

HYDROMETRIE

MESURE DE DEBITS LIQUIDES
MESURE DE DEBITS SOLIDES

Borgerhout, 18 Juin 2008

Freddy CUMPS (FHR)

Hydrométrie

Définitions

Hydrométrie ou la mesure de l'eau comprend la description des méthodes de travail et de l'équipement pour mesurer les niveaux d'eau, les vitesses du courant, les débits...

Dans le cadre de cette exposé on se limite à la mesure des vitesses d'eau et des débits liquides et solides pour des rivières à grande dimensions.

Débits liquides et débits solides

Définitions

Le débit liquide est le volume d'eau passant à travers une section d'un cours d'eau pendant une unité de temps (p. ex. 1 seconde).

Le débit solide est la quantité de sédiment (particules, argiles, limons, sables, graviers, ...) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant une unité de temps (p. ex. 1 jour, 1 mois, 1 année).

Débits liquides et débits solides

But des observations

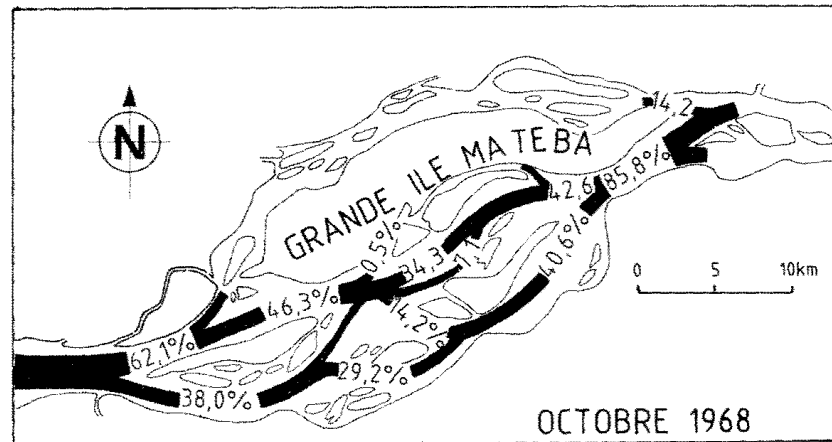
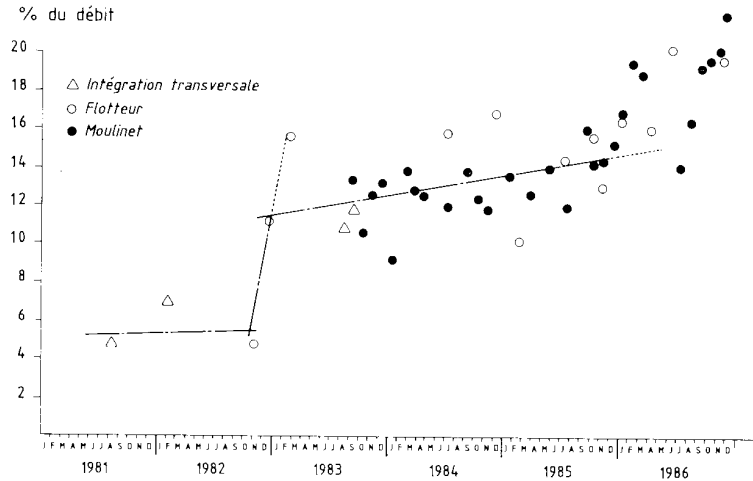
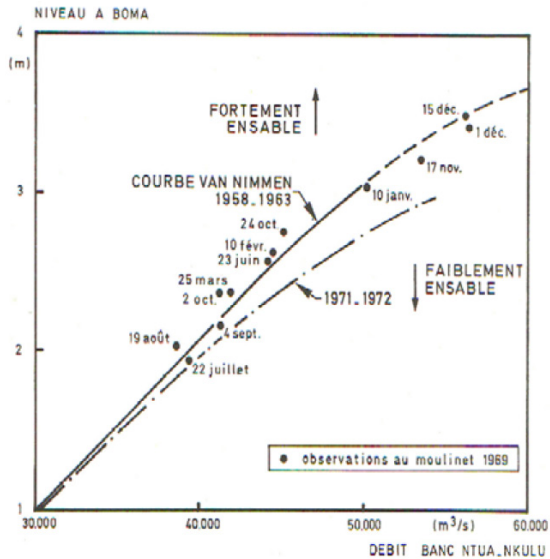
Débit liquide:

- ***Relation débit liquide – niveau d'eau:***
Une série de mesures de débits liquides dans une section de contrôle permet d'établir la relation entre le niveau d'eau local et le débit (courbe de débit). La valeur approximative du débit pour un niveau d'eau quelconque peut ensuite être déduite de la courbe.
- ***La comparaison des débits liquides relevés à intervalles de temps variables*** permet de déceler la fermeture ou l'ouverture de chenaux par lesquelles ils transitent.
- L'évolution de ***la distribution du débit liquide entre les différents chenaux*** mesurée régulièrement est un indicateur pour les changements à la morphologie du système de méandres.

Débits liquides et débits solides

But des observations

Débit liquide:



Débits liquides et débits solides

But des observations

Débit solide:

- Le transport solide des rivières et des fleuves est un processus très important à prendre en compte et sa variabilité spatiale et temporelle est très forte .
- Les modifications de géométrie des chenaux navigables résultent des transport de sable. Ceux-ci modifient la morphologie du fleuve à différentes échelles.
- L'observation systématique s'impose et peut fournir des renseignements importantes sur la grandeur et la répartition du transport dans une section, ainsi que sur le rapport entre transport en suspension et transport en charriage.

Débit liquide : définition

Le débit liquide instantané est le volume d'eau passant à travers une section d'un cours d'eau pendant une unité de temps.

$$Q(\text{débit}) = \frac{V(\text{volume})}{t(\text{temps})}$$

On détermine le débit en intégrant la vitesse sur la section, ou encore en multipliant la superficie de la section mouillée (en m²) par la vitesse moyenne (en m/s) des filets liquides traversant la dite section.

$$\int_A v \cdot dA = v_{moy} \cdot A$$

Débit liquide : méthodes

1. Les méthodes 'volumétriques' permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée.
2. Les méthodes 'd'exploration du champ de vitesse' consiste à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la sections, tout en mesurant la surface de la section mouillée.
3. Les méthodes 'hydrauliques' tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...).
4. Les méthodes 'physico-chimiques' prennent en compte les variations, lors de l'écoulement de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous).

Débit liquide : méthodes

La méthode la mieux adaptée pour la région divagante est la méthode *'d'exploration du champ de vitesse'* d'où les vitesses sont mesurées par moulinet hydrométrique ou par flotteurs de surface.

Débit liquide : définition

$$\int_A u \cdot dA = u_{moy} \cdot A$$

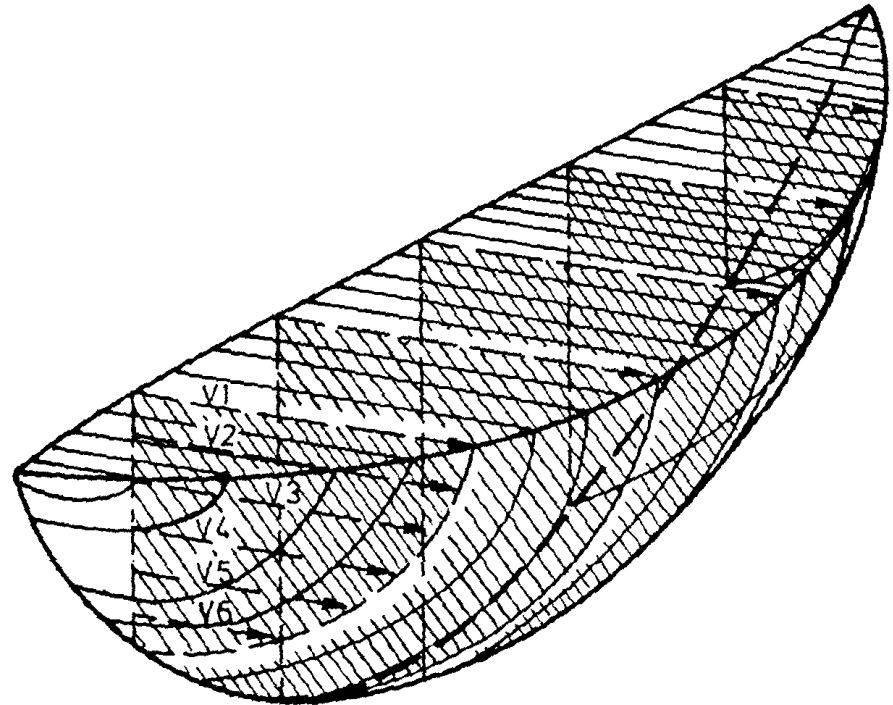
Avec:

u = vitesse locale

dA = aire locale

u_{moy} = vitesse moyenne sur la section

A = aire de la section mouillée totale



Deux éléments sont donc indispensables pour les calculs du débit liquide:

-la géométrie de la section de jaugeage

-les vitesses locales ou la vitesse moyenne

Section de jaugeage: Choix d'une section

La choix d'une section convenable est déterminant pour la précision de la mesure des vitesses locales de l'écoulement.

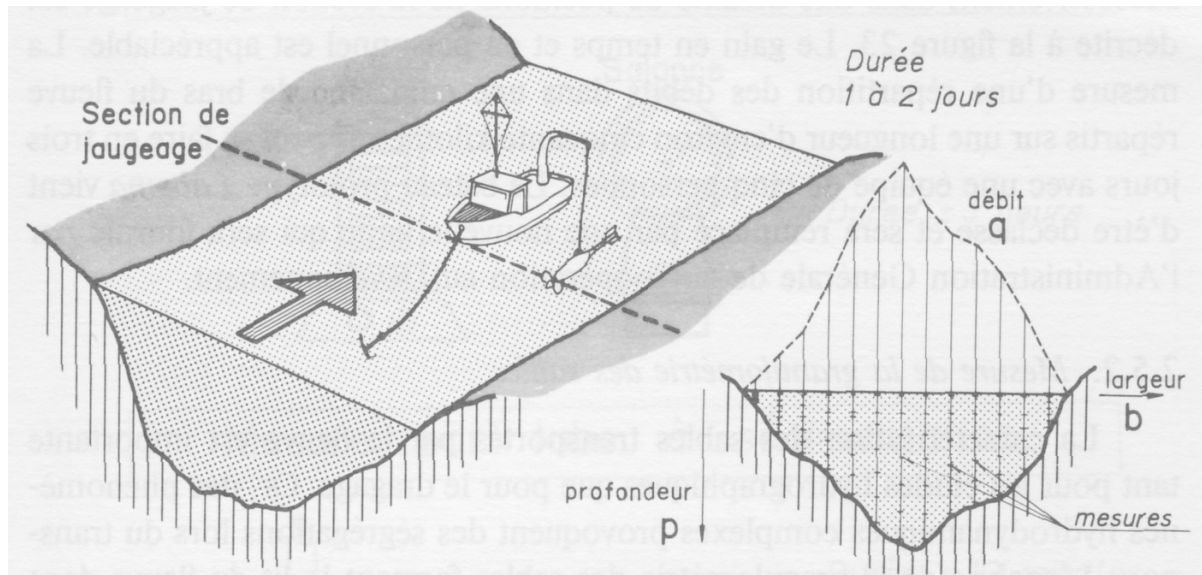
Dans des lits naturels et non rectiligne il se forme, à cause des courbures, des courants secondaires et des remous provoquant des perturbations dans la répartition des vitesses (aussi bien dans l'espace que dans le temps).

La section doit être choisie dans un endroit qui remplit au mieux les conditions suivantes: (voir dia suivant)

Section de jaugeage: Choix d'une section

- 1. La section doit se situer dans un tronçon rectiligne et éloigné de tous ouvrages d'art tels que barrages, piles de pont etc. pour les vitesses soient perpendiculaire à la section.**
- 2. Le lit de la rivière doit avