384	1,02
1-10-1970	7,02	2 110	300	158	1,90
30- 8-1971	4,03	1 680	410	380	1,07
30- 8-1971	5,44	1 496	270	280	0,96

Fig. 27 : La Kouï à Nana : résultats des jaugeages

Nous avons vu que, en général, le prélèvement de surface tendait à sous-estimer la concentration, la proximité des berges aurait plutôt tendance à la surestimer. Mais ces erreurs systématiques ne sont pas gênantes puisque la corrélation a pour but de les supprimer. Nous pensons que les éventuelles causes de dispersion sont à chercher dans l'instabilité de la concentration au point de prélèvement de l'échantillon témoin par rapport à la concentration moyenne. Donc, l'effet de berge, très fluctuant pour certains cours d'eau, nous paraît ici déterminant .

A ce titre, il serait intéressant, pour un même cours d'eau, de différencier les jaugeages en fonction des paramètres qui ont pu influencer le phénomène d'érosion des berges. La charge du cours d'eau ou le débit liquide sont en général pris en compte, mais nous constatons que les paramètres tels que : montée de crue, étale ou décrue, proximité de la crue précédente, ne sont que partiellement pris en compte bien qu'on possède les informations les concernant .

Ainsi, on pourrait appliquer à la concentration de l'échantillon témoin (pour lequel on connaît aussi ces paramètres au moment du prélèvement) le coefficient approprié en choisissant le rapport C_m / c du jaugeage dont les conditions se rapprochent le plus des conditions de prise de l'échantillon. Cela allongerait quelque peu le dépouillement des mesures, mais, ce nous semble, pas dans des proportions prohibitives .

Dans le cas où on a la possibilité de prélever l'échantillon témoin assez loin de la rive, la méthode ne s'impose pas, évidemment .

2-3-5 : La Sanaga à Nachtigal : Méthodologie des mesures et bilan des transports solides pour l'année 1969 .

Nous avons choisi ici un exemple d'étude systématique du transport solide en suspension par la méthode du jaugeage complet et corrélation avec un échantillon témoin. Cet exemple est tiré des rapports de Nouvelot, édités par l'ORSTOM dans ses cahiers hydrologiques. Il nous permettra en particulier de présenter le principe du calcul visant à établir un bilan annuel du transport solide .

2-3-5-1 : Caractéristiques du bassin versant

Superficie drainée à la station : 77.000 Km²
Végétation : 30 % de forêts, 70 % de savanes
Pentes modérées

La quasi-totalité du bassin versant est soumise au climat tropical de transition caractérisé par une saison pluvieuse d'avril à novembre, et une saison sèche pendant le reste de l'année .

Pluviométrie moyenne : 1580 mm

Module interannuel (écoulement moyen) : 1178 m³/s

Coefficient d'écoulement : 30,5 %

2-3-5-2 : La rivière et la station

Grande rivière à variations de cotes lentes .

Régime hydrologique : une pointe de crue en septembre-octobre, un étiage en février-mars .

Transport : éléments fins, faibles concentrations .

La station est située à quelques centaines de mètres en aval de rapides, donc le brassage est bon dans la section .

Largeur de la section : 300 mètres .

La station est équipée d'un limnimètre .

2-3-5-3 : Méthodologie

Pour les jaugeages, des échantillons de 10 litres sont prélevés par pompage à partir d'une embarcation (Zodiac) . Tous les échantillons (échantillons témoins y compris) sont analysés par pesée du résidu sec .

Il a été effectué chaque semaine, et alternativement, un jaugeage complet ou un jaugeage de surface .

Quotidiennement, un échantillon de 10 litres est pris au jerrycan, suffisamment dans le courant et toujours dans les mêmes conditions. Le même échantillon est prélevé au cours de chaque jaugeage, la cote du plan d'eau est lue simultanément au prélèvement .

— Figure 28 : 8 jaugeages complets ont pu être utilisés. La corrélation entre la concentration C de l'échantillon témoin et la concentration C_m du jaugeage complet est excellente .

$$\text{Relation de corrélation } (R_I) \quad C_m = 0,957 \cdot C + 4,2$$

- Figure 29 : Pour ces mêmes jaugeages, une corrélation a été cherchée entre la moyenne des concentrations de surface C_p et la concentration moyenne .

$$(R_2) \quad C_m = 0,974 \cdot C_p$$

Le bon brassage dans la section permet d'obtenir une corrélation assez serrée. Ainsi, 23 jaugeages partiels ont pu être revalorisés de façon à obtenir la concentration moyenne théorique C'_m pour chaque jaugeage partiel .

- Figure 30 : corrélation entre C'_m et C de l'échantillon témoin.

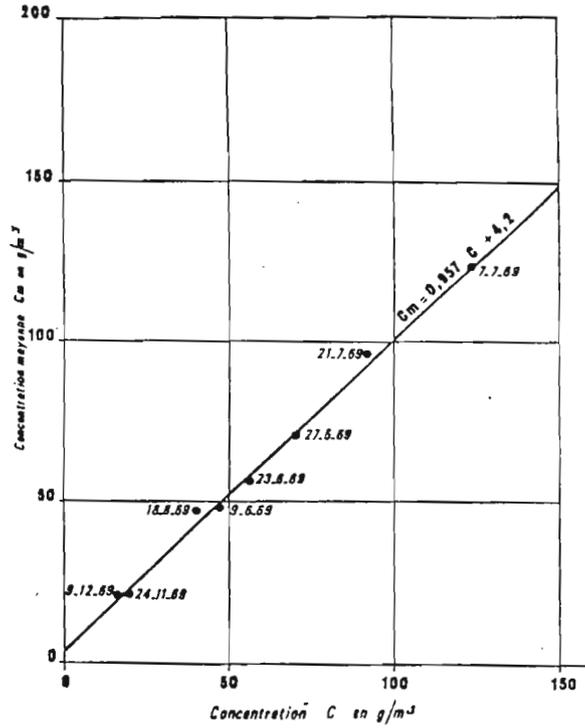
$$(R_3) \quad C'_m = 0,961 \cdot C + 2,6$$

Les relations (R_1) et (R_3) sont pratiquement identiques, elles peuvent être utilisées indifféremment. La concentration moyenne ainsi obtenue pour chaque échantillon quotidien est assimilée à la concentration moyenne journalière .

2-3-5-4 : Résultats

Pour l'année 1969, on a tracé la courbe des variations des concentrations moyennes journalières, ainsi que celle des débits liquides sur un même graphique (fig. 31). Ce graphique met en évidence certains caractères propres au climat tropical de transition .

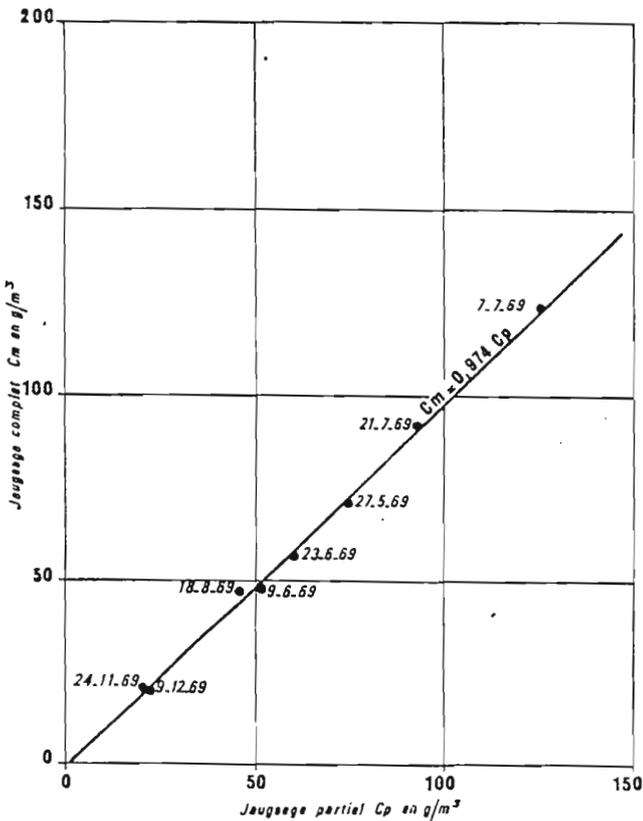
- Au début de la saison des pluies (avril à juillet), les sols desséchés sont mal protégés par la végétation, la concentration augmente très vite avec le débit .
- En pleine saison de pluie (juillet à octobre), la végétation a eu le temps de se développer, assurant une meilleure protection des sols, la concentration décroît, d'abord très rapidement, puis faiblement .
- En fin de saison de pluie, la décrue est amorcée et la concentration décroît plus rapidement .
- En saison sèche, le transport est négligeable, il n'a pas été fait de mesure .



Corrélation entre la concentration moyenne C_m et la concentration d'un échantillon témoin C

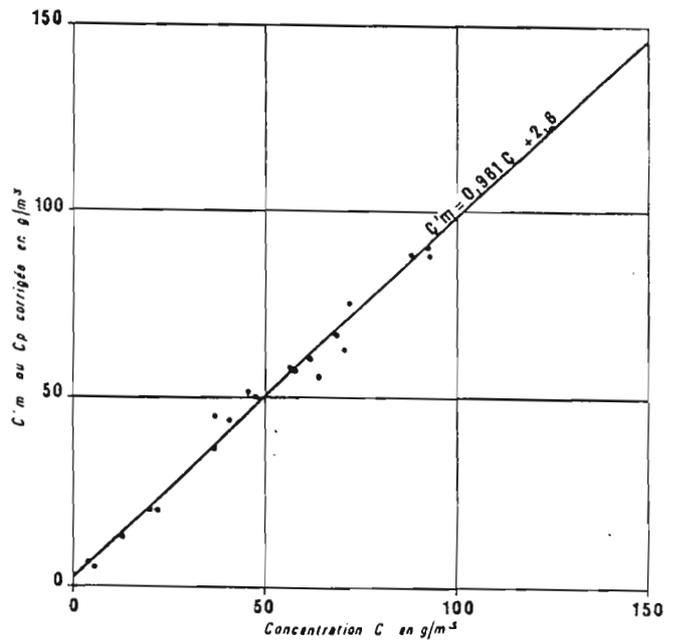
Fig. 28

SANAGA à NACHTIGAL 1969



Corrélation jaugeage complet - jaugeage partiel.

Fig. 29



Corrélation entre la concentration moyenne théorique $C'm$ et la concentration d'un échantillon témoin C.

Fig. 30

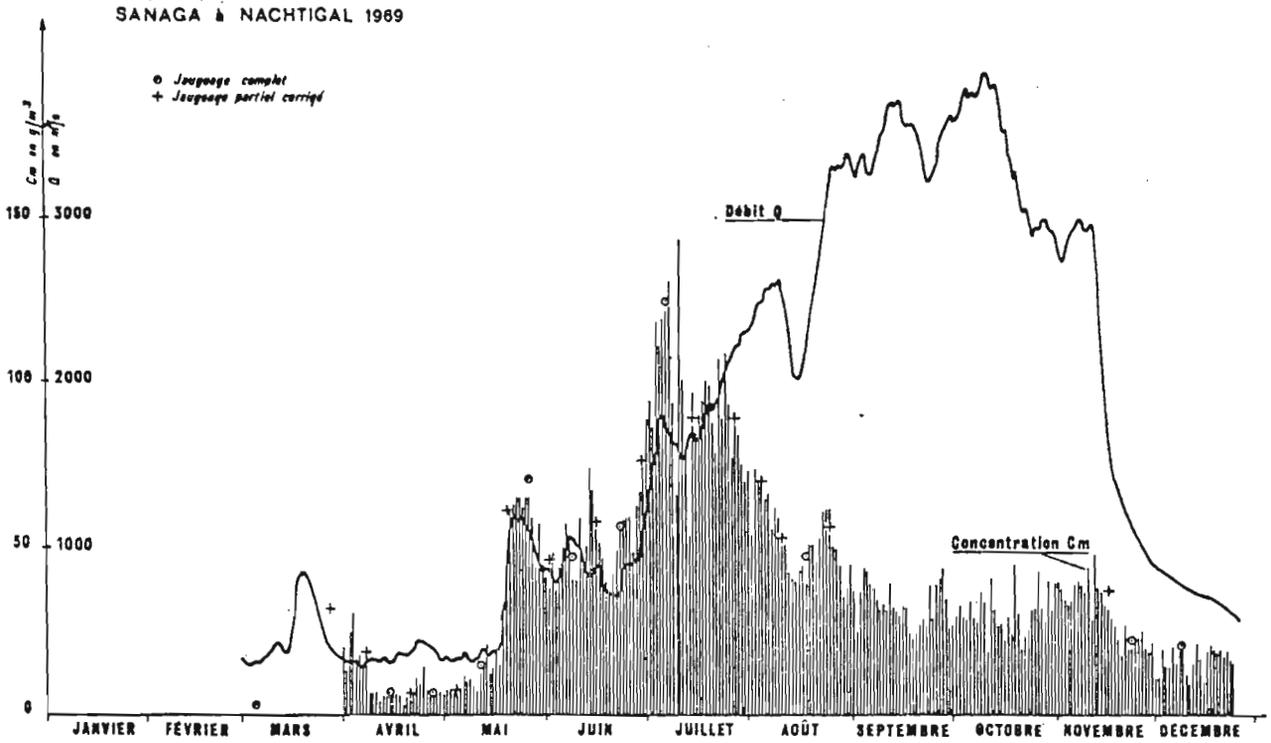


Fig. 2. — Débits moyens, concentrations moyennes journaliers.

Fig. 3I

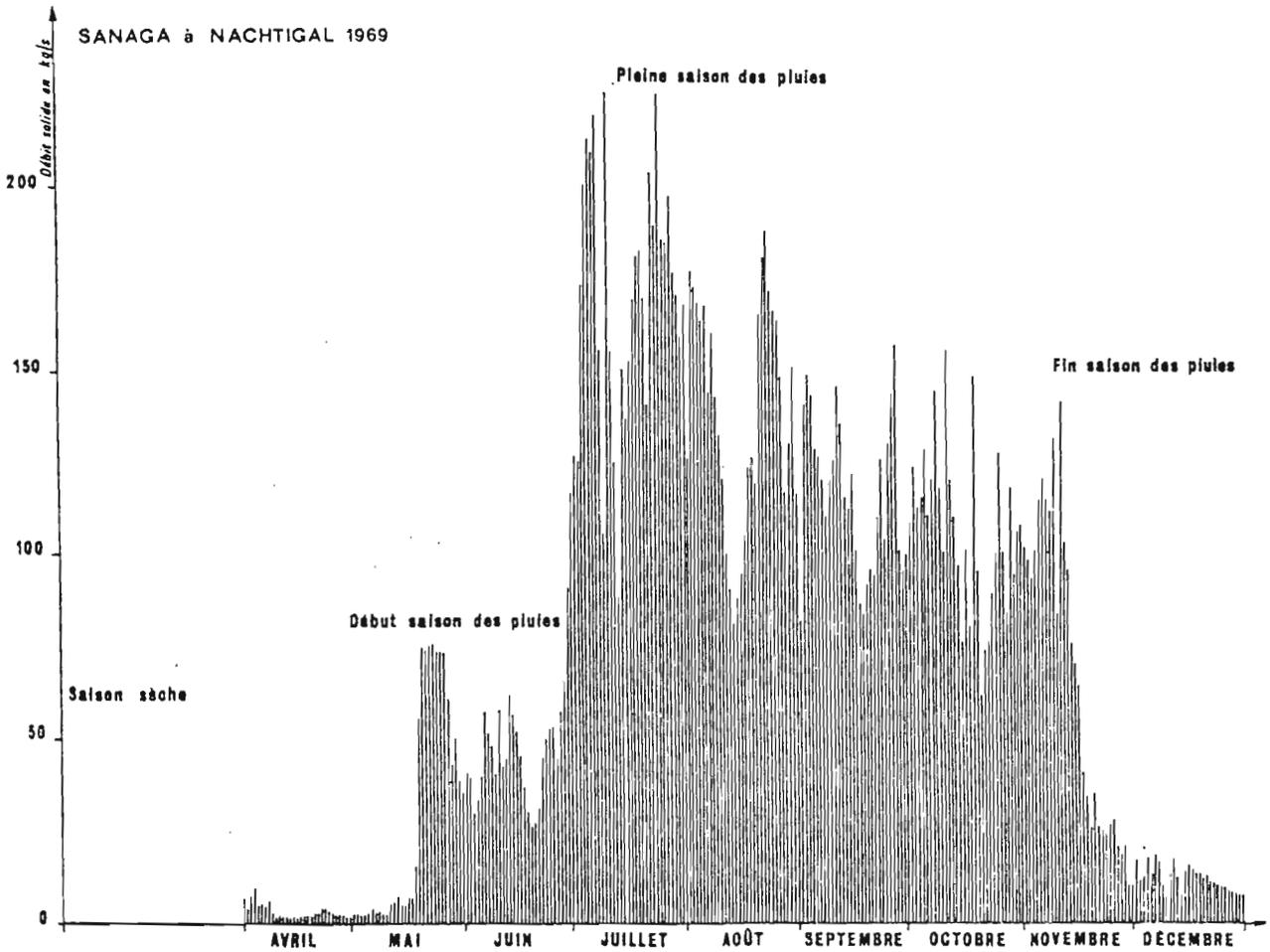


Fig. 4. — Débits solides moyens journaliers en kg/s.

Fig. 32

Le poids des matériaux transportés en 24 heures est calculé par :

$$P_s = 86.400 \cdot C_m \cdot Q_1 \quad \text{en tonnes par jour .}$$

La figure 32 montre les variations des débits moyens journaliers pour l'année 1969 .

Le poids de matériaux transportés sur une période donnée est obtenu en planimétrant cette courbe sur la période considérée .

Pour l'année 1969, le volume écoulé a été de $45.065 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit un module annuel de $1429 \text{ m}^3/\text{s}$.

Poids des matériaux transportés dans l'année : 1.867.700 T .

Concentration moyenne annuelle : 42 g / m^3

Dégradation spécifique annuelle : 24 T / Km^2

Lame de sol érodée équivalente : 2 / 100 mm

Mais ici, la dégradation spécifique pour l'année 1969, prise isolément, n'a pas grande signification .

2-3-6 : Autres résultats

Nous présentons dans le tableau 33 quelques résultats d'études systématiques de transport solide en suspension effectuées par l'ORSTOM. Les moyennes interannuelles portent sur des données d'observations variant de 3 à 5 ans .

La méthode employée est celle du jaugeage et corrélation. Tous les jaugeages sont effectués selon la méthode mise au point par l'ORSTOM (prélèvements à la pompe et pesée systématique des échantillons) .

Jaugeage complet pour les grandes rivières.

Jaugeage de prélèvements et moyenne arithmétique des concentrations pour les petites rivières (Tsanaga et Kouï) .

Tous les cours d'eau sont soumis au régime tropical de transition, sauf la Tsanaga (régime tropical pur) .

Tous font partie du réseau hydrographique du bassin continental que constitue la cuvette tchadienne, exceptés le Mbam et la Sanaga .

Il est intéressant de remarquer que le Mbam subit une érosion trois fois supérieure à celle de la Sanaga (85 T/Km^2 pour 28 T/Km^2); or, les surfaces de ces deux bassins sont de même ordre de grandeur, le régime climatique et

Figure 33

Rivière	Pays	Station	Surface (km ²)	Pluviométrie moyenne (mm)	Concentration moyenne (g / m ³)	Dégradation spécifique (T/km ² /an)
Chari	Tchad	Fort Archambault	193.000	1080	35	1,2
Logone	Tchad	Moundou	33.970	1395	150	65
Ouham	Tchad	Manda	79.600	1350	53	10
Pende	Tchad	Doba	14.300	1450	77	25
Sanaga	Cameroun	Nachtigal	77.000	1580	58	28
Mbam	Cameroun	Goura	42.300	1780	160	85
Koui	Centrafrique	Nana	94	1470	286	95
Tsanaga	Cameroun	Bogo	1.535	830	1200	210

le milieu physique sont sensiblement les mêmes. La Noun, affluent du Mbam, draine une région montagneuse volcanique caractérisée par des zones de cultures importantes dont l'influence est apparue nettement dans des mesures effectuées sur parcelles d'érosion. Cela semble expliquer la différence .

Notons enfin que la Tsanaga donne des dégradations spécifiques assez importantes, le régime tropical pur étant caractérisé par une saison sèche nettement plus longue qui rend les sols plus vulnérables en début de saison de pluie .

2-3-7 : Conclusion

Il est difficile de chiffrer l'erreur relative totale introduite dans le calcul de la quantité de matériaux transportés en suspension sur une certaine période .

Les erreurs systématiques intervenant dans la détermination de la concentration moyenne réelle, qui est à la base de tout calcul, peuvent être sérieusement limitées par le choix d'un matériel de jaugeage et d'une méthode d'analyse appropriés, on y attachera donc une attention toute particulière .

Les autres erreurs systématiques concernent le mode de prélèvement des échantillons témoins et la non représentativité du point de prélèvement de ces échantillons. La corrélation a pour but de les éviter. Ce sera d'autant mieux atteint qu'on aura pu choisir un point suffisamment stable et effectuer des jaugeages fréquents dans les conditions d'écoulement multiples qui peuvent être rencontrées .

Quant aux erreurs aléatoires dues aux fluctuations temporelles du phénomène de transport, on peut espérer qu'elles vont se compenser sur une longue période de mesures, sous réserve bien sûr qu'on ait effectué une observation suivie des transports .

Signalons enfin l'erreur due à l'instabilité de la courbe de tarage de la station, puisque l'erreur sur le débit solide ne pourra en aucun cas être inférieure à l'erreur sur le débit liquide .

2 - 4 : LES AUTRES SYSTEMES

Ils admettent tous que la concentration en un point est égale à la concentration moyenne dans la section d'écoulement, sauf les techniques nucléaires qui, nous le verrons, permettent l'utilisation de jauges nucléaires .

2-4-I : Les différentes méthodes

On peut distinguer :

- Le prélèvement d'un échantillon unique à l'aide d'un récipient ou d'un échantillonneur .
- Les appareils de prélèvement automatique, le plus souvent par pompage, donc valables pour des éléments fins. Ils sont de deux sortes :
 - . Un système prélève un échantillon à intervalles de temps réguliers en un point déterminé du cours d'eau. Les différents échantillons sont emmagasinés dans des bouteilles. L'analyse se fait soit automatiquement, soit au laboratoire. Pour l'analyse automatique, c'est en général le volume des sédiments déposés qui est enregistré sur film. Ces dispositifs sont lourds, leur mise en place difficile .
 - . Si l'on est intéressé uniquement par la quantité de sédiments transportés sur une certaine période, à l'échelle de la journée par exemple, on peut collecter les échantillons dans un récipient unique, mais le prélèvement doit alors être pondéré par le débit liquide, ce qui pose certains problèmes. Dans les années 1950, Braudeau avait étudié un système mécanique qui devait être utilisé par E D F sur la Durance, mais sa mise au point n'a pas été réalisée. Les dispositifs récents, dont l'automate Fritsch que nous décrirons, font appel aux techniques les plus avancées
- Les systèmes de mesure directe de la concentration au sein de l'écoulement sont principalement au nombre de deux :
 - . les turbidimètres,
 - . les appareils nucléaires .

Nous étudierons leur principe dans ce chapitre .

2-4-2 : Prélèvement à la main en un point unique

En raison des contraintes imposées par le jaugeage de prélèvements, on se contente le plus souvent de prélèvements à la main en un point unique à l'aide d'un récipient et au bord du cours d'eau en général, mais de préférence à l'échantillonneur et au centre de l'écoulement. Notons que dans ce dernier cas, les U.S. Samplers peuvent être employés pour l'intégration sur une seule verticale .

En ce qui concerne les cours d'eau à régime torrentiel, et nous pensons ici plus particulièrement aux oueds de l'Afrique du Nord, l'observation du transport solide lors du passage des crues est d'un intérêt capital. Or, le jaugeage est impraticable, la plupart des appareils automatiques sont mal adaptés à la mesure des fortes concentrations, leur utilisation est rendue difficile par la violence des crues, leur installation est souvent injustifiée car les mesures ne sont nécessaires qu'en de rares occasions, l'efficacité des échantillonneurs est sensiblement mise en défaut par les fortes vitesses de courant .

Pour toutes ces raisons, la seule méthode applicable est, dans la majorité des cas, le prélèvement à la bouteille à goulot étroit, soit au bord, soit en lançant la bouteille attachée au bout d'une corde vers une zone d'écoulement plus turbulent .

Du fait de la soudaineté des crues, si l'on ne pense pas pouvoir intervenir à temps, on pourra mettre en place des bouteilles dites submersibles qui se remplissent automatiquement au moment où la surface de l'eau atteint leur niveau .

On a souvent recours à un téléphérique pour les mesures au moulinet lors du tarage des stations mais, au-delà de certaines vitesses, le jaugeage au flotteur s'impose. Il consiste à mesurer les vitesses de corps flottants en surface, dont on déduit une valeur approximative du débit liquide .

Nous donnons ici les résultats obtenus sur deux oueds tunisiens caractérisant bien l'originalité du transport solide dans de tels cours d'eau, ils montrent que la turbulence élevée peut être un facteur bénéfique ou nuisible pour les mesures .

Dans les cas les plus favorables (fortes concentrations, granulométrie fine des matériaux), les mesures donnent de bons résultats, témoin la station

de Sidi Aouidet, sur l'oued Kebir, où l'on a pu comparer les mesures avec le volume des matériaux déposés dans la retenue de Sidi Bou Baker, en aval de la station. Les mesures sous-estimaient les apports de 15 %, ce qui est un résultat assez remarquable compte tenu du fait que le charriage est ignoré .

Mais la plupart du temps, les mesures sous-estiment largement les quantités transportées, du moins pour des événements importants. Lors des crues exceptionnelles de mars 1973, quelques prélèvements ont pu être faits sur la Medjerda, ils donnaient une concentration moyenne de 30 g/l . La mesure du dépôt des alluvions, comparée aux mesures du débit liquide total écoulé, estime la concentration moyenne à 100 g/l , soit un rapport de 1 à 3 . Il faut dire qu'une fraction non négligeable de particules entre 0,2 et 2 mm a été retrouvée dans les dépôts, alors que leur présence n'avait pas été décelée par les prélèvements. On peut donc expliquer en partie cet écart important par le brassage vertical qui, bien que très important, n'est pas suffisant pour amener ces particules en surface pour de forts tirants d'eau .

2-4-3 : Automate Fritsch

Cet appareil est utilisé par l'ORSTOM (qui a contribué à sa mise au point) pour les mesures sur de très petits bassins versants dans le cadre de son programme Ecérex déjà cité. Etant donné qu'on observe en régime amazonien de 120 à 130 crues par an, il serait trop contraignant d'effectuer des prélèvements pour une telle cadence, c'est ce qui a motivé l'utilisation d'un tel appareil.

Les stations sont équipées de déversoirs, une prise d'eau gravitaire débite en permanence, son débit est étalonné en fonction de la cote du déversoir. L'appareil comporte (fig. 34) :

— Une unité de contrôle : l'organe principal en est un microprocesseur. Il lit la cote indiquée par le limnigraphe (par l'intermédiaire d'un potentiomètre), en déduit le débit liquide (Q) ainsi que celui de la prise d'eau, puis calcule le temps nécessaire (T) pour que le volume débité par la prise d'eau soit proportionnel à Q. L'information Q est mise en mémoire, l'information T est transmise à l'unité de prélèvement, la fréquence des prélèvements est réglable de 10 à 990 secondes .

- Une unité de prélèvement : Elle présente un col de cygne mobile autour d'un axe animé par un petit moteur électrique. A la fréquence choisie, le col de cygne vient se placer sous la prise d'eau pendant le temps T , l'eau ainsi prélevée est déversée dans un récipient collecteur .
- Une alimentation de 12 volts pour l'unité de contrôle et le moteur permet une autonomie de plusieurs semaines .

L'analyse de l'échantillon collecté permet de connaître la concentration moyenne des eaux sur la période considérée. En jouant sur la fréquence des prélèvements, qui conditionne la rapidité du remplissage du vase collecteur, on peut faire varier cette période .

Notons que l'appareil peut être facilement adapté à un système de pompage, le temps de prélèvement sera alors calculé en fonction du débit de la pompe .

2-4-4 : Mesure de la turbidité

2-4-4-I : Principe

Il existe une relation plus ou moins lâche entre la transparence des eaux et leur concentration. On appelle turbidité des eaux leur degré de transparence, il importe ici de différencier ce terme car il est souvent utilisé pour désigner simplement la concentration .

Tous les appareils de mesure de turbidité sont basés sur les propriétés d'absorption de lumière par une solution trouble. Le courant liquide étudié circule entre deux organes :

- Un organe émetteur : une ampoule émet une lumière d'intensité constante. Les rayons sont rendus parallèles par interposition d'une lentille .
- Un organe récepteur : une ou plusieurs cellules photoélectriques mesurent l'intensité de lumière reçue après absorption par le courant .

Pour une même distance entre source et cellule, le rapport d'intensité

$$\frac{I \text{ émise} - I \text{ reçue}}{I \text{ émise}}$$

augmente avec la turbidité, donc avec la concentration .

Fig. 34 : Automate Fritsch
sur le site Ecérex

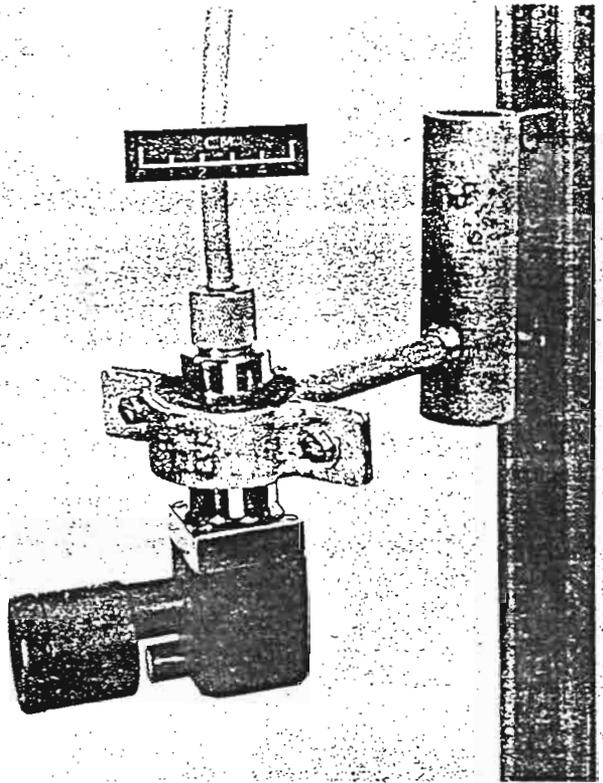
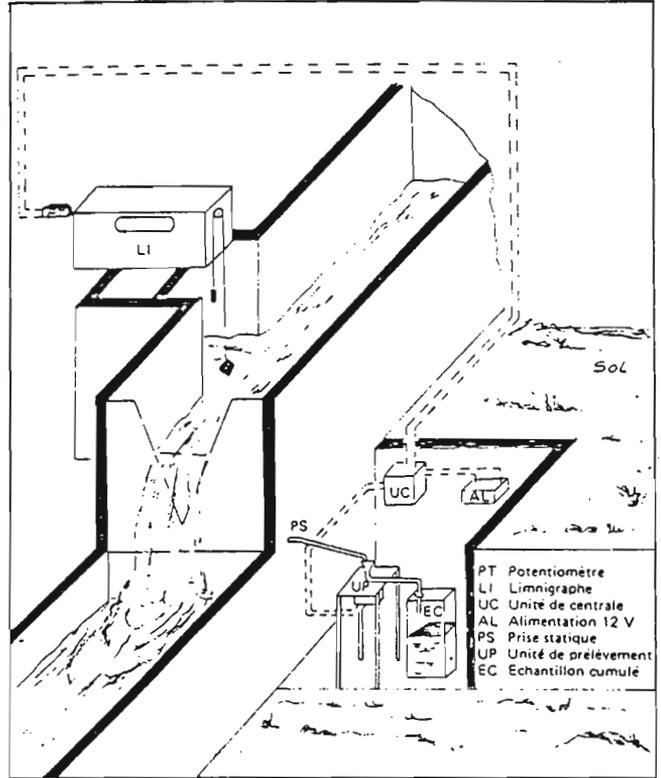
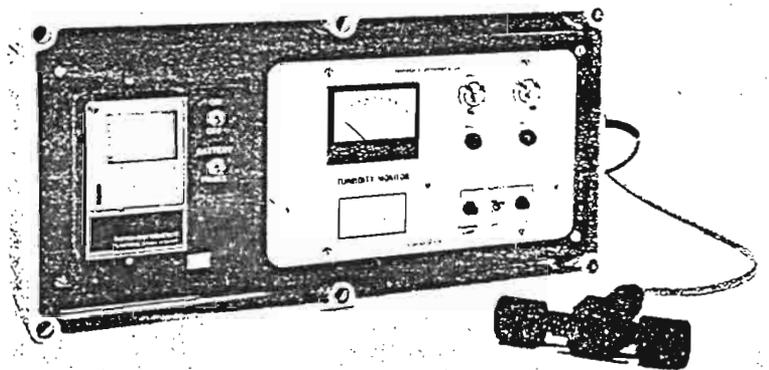


Fig. 35 : Sonde turbidimétrique
montée sur rail

Fig. 36 : Appareil
d'enregistrement Fartech
avec sonde



2-4-4-2 : Relation entre turbidité et concentration

Richardson a étudié en laboratoire l'absorption de lumière par des solutions de grains de diamètre uniforme. Il aboutit à la conclusion que l'absorption est approximativement proportionnelle à :

$\sum n \cdot d$ pour des particules inférieures à 10μ

$\sum n \cdot d^2$ pour des particules supérieures à 10μ

n étant le nombre de particules de diamètre d en suspension dans un volume unité .

Donc, l'absorption de lumière par des solutions de particules hétérogènes sera fonction de la distribution granulométrique des sédiments en suspension, on ne peut dès lors espérer trouver une relation générale entre concentration et turbidité .

A cette cause viennent s'ajouter des facteurs concernant la nature des sédiments : la forme, la couleur, l'indice de réfraction, la salinité des eaux, leur degré de pollution, sont autant de facteurs qui faussent les mesures .

La conséquence en est que l'étalonnage de l'appareil n'est valable que dans les conditions où il a été établi, c'est à dire pour un seul cours d'eau et sous réserve que la nature et la composition des matériaux transportés ne varient pas trop dans le temps .

Ces conditions n'étant jamais rencontrées sur le terrain, les appareils de mesure de la turbidité doivent faire l'objet de contrôles et de corrections d'étalonnage fréquents, ce qui rend leur emploi assez délicat, et la précision des mesures s'en ressent .

Citons les expériences faites dans le Vermont (U.S.A.) sur la Sleepers River comportant peu de teintes parasites. Les prélèvements faisaient l'objet de mesures de turbidité, puis étaient analysés par filtration et pesée; ainsi la courbe d'étalonnage a pu être construite. Par la suite, des contrôles ont été faits par prélèvement de 156 échantillons dont les concentrations variaient entre 16 et 6366 g/m³. La comparaison des concentrations obtenues par l'analyse et d'après la courbe d'étalonnage a donné une précision moyenne de 30 % .

Plus généralement, les expériences montrent que l'absorption de lumière tend à rester constante au dessus d'une certaine valeur de la concentration; une limite de 10 g/l semble déjà optimiste. Or, on ne peut rapprocher indéfiniment la source des cellules, de même, une augmentation d'intensité de la

source lumineuse altère la précision aux faibles concentrations. Il en résulte que les appareils ne peuvent être mis au point que pour des gammes de concentrations bien délimitées, et ne dépassant jamais 10 g/l .

2-4-4-3 : Utilisation

L'intérêt du système est qu'il permet une mesure directe, donc, pas besoin d'analyses, et qu'il se prête facilement à l'enregistrement, donc, en principe, on devrait pouvoir l'utiliser pour des régions assez retirées. La fréquence des mesures peut être programmée, on peut lui associer un dispositif "intelligent" qui calcule la fréquence à adopter en fonction de données telles que concentration, hauteur d'eau, ... Les mesures peuvent être enregistrées sur mémoire ou sur bande graphique, l'appareil présenté figure 36 utilise ce dernier procédé .

Mais en pratique, l'accumulation des débris venant se coller aux vitres des capteurs exige un nettoyage quasi journalier. L'appareil sera donc monté de préférence dans un endroit d'accès facile, sur un pont par exemple. La figure 35 montre une sonde fixée sur rail de façon à pouvoir être remontée pour le nettoyage des vitres .

2-4-5 : Les sondes nucléaires

Le principe est le même que pour les sondes turbidimétriques. L'organe émetteur est ici une source radioactive émettrice de rayons γ . Un détecteur de radiations constitue l'organe récepteur .

Les sondes sont caractérisées par leur volume d'influence : c'est le volume englobant tous les rayons émis par la source et qui peuvent être reçus par le détecteur. Il correspond à l'aire hachurée sur la figure 37 . La mesure de l'absorption des rayons γ par les matériaux en suspension portera donc sur tout ce volume. Le volume d'influence peut varier de quelques litres à quelques centaines de litres. La précision des mesures est d'autant plus grande que l'énergie des radiations est faible, on utilise donc l'énergie la plus petite possible pour qu'une "quantité de radiations" suffisante soit captée par le détecteur .

Pour les jauges nucléaires suspendues (fig. 38) , on choisit des sources au ^{241}Am (Américium) de faible énergie, la distance source-détecteur est d'environ 30 cm pour un diamètre d'influence de 20 cm. Certaines sondes

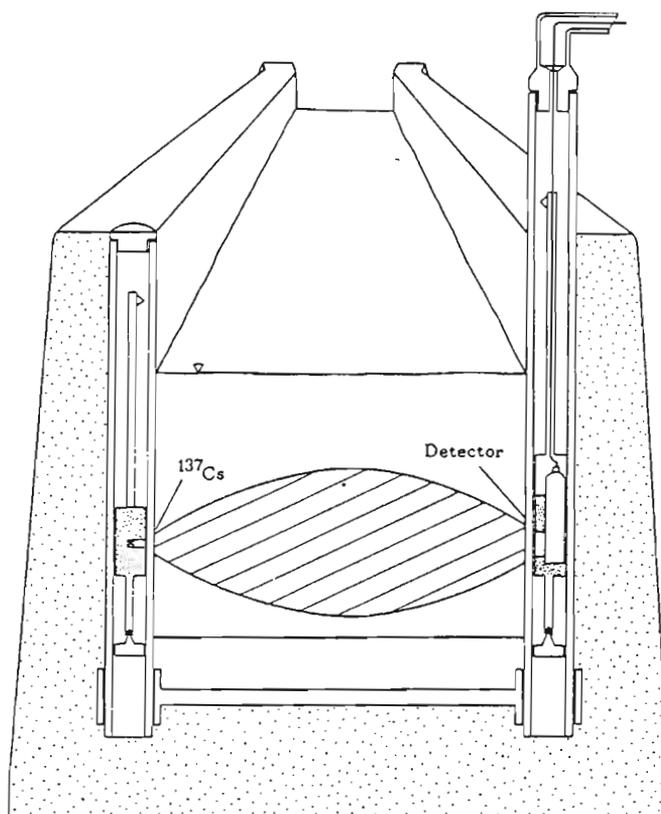


Figure 37 : Sonde nucléaire à poste fixe

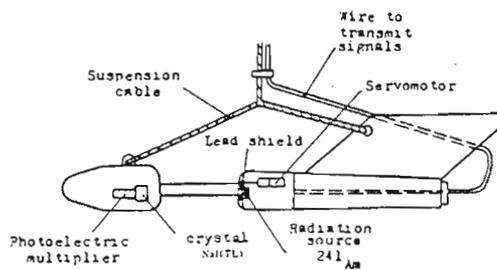


Figure 38 : Jauge nucléaire

nucléaires à poste fixe utilisent des radiations d'énergie plus grande (^{137}Cs : Cesium), la distance source-détecteur peut être de quelques mètres, pour un diamètre d'influence pouvant aller jusqu'à 90 cm.

Un avantage certain sur les appareils mesurant la turbidité est que les sondes nucléaires sont peu sensibles aux variations granulométriques, variations de teintes, et, dans une certaine mesure, à la composition chimique des matériaux transportés. En fait, ces dernières mesurent plutôt la densité de l'eau chargée, donc une correction de température devra être apportée.

Les conséquences sont évidentes : stabilité de l'étalonnage, préétalonnage possible au laboratoire, bonne précision (de 5 à 10 %) pour les fortes concentrations, mais fortes dispersions aux faibles concentrations.

Ces appareils, de mise au point récente, semblent donc être la solution aux mesures des fortes concentrations pour lesquelles on ne connaissait pas encore de méthode réellement satisfaisante, et ce d'autant plus que la légèreté et la robustesse des jauges permettent d'intervenir rapidement et dans toutes les conditions, sous réserve bien sûr qu'on puisse opérer en mode suspendu.

Mais les espoirs semblent beaucoup plus larges comme en témoigne l'expérience italienne de ces dernières années. En Italie du Sud, le caractère soudain des crues et les fortes concentrations observées (jusqu'à 100 g/l) ont conduit à l'utilisation de sondes nucléaires à poste fixe, une source ^{241}Am , de longue période, a été adoptée. La sonde est fixée dans le lit du cours d'eau et suffisamment haut pour que la zone d'influence ne "touche" pas le fond. Une cellule submersible placée à la hauteur voulue déclenche l'enregistrement des mesures quand le niveau de l'eau l'atteint.

Cela permet d'entrevoir les possibilités des techniques nucléaires appliquées à la mesure des concentrations. Nous n'avons pas eu connaissance de l'emploi de tels systèmes sur les oueds d'Afrique du Nord, pourtant, on imagine le nombre de problèmes que cela pourrait résoudre, l'appareil pouvant fonctionner en autonomie quasi intégrale par l'utilisation de panneaux solaires. Dans ce cas, et dans bien d'autres, l'investissement semblerait justifié.

En ce qui concerne les jauges nucléaires, leur précision a pu être affinée et, à l'heure actuelle, on sait fabriquer des jauges stables jusqu'à 0,5 g/l, ce qui permet d'envisager, dans l'avenir, une utilisation plus généralisée.

2 - 5 : CONCLUSION

Bien entendu, nous ne prétendons pas avoir étudié ici tous les systèmes visant à évaluer le débit solide des matériaux en suspension, et d'ailleurs, tel n'était pas notre but. Cependant, profitant des nombreuses expériences faites dans ce domaine et dont, nous le pensons, les plus concluantes ont été, sinon étudiées, du moins abordées ici, nous nous sommes efforcés, tout au long de cet exposé, de mettre en évidence les possibilités d'utilisation du matériel et des méthodes en fonction des conditions spécifiques qui peuvent être rencontrées.

Il apparaît que le matériel est suffisamment complet, les méthodes suffisamment variées, pour que l'on puisse trouver une solution à chaque cas, compte tenu de la nature et de la qualité des renseignements que l'on cherche à obtenir par l'observation du transport solide en suspension.

Le plus souvent, à partir de témoignages visuels, ou mieux, à partir de l'observation du débit liquide, on possède des indications sur les conditions générales et optimales dans lesquelles on va être amené à opérer, et nous avons souligné combien ces conditions optimales étaient importantes. De même, les constatations qui ont motivé la mise en oeuvre d'un programme d'étude du transport en suspension permettent de se faire une idée préalable sur la nature des phénomènes à observer. Citons, parmi les constatations possibles : dégradation des terres observée dans le cas où l'on cherche à évaluer son importance, expérience d'une situation analogue dans le cas d'une étude de projet de barrage.

Il importe donc, à partir de ces données spécifiques, de choisir un programme de mesure approprié. Nous espérons que le présent exposé pourra contribuer à guider ce choix.

III / M E S U R E D U C H A R R I A G E /

3-I : THEORIE DE L' ENTRAINEMENT DES PARTICULES -

EQUATION DE DU BOYS

Le courant exerce sur les matériaux de fond d'un cours d'eau une force dont la composante parallèle à la ligne d'énergie (ou ligne de charge) de la rivière s'appelle force tractrice et est notée τ . τ est d'autant plus grand que la vitesse du courant est élevée .

Le lit du cours d'eau exerce sur ces mêmes matériaux une réaction qui s'oppose à l'entraînement des particules. On appelle force tractrice critique τ_c la force tractrice qui est nécessaire à la mise en mouvement des particules .

Tant que τ n'excède pas τ_c , la particule reste immobile; le début d'entraînement des particules aura lieu pour $\tau = \tau_c$; la vitesse d'entraînement et par conséquent le débit de charriage sera proportionnel à l'excédent de τ sur τ_c , ce qui est mis en évidence par la relation de Du Boys (1879) :

$$q_s = C_s \tau (\tau - \tau_c)$$

q_s = débit solide en volume par unité de largeur du lit

C_s = coefficient qui caractérise l'aptitude des éléments à se mettre en mouvement .

La majorité des formules semi-empiriques, visant à déterminer le débit massique de charriage en fonction des données qui le conditionnent, est basée sur cette relation .

3-2 : LES FORMULES SEMI - EMPIRIQUES

3-2-I : Les différentes formules : leurs conditions d'emploi

La description du phénomène de charriage par une formulation mathématique a fait l'objet de nombreuses recherches. Il s'avère que le problème pris sous son aspect théorique est extrêmement complexe et doit donner lieu à un certain nombre de simplifications. Nous donnons ci-après un aperçu des conditions dans lesquelles ont été élaborées ces formules .

— Elles sont déduites d'essais sur canaux expérimentaux en modèle réduit dans lesquels le régime est permanent et uniforme. Leur application à des cours d'eau sera donc d'autant mieux justifiée que le régime se rapprochera des conditions de l'expérience; un régime fluvial établi ou à transition lente peut être assimilé à ces conditions .

— Les expériences portent sur des matériaux de fond de poids spécifique constant et de granulométrie uniforme ou peu différenciée, conditions qui ne se rencontrent pratiquement jamais dans la nature .

— Les formules ont été établies dans le cas où les matériaux transportés proviennent directement du lit, celui-ci étant supposé indéfiniment affouillable. Donc, appliquées à des cours d'eau, elles fournissent, non pas le charriage réel, mais la quantité maximale de sédiments qui puisse être charriée, c'est à dire la capacité de transport du cours d'eau. Citons à cet effet Quesnel : " Les formules ne s'appliquent pas aux cours d'eau qui coulent sur un sol rocheux, sur un lit de conglomérats insensibles à l'érosion ou sur un lit de galets dont la stabilité est assurée tant que n'intervient pas des crues de caractère diluvien, donc exceptionnelles " (phénomène de pavage) .

Le tableau 39 résume les principales formules .

Bien que d'apparence simple, les formules font en réalité intervenir des quantités fort délicates à déterminer, telle la force tractrice critique τ_c .

Fig. 39

Auteurs	Formules	Matériaux étudiés
Meyer Peter 1948	$q_s = K (\tau - \tau_c)^{3/2}$	lits de graviers $0,40 < d < 28,6$ mm
Chang	$q_s = C n \tau (\tau - \tau_c)$	sables réguliers
W.E.S.	$q_s = \frac{C}{n} (\tau - \tau_c)^m$	mélange de sables
Shields	$q_s = \frac{10 q}{\omega_s \omega'_s d} (\tau - \tau_c)$	$1,56 < d < 2,47$ mm
M.C. Dougall	$q_s = C i^m (q - q_c)$	mélange de sable
O'Brien	$q_s = C \left(\frac{V}{R^{1/3}} \right)^m$	mélange de sable
Schoklitsch (1934)	$q_s = C \frac{i^{3/2}}{\sqrt{d}} (q - q_c)$	sables réguliers
Einstein (1950)	$\phi = \frac{q_s}{\omega_s g} \left(\frac{\omega}{\omega'_s} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{g d^3} \right)^{1/2}$ $\psi = \frac{\omega'_s}{\omega} \frac{d}{R i}$	d_{35} conseillé

- q_s = débit solide par unité de largeur
- q = débit liquide par unité de largeur
- q_c = débit critique d'entraînement
- d = diamètre des grains
- R = rayon hydraulique
- i = pente de la ligne d'énergie
- g = gravité
- ω = poids spécifique de l'eau (T/m^3)
- ω_s = poids spécifique du solide
- ω'_s = $\omega_s - \omega$ = poids spécifique du solide pesé dans l'eau
- V = vitesse moyenne du courant
- C, K = coefficients variables
- n = coefficient de Manning

Ces quantités interviennent sous différentes formes suivant les formules, mais leur calcul exige la connaissance des mêmes paramètres. Nous verrons, dans le paragraphe suivant, et tout au long de l'étude du charriage, dans quelle mesure les différents paramètres sont quantifiables à partir des données recueillies sur le terrain .

D'une équation à sa suivante chronologique, on a tenté de tenir compte des conditions réelles de transport en introduisant un certain nombre de termes correctifs. Il n'en reste pas moins que ces corrections sont assez subjectives et que, par conséquent, les formules ne restent applicables sans trop de risques qu'à des cours d'eau se rapprochant des conditions théoriques. Mais, même dans ce dernier cas, elles ne peuvent donner qu'un ordre de grandeur du charriage .

Nous avons reproduit figure 40 une comparaison de quelques formules avec des mesures effectuées en nature. On notera qu'ici, les résultats obtenus par application des formules sont bien loin de la réalité .

3-2-2 : Emploi de la formule de Meyer-Peter : détermination des différents paramètres

Pour donner un aperçu des différents paramètres entrant en ligne de compte dans le calcul du débit solide de charriage, et pour mettre en évidence les difficultés rencontrées quand il s'agit d'évaluer certains de ces paramètres, nous nous baserons sur cet exemple .

La formule de Meyer Peter est donnée ici sous sa forme modifiée 1948 .

$$q_s = K (\tau - \tau_c)^{3/2}$$

Ses conditions d'emploi sont à peu près les mêmes que celles déjà citées. Cependant, elle a plutôt bonne réputation pour les rivières à lits de graviers, et on peut même dire qu'elle est la seule à avoir donné des résultats pas trop mauvais pour les lits de galets en régime semi-torrentiel .

K tient compte du poids spécifique des matériaux :

$$K = \frac{1}{0,125 \left(\frac{\omega}{g}\right)^{1/2} \frac{\omega'_s}{\omega_s}}$$

Il peut être évalué à partir de prélèvements de matériaux de fond .

3-2-2-I : Calcul de τ

Dans tout ce qui suit, on suppose qu'on a affaire à un certain courant de débit moyen par unité de largeur q_e auquel correspond un rayon hydraulique R , une pente d'énergie i et une force tractrice τ .

La force tractrice maximale est donnée par la relation :

$$\tau_{max} = \omega i R$$

i et R sont déterminés par des observations classiques .

Pour tenir compte de l'énergie employée à lutter contre la résistance des rides ou des dunes de fond, ainsi que contre la rugosité du lit et des parois, il faut admettre qu'une partie seulement de τ_{max} est utilisée pour charrier les matériaux. La force tractrice effective τ est donnée d'après Meyer-Peter par :

$$\tau = a \tau_{max} \quad \text{avec} \quad a = \frac{q_a}{q_e} \left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2}$$

q_e = débit liquide observé dans le canal d'essai

q_a = débit liquide qu'on observerait dans l'hypothèse de parois identiques au lit .

K_s = coefficient de Strickler = coefficient de rugosité global du lit .

K_r = coefficient de rugosité des matériaux de fond .

En pratique, q_a/q_e est estimé (de l'ordre de 0,8)

K_s intervient dans la formule de Manning-Strickler :

$$V = K_s R^{2/3} i^{1/2} \quad \text{ou} \quad Q_e = K_s S R^{2/3} i^{1/2}$$

V = vitesse moyenne dans la section

S = surface de la section

K_s peut donc être calculé à partir de mesures de vitesses ou à partir de la courbe de tarage de la section .

K_r peut être obtenu par $K_r = 26 d_{90}^{-1/6}$

d_{90} étant le diamètre de l'anneau dans lequel passent (en poids) 90% des particules constituant le lit .

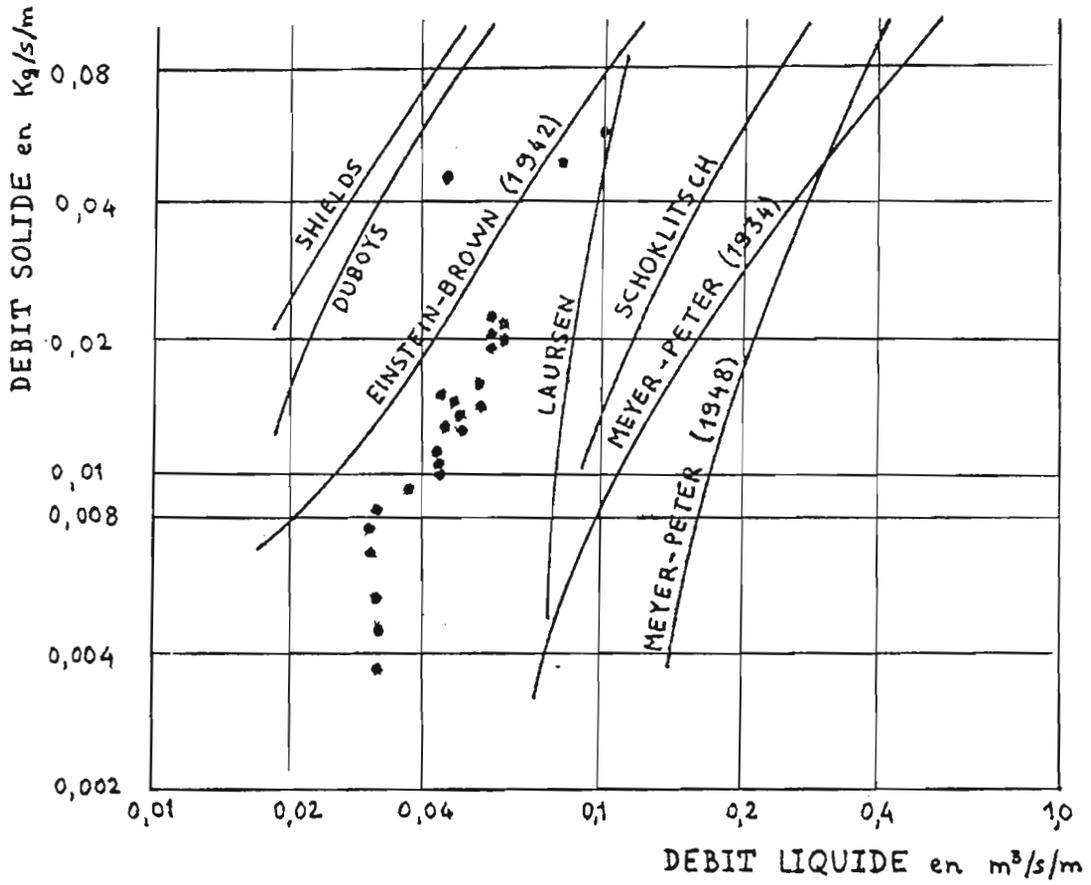


Fig. 40

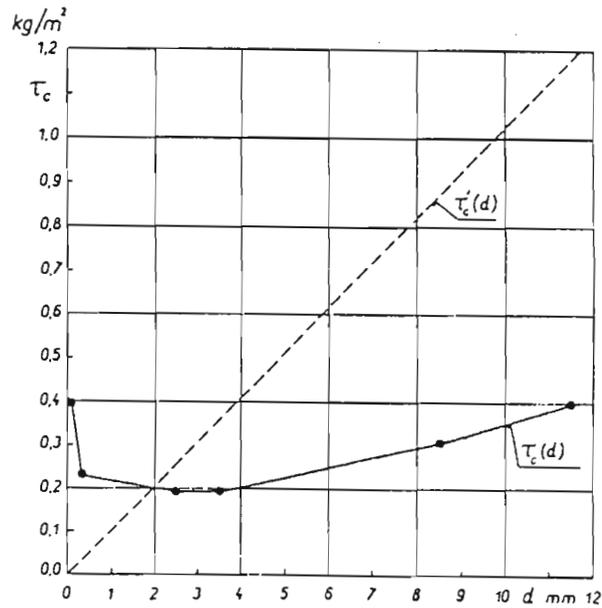


Fig. 4I : Force tractrice critique fonction du diamètre
 — pour un mélange hétérogène : $\tau_c(d)$
 — pour des grains uniformes : $\tau'_c(d)$

En pratique, K_s/K_r est souvent évalué à 0,8 .

Ce qui donnerait : $\frac{q_a}{q_e} \left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2} = a = 0,57$

3-2-2-2 : Calcul de τ_c : choix d'un diamètre caractéristique .

C'est la principale difficulté, τ_c est donné par :

$$\tau_c = \omega_i R_c$$

R_c étant le rayon hydraulique correspondant aux conditions de début d'entraînement .

Mais il est difficile de connaître ces conditions, et ce en raison du caractère sélectif du charriage. En effet, le charriage n'affecte pas indifféremment la masse des matériaux de fond à partir d'un certain débit liquide, mais une partie seulement des matériaux est mise en mouvement, les particules n'étant pas forcément charriées selon leur diamètre. La figure 4I met nettement en évidence ce caractère, les mesures avaient été effectuées à titre expérimental sur modèle réduit .

Dans la pratique, faute d'une meilleure connaissance du phénomène, on est amené à admettre que le diamètre est l'unique facteur de différenciation. La solution la plus logique serait alors de calculer la force tractrice critique pour différents diamètres, puis d'appliquer les formules pour chaque diamètre, et d'en déduire le débit solide total en additionnant tous les débits élémentaires ainsi obtenus. Mais ce serait ignorer complètement l'interaction des matériaux de fond, la mise en mouvement des sédiments fins étant fortement modifiée par la présence de gros éléments .

La solution la plus couramment employée est d'introduire un diamètre caractéristique, mais, sauf pour les lits à granulométries peu différenciées, le choix de ce diamètre reste arbitraire .

Une méthode expéditive consiste alors à évaluer τ_c par :

$$\tau_c = A \omega'_s d_m$$

A dépendant du diamètre moyen d_m des particules charriées .

A partir de prélèvements de fond, on peut calculer un diamètre caractéristique .

Si on choisit le diamètre moyen d_{50} par exemple, on surestime

L'importance des matériaux les plus gros qui ne seront mis en mouvement que pour les débits les plus importants, on est donc amené à choisir un diamètre caractéristique inférieur; d_{35} est souvent conseillé .

Pour une utilisation plus rigoureuse des formules, il faudrait introduire le diamètre moyen des particules charriées, et non un diamètre caractéristique choisi arbitrairement à partir de prélèvements de matériaux constitutifs du lit. Cela suppose évidemment de connaître la granulométrie des éléments charriés. De telles connaissances ne peuvent être approchées que par des mesures visant à évaluer les conditions de début d'entraînement, telles que le prélèvement à la nasse ou l'utilisation des traceurs .

C'est pour cette raison qu'on a toujours, grâce aux formules, un moyen sommaire de vérifier les renseignements quantitatifs obtenus par un autre procédé, ces renseignements permettant, par la même occasion, de contrôler la validité des formules .

C'est pour cette même raison que nous distinguerons les renseignements purement quantitatifs obtenus directement par ces procédés, des renseignements semi-quantitatifs qui permettent plus ou moins d'accéder au débit de charriage par l'utilisation des formules .

3-2-2-3 : Conclusion

Les différents paramètres peuvent être évalués d'une façon plus ou moins approximative, voire même arbitraire, suivant les données d'observation dont on dispose. La précision obtenue par application des formules dépendra largement de celle avec laquelle on aura déterminé ces paramètres .

De toute façon, l'erreur relative ainsi introduite est sans commune mesure avec les risques d'extrapolation au-delà des limites de validité des formules. Ces dernières doivent être maniées avec la plus grande prudence et, dans tous les cas, les résultats obtenus doivent faire l'objet d'une confiance très limitée .

On comprendra en particulier pourquoi ces formules s'appliquent très mal aux conditions voisines du début de charriage .

3-3 : MODELES REDUITS A FOND MOBILE

Dans le cadre d'une étude d'aménagement important, il peut être fait appel à un modèle réduit à fond mobile qui permettra d'étudier le mouvement des matériaux de fond. Mais ce procédé très coûteux n'est pas susceptible de généralisation .

Les échelles géométriques étant fixées, on détermine les conditions de similitude hydraulique et cinématique avec la vraie grandeur par des calculs assez complexes que nous ne décrirons pas ici .

L'étalonnage du modèle consiste alors à déterminer, à l'aide de relations de similitude, les caractéristiques du matériau destiné à représenter sur le modèle le sédiment naturel. Afin de respecter les similitudes hydrauliques et les conditions d'échelle de temps du modèle par rapport à la vraie grandeur, on est amené à utiliser des matériaux de densité inférieure et de dimensions supérieures à celles du sédiment naturel. Par exemple, on utilise souvent l'anhracite (densité 1,35) pour simuler le sable naturel (en général de densité 2,5) .

Il convient ensuite de vérifier le choix correct des caractéristiques du matériau, et éventuellement de corriger ce choix. Ce contrôle ne peut se faire que par des mesures in situ. Toutes les données recueillies sur le terrain sont utiles, aussi bien les renseignements qualitatifs tels que direction de déplacement des matériaux, que semi quantitatifs tels que conditions d'entraî- nement des matériaux .

La C N R (Compagnie Nationale du Rhône) avait figuré sur deux modèles réduits, représentant chacun 5 km du parcours fluvial, les aménagements pro- jetés de Montélimar. Les dépôts recueillis aux extrémités aval des modèles ont correspondu aux charriages obtenus par application de la formule de Meyer Peter .

On peut citer aussi l'exemple, maintenant classique, du résultat tout à fait remarquable obtenu pour la fosse à graviers de Livron, sur la Drôme : le modèle réduit avait permis de prévoir un volume d'accumulation de 280.000 m³, l'observation des dépôts après deux ans de fonctionnement a éva- lué ce volume à 230.000 m³ .

Mais disons qu'en général, malgré des lois de similitude très élaborées, le passage à la vraie grandeur reste difficile. La méthode ne peut s'appli- quer qu'à des lits indéfiniment affouillables .

3-4 : PRELEVEMENTS A LA NASSE

L'évaluation du charriage au moyen de nasses est de loin l'idée la plus ancienne. Nous ne nous attarderons pas trop sur ces procédés car, autant le dire tout de suite, ils n'ont jamais donné de bons résultats, du moins quantitatifs. Cependant, ils ont permis de mettre en évidence certaines caractéristiques intéressantes du phénomène de charriage.

3-4-I : Les nasses

Les premières nasses étaient de simples caisses grillagées dont la face dirigée vers l'amont était seule ouverte, permettant ainsi de capter les matériaux qui passent dans sa section (fig. 42). Ce type de nasse est encore couramment employé .

Depuis, d'autres nasses ont été mises au point, mais le principe reste le même; certaines nasses retiennent les matériaux par filtrage, d'autres par décantation. Citons parmi les plus perfectionnées la nasse Helley-Smith, U.S.A. (fig. 43) et la nasse B T M A, de conception hollandaise (fig. 44), utilisées toutes deux pour les charriages de sables .

3-4-2 : Utilisation des nasses

Les mesures peuvent être faites, soit sur une seule section et en plusieurs points répartis sur la section, dans ce cas, il convient d'éviter d'opérer au niveau d'une mouille ou d'un seuil, soit sur plusieurs sections d'un secteur fluvial .

On opère à partir d'un pont, d'une plate-forme flottante ou d'un bateau; les équipements sont très lourds .

La nasse est immergée, laissée sur le fond du lit pendant un temps T très variable, puis remontée; les matériaux prélevés sont séchés et pesés (poids P). Le débit solide dans l'emprise de la nasse est donné simplement par $Q_s = P/T$. La mesure peut être répétée plusieurs fois en chaque point .

Notons enfin que les manoeuvres sont assez délicates, surtout au moment du relevage. Les mesures sont impraticables pour des vitesses de courant supérieures à 3 ou 4 m/s .

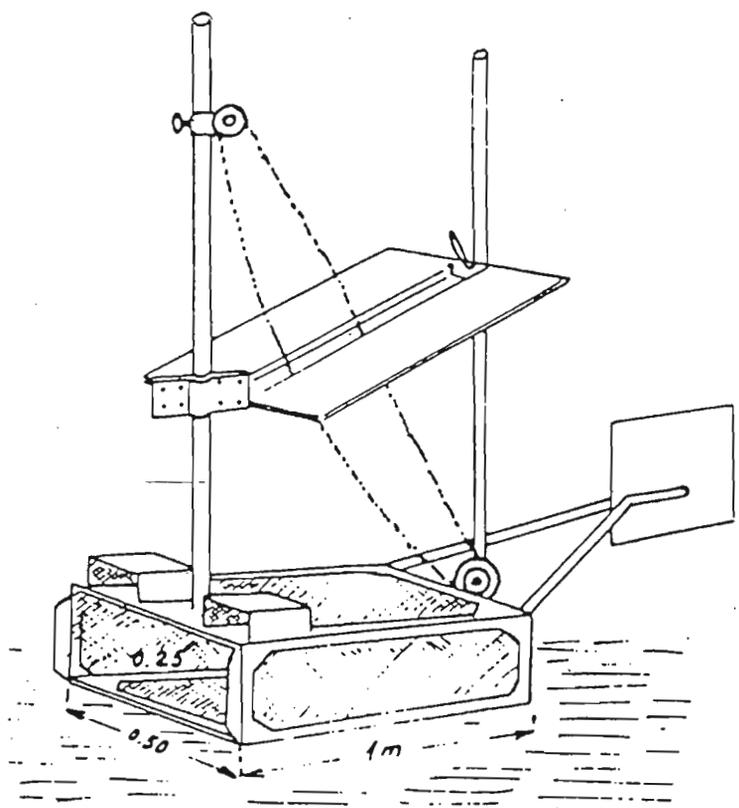
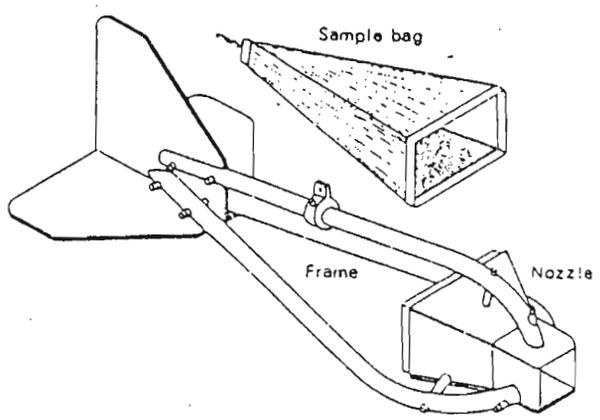


Fig. 42 : Nasse
d'Ehrenberger

Fig. 43 : Nasse
Helley-Smith



Helley-Smith bed load sampler.

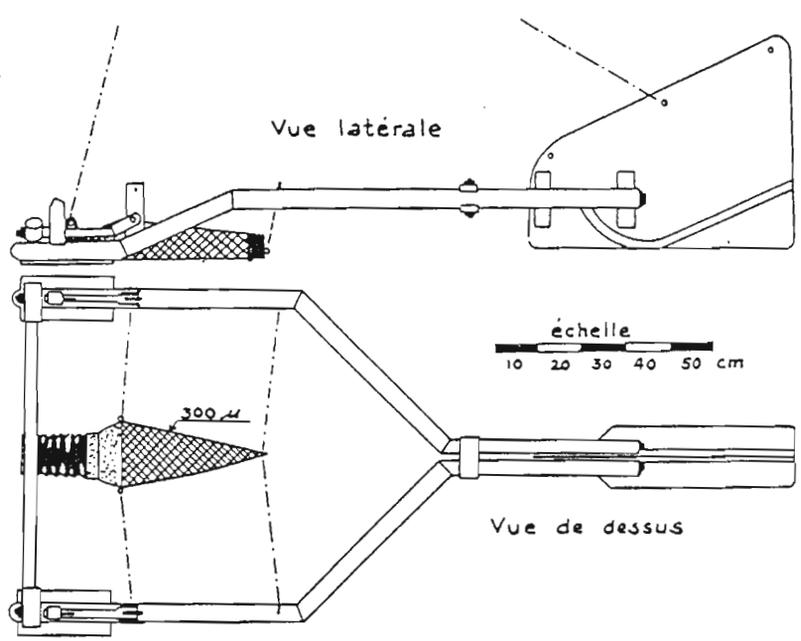


Fig. 44 : Nasse
B.T.M.A.

3-4-3 : Coefficient d'efficacité

L'inconvénient de ces appareils est que leur présence a un effet perturbateur qui modifie les conditions naturelles de transport .

On définit le coefficient d'efficacité d'une nasse comme le rapport de la quantité de matériaux captés à celle qui serait normalement passée dans sa section d'entrée en son absence. Ce coefficient est déterminé en laboratoire à partir d'un modèle réduit de l'appareil. Son choix s'avère difficile et entraîne toujours une certaine imprécision .

Les principaux facteurs qui affectent le coefficient d'efficacité sont :

- La difficulté d'obtenir un bon contact avec le fond. Pour les lits caillouteux, l'appareil est inutilisable .
- Le phénomène d'affouillement au voisinage du nez de l'appareil .
- Les perturbations du champ de vitesses causées par l'appareil : le coefficient d'efficacité diminue au fur et à mesure du remplissage de l'appareil, ce qui impose de procéder à des corrections qui altèrent la précision des mesures .
- La sélection des particules opérée par la nasse : en raison des risques de colmatage, on n'utilise pas de mailles inférieures à 0,3 mm . Les particules fines, qui peuvent parfois intervenir dans une proportion non négligeable, ne sont jamais captées .

Signalons quand même que bon nombre de ces problèmes ont été résolus sur les nasses modernes (B T M A et Helley-Smith par exemple), mais que leur utilisation est limitée à des lits de sables (on comprendra facilement pourquoi), leur efficacité restant bonne tant que le sac n'est pas trop rempli .

3-4-4 : Faiblesse de la méthode

De nombreuses expériences ont mis en évidence la faiblesse de la méthode appliquée à l'évaluation quantitative du charriage : témoin celles de Pontélopulos qui, dans les années 1960, a cherché à évaluer le débit de sable du Danube près de Bratislava .

Il utilisait pour les mesures directes une nasse à parois grillagées de grande contenance. Deux modèles réduits du fleuve au voisinage de la section de mesure avaient été réalisés à deux échelles différentes .

La courbe de variation du débit solide en fonction du débit liquide (fig. 45) avait pu être obtenue de quatre façons différentes .

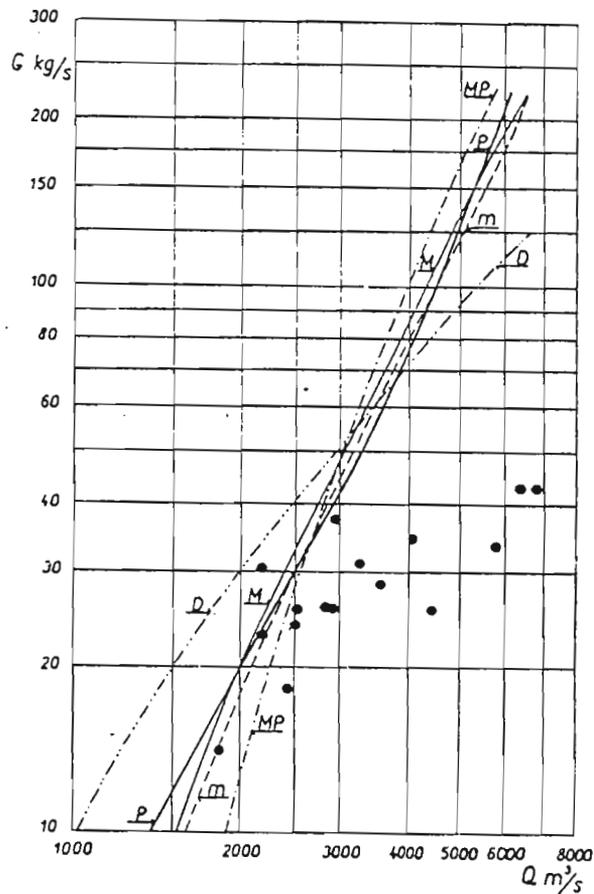


Fig. 45

Par le petit modèle (courbe m), par le grand modèle (M), par la formule de Meyer Peter (MP), enfin, par la méthode de l'auteur basée sur une étude en canal expérimental (P). On constate que les quatre courbes sont très voisines, ce qui permet d'avoir une quasi certitude sur la valeur réelle du charriage .

De nombreuses mesures ont été faites à la nasse pour différentes valeurs du débit liquide. Pour chacune, la nasse était immergée pendant une ou deux heures, l'opération étant répétée en différents points de la section. Les résultats pour chaque "jaugeage" sont représentés par des points sur le graphique .

Des expériences d'immersion de longue durée (12 à 36 heures) en un point de la section ont permis de tracer la courbe D . Même pour cette dernière, la précision reste très médiocre .

La comparaison entre les résultats obtenus en un même point pour ces temps d'immersion très variables ont abouti à la conclusion que deux heures d'immersion sont nécessaires pour avoir une chance sur deux de ne pas dépasser une erreur de 25 % .

3-4-5 : Variabilité spatio-temporelle du phénomène de charriage

Mais les expériences de mesures par prélèvement à la nasse sur les rivières à lit de sables ou de graviers n'auront pas été inutiles puisque toutes les déductions s'accordent à démontrer les phénomènes suivants :

- que le mouvement des matériaux de fond s'effectue d'habitude par bandes étroites qui changent de position suivant le débit liquide,
- que le débit solide subit en chaque point du lit d'importantes fluctuations, même si le débit liquide reste le même,
- que, pour les lits de sable, le charriage progresse souvent par déplacement lent de dunes, la valeur du débit solide variant fortement suivant la position d'un point considéré par rapport à la crête de la dune .

Fortes de ces constatations, les méthodes actuelles semblent miser plutôt sur une précision statistique par des prélèvements nombreux et de courte durée (30 secondes à 2 minutes), les mesures portant sur plusieurs sections d'un tronçon de cours d'eau. Les nasses modernes sont spécialement étudiées pour ce genre d'utilisation .

3-4-6 : Conclusion

Les nasses ne peuvent donner que des informations approximatives sur le débit de charriage, mais elles fournissent des renseignements précieux sur les conditions de début d'entraînement des matériaux et la composition granulométrique des éléments charriés .

Dans l'exemple du Danube, ces valeurs avaient été déterminées à partir des prélèvements à la nasse pour le calcul par la formule de Meyer Peter, ce qui se passe de commentaires .

3-5 : LES TRACEURS

Les traceurs sont des sédiments marqués dont on peut suivre le mouvement. Leur marquage se fait soit à la peinture, soit à l'aide d'une matière fluorescente, soit par irradiation. Les plus couramment employés pour la mesure du charriage sont les traceurs colorés et les traceurs radioactifs. On utilise comme support soit des sédiments prélevés dans le lit du cours d'eau, soit des matériaux artificiels, et dans ce dernier cas, ils doivent avoir les mêmes caractéristiques que les éléments transportés .

3-5-I : Les traceurs colorés

3-5-I-I : Principe et limites de la méthode

Seuls les matériaux grossiers peuvent être marqués à la peinture. Cette méthode trouvera donc son application exclusivement dans l'étude du charriage des cours d'eau à fonds caillouteux ou graveleux. Elle ne peut pas être utilisée pour de grandes profondeurs ou en eaux troubles en raison du repérage visuel. L'avantage est que la méthode permet d'effectuer les mesures dans des conditions très défavorables, telles que crues violentes .

Avant la crue, des graviers ou galets de diamètres différents sont numérotés, puis immergés à espacements réguliers sur toute la largeur de la section. On repère leur position après le passage de la crue. La principale difficulté consiste à retrouver les cailloux enfouis ou charriés sur de longues distances .

3-5-I-2 : Renseignements obtenus

3-5-I-2-I : Evaluation quantitative du charriage

Le poids des matériaux charriés ayant traversé la section pendant la durée de la crue peut être évalué théoriquement par :

$$Q = \rho \cdot l \cdot L_m \cdot E_m \quad \text{en tonnes}$$

ρ = poids spécifique du matériaux (T / m³)

l = largeur utile du transport en mètres

L_m = longueur moyenne du transport en mètres

E_m = épaisseur moyenne en mètres

Mais la précision d'un tel système s'avère très médiocre .
D'abord en raison de l'erreur introduite dans l'évaluation de L_m . Le plus souvent, les cailloux marqués qui ne sont pas retrouvés sont justement ceux qui ont été emportés le plus loin. Ensuite, parce que E_m est pratiquement impossible à évaluer .

Pour se faire une idée de l'imprécision de la méthode, citons une expérience effectuée récemment sur un torrent corse : le Fium'Orbo. 250 gros galets ont été immergés; après le passage de la crue, seulement 25 galets ont été retrouvés. E_m a été supposé égal à 0,60 mètre par suite de la position de deux galets enfouis qui ont pu être retrouvés. Cet exemple n'est pas un cas isolé .

3-5-I-2-2 : Renseignements semi-quantitatifs

On enregistre les variations de cote du plan d'eau pendant la crue, et surtout son maximum auquel correspond un certain rayon hydraulique R_{max} . Par comparaison entre le diamètre minimal des éléments restés en place et le diamètre maximal des éléments déplacés, on peut trouver le diamètre pour lequel les conditions d'entraînement initial correspondent à R_{max} , et donc la force tractrice critique d'entraînement pour ce diamètre :

$$\tau_c = \omega i R_{max}$$

L'opération, répétée pour plusieurs crues, permet de calculer la valeur de τ_c pour différents diamètres .

Notons que pour chaque crue, on peut déterminer la granulométrie des éléments charriés et que, en mesurant la longueur du transport pour les matériaux déplacés, on peut obtenir d'autres renseignements semi-quantitatifs .

3-5-I-3 : Conclusion

L'emploi des traceurs colorés ne nécessite aucun équipement spécial . Ils peuvent donner une approximation très grossière du charriage dans des conditions où les procédés classiques sont mis en défaut (torrents de montagne à fonds caillouteux). Pour les cours d'eau à lits de graviers auxquels les formules sont applicables, ils peuvent permettre un bon étalonnage de ces dernières .

3-5-2 : Les traceurs radioactifs

3-5-2-1 : Introduction

Introduits en 1955, les traceurs radioactifs sont largement utilisés depuis dans toutes les sciences qui ont trait à la dynamique sédimentaire . A ses débuts, la méthode, appliquée à la mesure du charriage, ne donnait lieu qu'à des déterminations semi-quantitatives; citons les expériences de Ramette et Heuzel dans le Rhône. Ce n'est que vers 1960 qu'Eriksson proposa d'appliquer la méthode d'intégration dans le temps, utilisée alors en hydraulique pour les mesures de débit liquide, à la détermination quantitative du charriage. Depuis, plusieurs chercheurs se sont penchés sur le problème et en particulier Courtois, du C E A (Commissariat à l'Energie Atomique) de Saclay, en France, à qui l'on doit la méthode de bilan des taux de comptage .

3-5-2-2 : Fabrication et emploi

3-5-2-2-1 : Les isotopes utilisés

Ils sont tous émetteurs de rayons γ . Un isotope est caractérisé par l'énergie du rayonnement qu'il émet et sa durée de demi-vie. L'isotope sera choisi en fonction de ces deux caractéristiques donc, d'une part de l'enfouissement possible du traceur qui doit avoir une énergie suffisante pour être détectable, d'autre part de la durée de l'expérience ou de la répétition possible des détections .

Les isotopes utilisés et leurs caractéristiques sont réunis dans le tableau ci-dessous :

Nom	Isotope	demi-vie (jours)	Energie γ (MeV)
Or	^{198}Au	2,7	0,41
Chrome	^{51}Cr	27,8	0,32
Iridium	^{192}Ir	74	0,34
Scandium	^{46}Sc	84	1,00
Tantale	^{182}Ta	115	1,00

Signalons que l'Or est utilisé exclusivement pour des études préalables à une expérience de traceurs .

3-5-2-2-2 : Marquage des sédiments

Les techniques de préparation des traceurs radioactifs ont été mises au point en premier lieu grâce au C E A. On peut dire qu'actuellement le marquage ne pose plus de problème .

Au cours du marquage, chaque particule reçoit une certaine activité en Curies (Ci) qui correspond au nombre de photons γ qu'elle est susceptible d'émettre par seconde .

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ photons / s.}$$

- Les galets : Leur marquage se fait par incorporation. On introduit un fil radioactif dans un trou borgne foré dans le galet; le trou est ensuite rebouché. Le plus souvent, on utilise le ^{182}Ta à grande énergie pour compenser l'absorption d'énergie par le galet. Courtois conseille, pour des raisons de sécurité, de ne pas immerger plus de 400 galets d'activité $100 \mu\text{Ci}$ par unité .
- Les sables et graviers : La plupart du temps, on utilise le marquage massique. L'élément activable est introduit dans du verre en fusion qui est ensuite refroidi, puis broyé à la granulométrie désirée, et enfin irradié. Le choix du verre permet d'ajuster la densité du matériau à celle du sédiment naturel. La masse totale immergée sur un site d'expérience est variable, 1 kg en général pour les sables. Une activité de 10 Ci paraît être tolérable .

3-5-2-2-3 : Immersion

Pour la sécurité des opérateurs, les manipulations doivent se faire à distance, ce qui nécessite l'emploi d'un matériel très lourd .

L'immersion elle-même se fait par déversement direct à partir de la surface pour les galets. En ce qui concerne les sables, on doit éviter la dispersion des grains en cours de chute. A cet effet, on utilise un appareil spécialement conçu pour déposer les sables directement sur le fond (fig. 46)

On ne doit pas procéder à l'immersion en période de crue, les matériaux pouvant être entraînés très loin avant d'atteindre le fond .

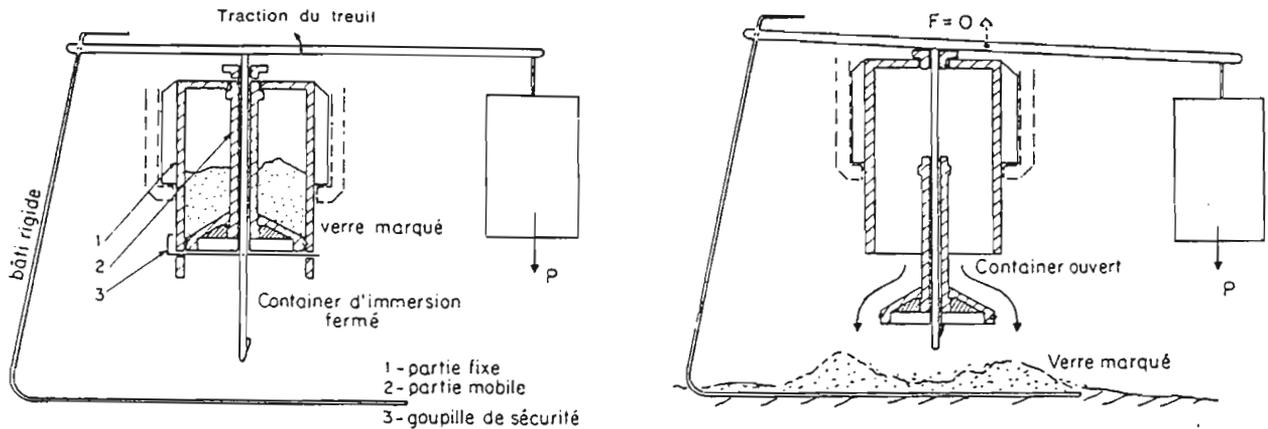


Fig. 46 = Principe d'un immerseur de sable

3-5-2-2-4 : Détection

La sonde est composée d'un détecteur à scintillations monté sur traîneau. Un système intégrateur enregistreur recueille en surface, par l'intermédiaire d'un câble de liaison, les indications du détecteur et fournit une valeur moyenne de l'activité de fond. Les galets sont localisés à l'aide d'une sonde de large emprise et leur détection se fait individuellement .

D'une manière générale, il existe deux systèmes pour suivre l'évolution d'un phénomène dynamique. Ils seront appliqués aux charriages de sables :

- Observation lagrangienne : les sables immergés se dispersent pour former un nuage radioactif dont on étudie la forme, sa déformation étant considérée comme négligeable pendant le temps de détection. Le traîneau est alors remorqué par une embarcation dont le trajet est déterminé de façon à explorer la totalité du nuage .
- Observation eulérienne : elle consiste à déterminer l'évolution de l'activité en fonction du temps dans une section située en aval du lieu d'injection. La sonde est traitée à partir de la rive au moyen d'un treuil dont le mouvement commande le déroulement d'un papier enregistreur. L'opération est répétée jusqu'à ce qu'on n'enregistre plus aucune activité dans la section .

3-5-2-2-5 : Utilisation sur les modèles réduits

Les traceurs radioactifs sont utilisés efficacement dans la phase de contrôle des modèles réduits. Ils permettent de suivre les mouvements des matériaux de fond et de vérifier leur bonne concordance avec les mouvements constatés sur le terrain .

Pour les mesures au laboratoire, on emploie des radio-éléments de très courte période (quelques minutes à quelques heures). L'expérimentateur dispose de générateurs d'isotopes, surnommés "vaches à radio-éléments", desquels il peut extraire très facilement le radio-élément fils qui sera utilisé pour l'expérience. Des scintillateurs portatifs sont employés pour la détection .

3-5-2-3 : Les méthodes de mesure quantitative

Nous ne parlerons pas des études de mouvement de matériaux qui ne présente aucun problème particulier .

Bien entendu, tous les renseignements obtenus à l'aide de traceurs colorés peuvent l'être a fortiori par l'emploi des traceurs radioactifs, ces derniers permettant en outre d'effectuer des mesures en eaux troubles ou par fortes profondeurs (expériences dans le Rhône déjà citées) .

Mais les traceurs radioactifs constituent un instrument beaucoup plus puissant puisqu'ils permettent une évaluation quantitative correcte du charriage, pour laquelle, comme nous l'avons vu, les méthodes manquaient jusqu'à présent .

3-5-2-3-I : Les méthodes d'intégration dans le temps

Ces méthodes, très courantes pour la mesure du débit liquide, sont d'une application difficile à la mesure du charriage. Elles ne peuvent être utilisées que pour les charriages de sables .

3-5-2-3-I-I : Méthode par dilution ponctuelle

En un point du cours d'eau, on injecte une masse M de traceurs, d'activité totale A . Dans une section située suffisamment en aval pour que les conditions de bon mélange soient respectées, on enregistre les variations de la concentration C du traceur dans les sédiments charriés .

On démontre que le débit de charriage Q est :

$$Q = \frac{M}{\int_0^t c dt} \quad t = \text{temps au bout duquel on n'enregistre plus d'activité}$$

Les conditions de bon mélange sont satisfaites si :

$$dM/M = dQ/Q$$

dM étant la masse de traceurs transportés par le débit dQ d'un élément de section élémentaire .

En pratique, la distance de bon mélange est difficile à estimer .

Dans le cas des traceurs radioactifs, on doit raisonner, non par sur des masses, mais sur des activités. Pour une activité a , le détecteur reçoit un certain nombre de chocs par seconde n . La première équation devient :

$$Q = \frac{A \cdot F}{\int_0^t n dt} = \frac{A \cdot F}{N} \quad (I)$$

n = taux de comptage du détecteur à l'instant t

N = nombre de chocs totalisés sur le passage de la vague radioactive

F = coefficient d'étalonnage de l'appareil en chocs par seconde pour

$1 \mu\text{Ci}$ par tonne de sédiments

3-5-2-3-I-2 : Méthode par dilution continue

Le traceur est injecté à un débit constant q avec une concentration C . On mesure assez loin en aval la concentration c en traceurs lorsque celle-ci est devenue constante .

La loi de conservation de la masse injectée est traduite par :

$$q \cdot C = Q \cdot c \quad Q \text{ étant le débit solide}$$

Notons que cette méthode est équivalente à la précédente, l'injection continue pouvant être considérée comme une succession d'injections ponctuelles .

3-5-2-3-I-3 : Influence de l'épaisseur de la couche charriée

Dans l'équation (I), on a supposé F constant, ce qui est une approximation très grossière puisqu'en fait F dépend de l'épaisseur de la couche charriée. En effet :

soit un élément de surface du lit du cours d'eau égal à l'unité .
Pour une activité de $I\mu Ci$, émise à la profondeur z , l'activité absorbée par la couche supérieure de sédiments sera d'autant plus grande que z sera grand, et l'activité reçue par la sonde, donc le nombre de chocs par seconde enregistrés (f), en sera d'autant plus faible .

On est donc amené à définir la loi de réponse de la sonde suivant la profondeur. Une sonde à réponse linéaire est telle que :

$$f = f_0 - k z$$

f_0 et k : constantes caractéristiques de la sonde

f_0 sera donc le nombre de chocs par seconde enregistrés pour une activité de $I\mu Ci$ à la surface du lit .

Par conséquent, le taux de comptage enregistré par la sonde sur cet élément de surface unité et pour une activité unité est donné par :

$$F = \int_0^E (f_0 - k z) dz$$

Il dépend donc de E . Remarquons qu'il traduit bien la dimension déjà indiquée (chocs par seconde pour $I\mu Ci$ par unité de poids, ou unité de volume) .

Pour tenir compte rigoureusement de l'épaisseur de la couche charriée, il est fortement conseillé d'utiliser deux sondes à réponses exponentielles ($f = f_0 e^{-\alpha z}$), on établit alors simplement un système d'équations dans lequel on peut calculer E , et le débit de charriage réel .

3-5-2-3-2 : La méthode d'intégration dans l'espace

On utilise l'observation lagrangienne décrite ci-dessus. Dans l'intervalle de temps séparant deux détections du nuage, on peut calculer la vitesse moyenne V_m du transport. Le débit de charriage est obtenu par :

$$Q = \rho \cdot l \cdot V_m \cdot E$$

Q = débit en Tonnes par jour

ρ = poids spécifique du sédiment en Tonnes par m^3

l = largeur du transport en mètres

V_m = vitesse en mètres par jour

E = épaisseur de la couche charriée en mètres

Le problème consiste à évaluer E

3-5-2-3-2-1 : Cas des sables

Deux procédés sont possibles

- Par prélèvement de carottes, mais le procédé est à bannir : d'une part parce qu'il nécessite l'immersion d'une activité très importante, il est donc essentiellement destructif, d'autre part parce qu'il évalue l'épaisseur aux seuls points de prélèvement des carottes, qui peut être différente de l'épaisseur moyenne .
- Par la méthode de bilan des taux de comptage : elle consiste à calculer le nombre total de chocs par seconde récupérés sur le nuage :

$$N = \iint_S n \, ds$$

ds étant l'élément de surface sur lequel on a recueilli
n chocs par seconde .

N sera d'autant plus important que le nuage est moins enfoui .

Connaissant la loi de réponse de la sonde (sous réserve qu'elle ait été étalonné), on arrive après un calcul relativement simple à une relation entre N , l'activité immergée A et la profondeur moyenne d'enfouissement Z_m , qui peut être évaluée puisque N et A sont connus. Z_m permettra de trouver E . Pour plus de précisions, nous renvoyons à l'article de Courtois et Sauzay cité en référence (I8) .

La méthode a l'avantage de ne nécessiter aucune mise en oeuvre particulière, seul le procédé de calcul diffère. La preuve en est que des mesures anciennes ont pu être ainsi revalorisées. Mais elle suppose que toute l'activité immergée a été détectée, or, il arrive que ce ne soit pas le cas, en particulier, certains sédiments peuvent avoir été remis en suspension .

3-5-2-3-2-2 : Cas des galets

On utilise la méthode du nombre limité de grains, due au même Courtois (réf. biblio I7). Elle consiste à immerger un petit nombre de galets fortement radioactifs qui sont ensuite détectés individuellement en position et en profondeur. Les galets les plus enfouis déterminent l'épaisseur de la couche charriée. Signalons que la méthode peut s'appliquer aux sables de la même manière .

3-5-2-4 : Conclusion

Au terme de cette étude, quelques réflexions nous viennent à l'esprit, dont voici les principales .

Les mesures par intégration dans le temps nécessitent l'observation pendant l'évènement, donc seront plutôt applicables à des écoulements continus. Par contre, les mesures par intégration dans l'espace permettent d'intervenir après coup, donc peuvent être utilisées pour les crues, sous réserve que les matériaux n'aient pas été entraînés trop loin par la crue, et, de ce point de vue, les traceurs radioactifs ne présentent pas une supériorité notable sur les traceurs colorés .

Il reste une faiblesse en ce qui concerne les charriages de matériaux de granulométrie très différenciée caractérisant certains régimes semi-torrentiels. L'évaluation de tels charriages impliquerait des immersions pour les sables et des immersions pour les galets, ce qui obligerait à répéter des opérations déjà lourdes à mettre en oeuvre; de plus, les mesures, forcément effectuées à des époques espacées n'auraient plus grande signification .

Mais ne soyons pas trop exigeants car, outre le cubage des dépôts qui ne peut être appliqué qu'à des cas isolés, les traceurs radioactifs sont le seul procédé qui permette d'obtenir à coup sûr une évaluation quantitative du charriage avec une bonne précision .

On peut ainsi, par comparaison avec les formules, mettre en évidence la faiblesse de ces dernières, s'il en était besoin. Courtois donne les résultats de mesures dans le Cher que nous reproduisons tels quels ci-dessous :

Date de la crue	Méthode de bilan (Tonnes)	Formules	
		Meyer Peter (T)	Kalinske (T)
16 avril 1966	95 ± 20	85	77
21 avril 1966	52 ± 6	110	86
10 mai 1966	33,4 ± 4	49	64
25 mai 1966	33,5 ± 4	29	55

Compte tenu de ce qu'on peut attendre de l'évaluation du charriage par application des formules, on peut considérer que, dans le cas du Cher, elles donnent un ordre de grandeur assez satisfaisant .

Pour se faire une idée des cas extrêmes d'imprécision des formules, on peut citer l'exemple de la Bruche, torrent vosgien pour lequel la formule

de Meyer Peter a donné, sur trois crues successives, une valeur du charriage 20 fois supérieure à celle obtenue par la méthode de bilan des taux de comptage .

3 - 6 : CONCLUSION

Le charriage est un phénomène mal connu. Pour les rivières à lit de sables, la formation de rides ou dunes de fond, qui affectent notablement le débit de charriage, est difficilement prévisible .

En ce qui concerne les cours d'eau à fond caillouteux, généralement composés de matériaux de granulométrie très différenciée, les constatations sont assez déroutantes et ne peuvent donner lieu qu'à de timides hypothèses visant à interpréter l'influence de tel ou tel facteur. Citons en particulier, la pente du cours d'eau, l'existence de particules colloïdales à la base des cailloux et dans leurs interstices, qui rendent ces derniers moins amovibles, les interactions possibles des particules. Il en résulte que pour de tels cours d'eau, la description du phénomène par une formule mathématique semble peu envisageable .

De plus, l'expérience a prouvé que, même à partir de données semi-quantitatives intégrant les différents facteurs, les formules existantes ne permettent que difficilement de passer au débit de charriage et, par suite, on ne peut accorder aux résultats qu'un degré de confiance limité. Seuls les modèles réduits permettent d'accéder indirectement au débit de charriage de façon sûre .

Hormis ce cas particulier, il ne reste donc que le recours à la mesure directe du charriage par les procédés permettant de recueillir des informations sur l'ensemble du phénomène. A ce titre, et compte tenu des réserves que nous avons déjà soulignées, les traceurs radioactifs semblent donner satisfaction. C'est la raison pour laquelle les expériences se multiplient; on en compte déjà plus de deux cents pour la France (depuis 1955). On pourrait craindre leur généralisation bien que les spécialistes s'accordent à affirmer qu'une expérience bien dosée ne présente aucune nuisance .

I V

M E S U R E D E S V O L U M E S D E P O S E S

4 - I : GENERALITES

Cette méthode repose sur des mesures topographiques, pour les matériaux à sec, ou hydrographiques, pour les dépôts sous aquatiques. Les zones de dépôt peuvent être de nature très diverses .

-- Le lit naturel des cours d'eau peut donner lieu à des dépôts localisés. Les dépôts dans les lacs naturels sont mesurés de la même façon que dans les retenues de barrage. Les remaniements du lit à la suite d'une crue occasionnent des dépôts et reprises partiels de matériaux, mais le cubage de ces derniers ne permet pas une évaluation du débit de charriage, il peut seulement donner une idée des capacités de transport par charriage mises en jeu. Cependant, lors de crues exceptionnelles, les matériaux peuvent être abandonnés définitivement par le cours d'eau dans les plaines d'inondation; nous examinerons ce cas sur un exemple .

-- Les fosses à sédiments sont des ouvrages construits exclusivement dans le but de retenir les matériaux transportés. Elles constituent un barrage de petites dimensions .

-- Tous les ouvrages de génie civil susceptibles de provoquer le dépôt des matériaux peuvent faire l'objet de mesures. Signalons aussi les plages d'atterrissement pour les gros matériaux, aménagées dans le lit de certains torrents de montagne, ^{qui} permettent d'obtenir des indications précieuses sur les débits de charriage, si peu accessibles à la mesure directe au cours du transport pour de tels cours d'eau .

Evidemment, il ne nous est pas possible ici d'examiner chaque cas, aussi ne nous intéresserons nous qu'à l'étude de l'envasement des retenues de barrage. Quelques résultats obtenus en Tunisie, où le problème apparaît particulièrement aigu, nous permettront de discuter de la qualité des mesures effectuées aux stations par la méthode du prélèvement à la bouteille, et d'en expliquer partiellement les causes d'imprécision .

4 - 2 : LES PLAINES D' ALLUVIONNEMENT

Les dépôts dans les plaines d'inondation ne sont appréciables que lorsqu'ils sont occasionnés par des crues à caractère catastrophique, de courte durée, et de période de retour extrêmement grande .

La mesure du volume des dépôts donne une évaluation par défaut des quantités de matériaux transportés lors de ces phénomènes paroxysmaux. Elle permet cependant de mettre en évidence l'extrême variabilité du transport solide dans les régions les plus vulnérables .

La crue du 27 mars au 1er avril 1973 de l'oued Medjerda en est un exemple caractéristique. Après retrait des eaux, des dépôts ont été observés sur une superficie de 470 km^2 dans la basse vallée de l'oued. Le relevé des épaisseurs d'alluvions déposées (pouvant atteindre jusqu'à 2 mètres) a permis d'établir une carte des dépôts. Les dépôts ont pu être ainsi évalués à $45 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit un poids total de $80 \cdot 10^6$ tonnes .

L'apport moyen annuel à la station de Medjez El Bab, située en amont de la zone des dépôts, est estimé à $21,5 \cdot 10^6$ Tonnes. Donc, en 5 jours, l'oued a sûrement transporté une plus grande quantité de matériaux qu'en 4 ans (en année moyenne). La période de retour d'une telle crue est estimée à un siècle .

4 - 3 : LES FOSSES A SEDIMENTS

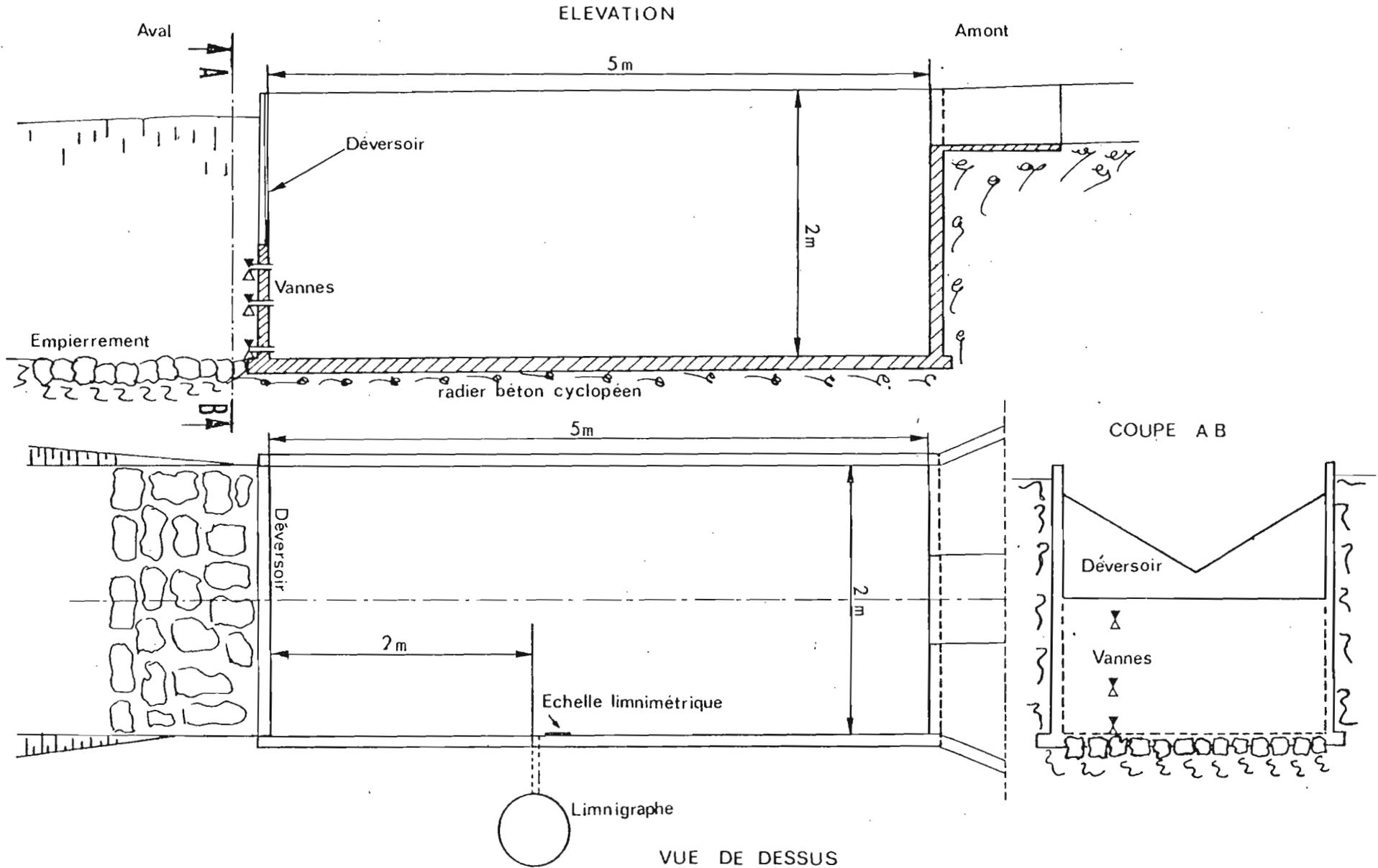
Pour étudier le transport de très petits cours d'eau, on peut avoir recours à l'installation d'une fosse à sédiments (fig. 47) . C'est un grand bac en béton ou parpaings, construit dans le lit du cours d'eau afin que toutes les eaux y transitent. Les eaux s'évacuent par un déversoir surélevé par rapport au fond de la fosse. Les dimensions de la fosse sont fonction de l'importance du cours d'eau, sa longueur doit être suffisante pour permettre, par réduction des vitesses, la décantation de la plupart des matériaux transportés .

Pendant chaque crue, des échantillons d'eau sont prélevés au pied du déversoir, ce dernier ayant été préalablement étalonné pour la mesure des débits liquides. Après la crue, la fosse est vidangée de son eau et d'autres échantillons sont prélevés aux vannes. On égalise alors le niveau des matériaux

Figure 47

PLAN D'UNE FOSSE A SEDIMENT

Echelle 1/40



déposés dans la fosse, puis on mesure leur profondeur en plusieurs points. Des échantillons de terre sont prélevés, puis séchés et pesés de façon à évaluer leur densité. La fosse est ensuite vidangée de sa terre. Le poids de terre déposée peut ainsi être calculé, les échantillons d'eau chargée font l'objet du traitement classique .

Il est évident que ce procédé donne d'excellents résultats puisqu'il permet de mesurer avec précision la totalité du transport. Il est utilisé par l'ORSTOM pour ses bassins expérimentaux .

4 - 4 : MESURE DE L'ENVASEMENT DANS LES RETENUES DE BARRAGE

Nous n'examinerons pas ici les différents procédés de mesure qui ont déjà été décrits par ailleurs (réf. biblio. 38). Disons seulement que la topographie du fond de la retenue est déterminée, soit par photogrammétrie ou levés topographiques traditionnels si la retenue est à sec, ce qui est rarement possible, surtout dans le cas de retenues interannuelles, soit par sondages par ultra-sons si la retenue est pleine. Par comparaison entre le niveau du fond lors de la mise en eau du barrage et le niveau mesuré lors des observations, on obtient le volume des matériaux déposés sur la période considérée. La principale difficulté consiste ensuite à déterminer la densité des dépôts de façon à en évaluer le poids; l'incertitude sur la densité peut être la cause d'une erreur importante .

Bien qu'on ne possède pas toujours de renseignements précis sur la concentration, voire même le volume, des eaux soutirées ou évacuées, la mesure de l'envasement dans les retenues est sans aucun doute la seule méthode qui permette d'obtenir une valeur assez sûre de la totalité de transport sur une longue période. Cette constatation peut donner lieu aux deux remarques suivantes :

— elle intègre la totalité du transport, donc ne permet pas de différencier les apports en suspension des apports par charriage, ce qui a priori n'est pas gênant, mais a pour conséquence qu'on ne peut pas vérifier avec précision la qualité des résultats obtenus par les autres méthodes de mesure. En particulier, si l'on dispose d'une station d'observation en amont et suffisamment proche de la retenue, il est difficile de savoir si les écarts constatés sont dus à l'imprécision des mesures à la station ou à l'influence du charriage .

— Elle donne une valeur cumulée des transports sur plusieurs années, donc les résultats ne permettent pas une interprétation détaillée des phénomènes

Le tableau 48 réunit les résultats de mesures effectuées dans les retenues de six barrages en Tunisie. Si on le compare au tableau 33, on constate que les dégradations spécifiques sont d'un ordre de grandeur tout à fait différent.

Pour le barrage de Nebeur, sur l'oued Mellegue (affluent de la Medjerda) les volumes d'eau soutirés et leurs concentrations sont bien contrôlés depuis sa mise en eau, en avril 1954, avec cependant quelques incertitudes lors des crues exceptionnelles des années 1969 et 1973. Remarquons que les opérations de dévasement ont permis d'évacuer plus de la moitié des apports solides.

Une station contrôlant 9.000 km² du bassin versant (pour 10.300 km² au barrage) a permis d'observer régulièrement le transport en suspension. Les prélèvements étaient faits pour la plupart à la bouteille et au bord du cours d'eau. La même incertitude subsiste pour les années 1969 et 1973.

Le poids des sédiments transportés en suspension à la station depuis la mise en eau du barrage est de III,6I millions de tonnes, soit une sous-estimation de 27% par rapport aux mesures dans la retenue. Or, le bassin versant intermédiaire entre la station et le barrage semble soumis à une forte érosion. Il semble donc ici confirmé que, pour les grands oueds d'Afrique du Nord :

- d'une part la méthode d'observation du transport solide en suspension permet une assez bonne prévision des apports en sédiments dans les retenues, pour peu que les observations puissent être effectuées à chaque évènement,
- d'autre part que le charriage ne doit pas être très important.

Pour les cinq autres oueds, on ne disposait pas d'une station de contrôle à l'amont. Les poids des sédiments évacués sont le fruit d'assez larges estimations, mais ils n'interviennent pas dans des proportions considérables sur le poids total des apports, et l'ordre de grandeurs de ces derniers ne semble pas susceptible d'être mis en doute.

Figure 48

Oued	Surface du bassin (Km ²)	(1) nombre d'années	(2) Poids déposés (10 ⁶ T)	(3) Comblement annuel (%)	(4) Poids évacués (10 ⁶ T)	(5) Apport total (10 ⁶ T)	Dégradation spécifique (T/km ² /an)
Mellegue	10.300	21,33	57,12	0,83	94,92	152,04	695
Nebaana	855	10	15,48	1,50	3,52	19,00	2220
Lakhmess	131	9,33	2,41	2,69	1,09	3,50	2865
Bezirk	82	14,75	2,02	1,76	0,89	2,91	2430
Chiba	64	12	3,18	2,81	0,06	3,24	4220
Masri	40	7,5	1,58	2,58	0,24	1,82	6050

- (1) Nombre d'années entre la mise en eau du barrage et l'observation des dépôts.
- (2) Poids total des dépôts dans la retenue (la densité a été prise égale à 1,2 pour les six retenues).
- (3) Rythme annuel de comblement.
- (4) Poids total des sédiments évacués depuis la mise en eau (Déversements, lâchures par vannes, soutirages divers).
- (5) = (2) + (4) = poids total des apports.

Des prélèvements à la bouteille avaient permis d'estimer les apports en sédiments avant la construction des ouvrages. Les valeurs obtenues par ce procédé ont été très inférieures aux valeurs constatées lors de la mesure des dépôts .

Pour ces oueds de taille modeste, généralement à fortes pentes, il se pourrait qu'une crue moyenne suffise à mettre en suspension des éléments grossiers au voisinage du fond, ce qui expliquerait partiellement la non représentativité d'un échantillon de surface .

C O N C L U S I O N

Dans les régions les moins vulnérables, les dégradations spécifiques peuvent être pratiquement nulles; ainsi, la Seine à Paris transporterait environ $4 \text{ T/Km}^2/\text{an}$. L'observation du débit solide ne se justifie donc que dans des régions assez vulnérables. Nous donnons ici sans plus de commentaire quelques résultats pour ces dernières (Tableau 49) .

La méthode d'observation dépend en grande partie des conditions locales du régime des transports solides, aussi ne reviendrons nous pas ou peu sur la façon de procéder. Mais, dans quelle mesure la précision recherchée justifie-t-elle la mise en oeuvre d'études coûteuses, et dans le cas où elle la justifie, quels sont les moyens dont on dispose pour contrôler la précision des mesures ? Telles sont les principales questions que nous nous sommes posées .

Au niveau d'un grand bassin versant présentant une certaine homogénéité climatique, les débits solides sont en général observés régulièrement, la méthodologie employée est spécifique à chaque région. Or, il nous paraît important d'obtenir une précision satisfaisante afin de pouvoir comparer les valeurs obtenues pour des bassins de dimensions analogues, mais soumis à des régimes différents .

La qualité des observations effectuées à une station est contrôlée, quand cela est possible, par des mesures dans une retenue située en aval. Mais l'influence du dépôt des matériaux charriés ne permet pas d'obtenir une certitude quant à la validité du contrôle. Il nous paraît souhaitable de procéder plus souvent à l'observation granulométrique des dépôts, surtout au niveau du delta formé à l'entrée de la retenue où les vitesses de courants ne sont pas encore suffisamment réduites pour provoquer le dépôt des sédiments fins. On pourrait ainsi savoir dans quelle proportion le charriage intervient en comparant la granulométrie des matériaux déposés à celle des particules transportées en suspension, mesurée à la station .

Dans le même ordre d'idée, il nous semble que la mise en place de stations à l'amont d'ouvrages de plus petite envergure (barrages au fil de l'eau, par exemple) retenant la majorité des matériaux charriés, mais peu d'éléments fins, permettrait d'obtenir de bonnes indications .

Figure 49

Mesure	Cours d'eau	Pays	Lieu de mesure	Bassin versant (km ²)	Dégradation (T/km ² /an
Retenues de barrage	Atbara	Soudan	Khashm El Girba	100.000	800
	Sefif Rud	Iran	Chahbanou Farah	55.000	875
	Durance	France	Serre-Ponçon	3.600	625
	Drac	France	Sautet	990	660
	Romanche	France	Chambon	254	550
Lacs naturels	Rhin	Suisse	Lac de Constance	6.960	616
	Maggia	Italie	Lac Majeur	2.900	466
	Cassarate	Suisse	Lac de Lugano	73	288
Stations d' observation	Colorado	U.S.A.	Iopach	442.000	522
	Mangoky	Madagascar	Banian	53.900	236
	Durance	France	Cadarache	12.000	292
	Pô	Italie	Parme	5.330	130

Les bassins versants représentatifs ou expérimentaux destinés à l'étude des lois de l'érosion justifient des observations coûteuses et précises, les sous bassins de dimensions très limitées permettent l'utilisation de fosses à sédiments. Il nous paraît souhaitable que ce genre d'étude se développe .

S'il s'agit de localiser les zones les plus érodables, étant donné que, pour une même région, les quantités de sédiments transportées peuvent varier dans des rapports de 1 à 1.000 suivant la zone considérée (nous parlons bien sûr des régions très vulnérables) , la précision des mesures aura beaucoup moins d'importance. On cherche avant tout à mettre en place des systèmes pratiques et souples d'emploi qui permettent d'obtenir un ordre de grandeur du transport. En particulier, les appareils de mesure automatique de la turbidité semblent largement employés, malgré les réserves que nous avons déjà exprimées à leur sujet .

Pour les torrents de montagne, il ne paraît possible d'évaluer le débit de charriage qu'en mettant en oeuvre des moyens très coûteux, un modèle réduit à fond mobile par exemple. Dans les cas où l'on possède une valeur sûre des quantités de matériaux charriés (plages d'atterrissement, barrages de correction ou barrages perméables de sédimentation), nous proposons d'utiliser les traceurs à titre expérimental afin de connaître le degré de confiance que l'on peut accorder à ce procédé .

Enfin, il ne faut pas perdre de vue le fait que la mesure du transport solide ne fournit qu'une valeur par défaut de la perte en terre. A ce propos, nous avons calculé, d'après les résultats communiqués par Fournier, la dégradation spécifique à l'échelle terrestre, qui représenterait, en moyenne :

86	T/Km ² /an	pour	l'Europe
280	T/Km ² /an	pour	l'Australie
564	T/Km ² /an	pour	l'Amérique
626	T/Km ² /an	pour	l'Asie
718	T/Km ² /an	pour	l'Afrique

Nous ne détaillerons pas la méthode de calcul adoptée par Fournier, mais, bien sûr, ces chiffres sont susceptibles d'être sérieusement mis en doute, et l'auteur lui-même en est conscient. Cependant, ils indiquent clairement, s'il était besoin de le démontrer, que, du point de vue de l'érosion, nous nous trouvons dans une région privilégiée .

B I B L I O G R A P H I E

Notations

- A.I.S.H : Association Internationale des Sciences Hydrologiques
- N° 53 : Colloque d'Helsinki 1960
- N° 59 : Colloque de Bari 1962
- N° 65 : Colloque de Berkeley 1963
- N°122 : Juillet 1977
- N°133 : Colloque de Florence Juin 1981
- Propiano : Séminaire National de Propiano (Corse)
27-29 mai 1981 "La gestion régionale des sédiments"
- C.H. : Cahiers ORSTOM (office de la recherche scientifique
et technique outre-mer) , série hydrologie
- H.B. : Journal "La Houille Blanche" , Grenoble

Bibliographie

- (1) BESANVAL (G.) : "Généralités sur les débits solides de charriage"
(Ministère de l'Agriculture 1970)
- (2) BILLON (B.) : "Mise au point des mesures de débits solides en sus-
pension (République du Tchad)" (C.H. VolV N°2-1968)
- (3) BRADDEY (T.E.) : "Use of turbidity monitors to assess sediment yield
in East Java, Indonesia (AISH. N°133)
- (4) BRAUDEAU (G.) : "Quelques techniques pour l'étude et la mesure du
débit solide" (H.B. N° Spécial A-1951)
- (5) CAILLOT (A.) : "Les méthodes de marquage des sédiments par des
indicateurs radioactifs" (H.B. N°7 - 1970)
- (6) CAILLOT (A.) : "L'apport des traceurs radioactifs à la gestion des
sédiments" (Propiano)
- (7) CALLEDEH (J.) : "Bassin versant représentatif de Sarki: bilan de 5
années d'observations" (éditions ORSTOM - 1974)

- (8) CARRE (P.) : "Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad" (C.H. Vol IX - N°I - 1972)
- (9) CAVAZZA (S.) : "Experimental investigations on the initiation of bed load transport in gravel rivers" (AISH N°133)
- (10) CLAUDE (J.) : "Observations sur les mesures de transport solide effectuées en Tunisie" (Service hydrologique du Ministère de l'Agriculture tunisien - 1972)
- (11) CLAUDE (J.) : "Les alluvions déposées par l'ouéd Medjerda lors de la crue exceptionnelle de mars 1973" (C.H. Vol XIV - N°I - 1977)
- FRANCILLON (G.)
LOYER (J.Y.)
- (12) CLAUDE (J.) : "Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie, campagne de 1975" (C.H. Vol XIV - N°I - 1977)
- CHARTIER (R.)
- (13) COLOMBANI (J.) : "Contribution à la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension" (C.H. Vol IV - N°2 - 1967)
- (14) COLOMBANI (J.) : "Effets sur les transports solides des ouvrages hydrauliques en Afrique du Nord" (AISH N°122)
- (15) COLOMBANI (J.) : "Dispositif de prélèvement automatique d'un échantillon moyen de transport solide en suspension pondéré par le débit" (AISH N°133)
- FRITSCH (J.M.)
SUSINI (J.)
- (16) COURTOIS (G.) : "Emploi de traceurs radioactifs pour l'étude du transport solide dans les cours d'eau" (Publ. LNH - 1960)
- JAFFRY (P.)
HEUZEL (M.)
- (17) COURTOIS (G.) : "Possibilités d'emploi d'un nombre limité de grains radioactifs dans les études quantitatives de mouvements des sédiments" (Inter. J.A.R.I., 15 - 1964)
- (18) COURTOIS (G.) : "Les méthodes de bilan des taux de comptage de traceurs radioactifs appliquées à la mesure des débits massiques de charriage" (H.B. N°3 - 1966)
- SAUZAY (G.)
- (19) COURTOIS (G.) : "La dynamique sédimentaire et les traceurs radioactifs: point de la situation en France" (H.B. N°7 - 1970)

- B.3 -

- (20) DEMMAK (A.) : "Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale (Thèse de Docteur Ingénieur - Université Paris 6 - 1982)
- (21) EMLET (W.W.) : "Measurement of bed load in rivers" (AISH N°133)
- (22) FAUROUX (G.) : "L'apport des traceurs radioactifs à la gestion des sédiments" (Propiano)
- (23) FOURNIER (F.) : "L'érosion du sol dans les territoires français d'outre-mer" (Editions ORSTOM - 1957)
- (24) FOURNIER (F.) : "Débit solide des cours d'eau, essai d'estimation de la perte en terre subie par l'ensemble du globe terrestre" (AISH N°53)
- (25) GAUTHIER (A.) : "Contribution à l'étude du débit solide et genèse des sédiments au cours de celui-ci" (Propiano)
- (26) GERAEHLING (C.) : "Transport solide et modification du lit d'une rivière à forte pente: la Drôme" (AISH N°59)
- (27) KUNKLE (S.H.) : "Estimating suspended sediment concentration in streams by turbidity measurements" (Journal: Soil and Water cons. Vol 26 - N°1 - 1971)
- (28) MECHIN (M.Y.) : "Contrôle de l'alluvionnement des retenues: quelques et al. exemples types" (comité français des grands barrages - 1982)
- (29) MILLER (C.R.) : "Sediment sampling: Instrumentation and techniques" (ASAE Vol 8 - N°2 - 1965)
- (30) NOUVELOT (J.F.) : "Mesure et étude des transports solides au Cameroun" (C.H. Vol VI - N°4 - 1969)
- (31) NOUVELOT (J.F.) : "Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés" (C.H. Vol IX - N°1 - 1972)
- (32) NOUVELOT (J.F.) : "Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971" (C.H. Vol IX N°1 - 1972)
- (33) FANTÉLOPULOS (J.) : "Recherches expérimentales sur le débit solide du Danube" (AISH N°65)

- (34) PARDE (M.) : "Quelques notions nouvelles ou améliorées sur l'érosion et les transports solides" (AISH N°65)
- (35) PONCET (A.) : "Spécificité des processus d'érosion-sédimentation en montagne" (Propiano)
- (36) QUESNEL (B.) : "Traité d'hydraulique fluviale appliquée" (Tome II Editions Eyrolles)
- (37) ROCHE (M.) : "Hydrologie de surface" (Editeur Gauthier-Villars)
- (38) SARDOUK (Y..) : "Prédétermination de l'envasement dans les retenues de barrage" (Mémoire de D.E.A. Université Paris 6 - 1981)
- (39) TAZIOLI (G.S.) : "Nuclear techniques for measuring sediment transport in natural streams - examples from instrumental basins" (AISH N°133)
- (40) TIXERONT (J.) : "Les réseaux d'observation de l'érosion et du débit
CORMARY (Y.) solide des cours d'eau" (environ 1965)
- (41) VUKMIROVIĆ (V.) : "Mesure des sédiments charriés par les rivières"
VUKOTIĆ (R.) (AISH N°133)
- (42) WITZIGMAN (F.S.) : "Automatic sediment sampling equipment and rapid analysis methods" (AISH N°59)
- (43) ZWAMBORN (J.A.) : "Reproducibility in hydraulic models of prototype river morphology" (H.B. N°3 - 1966)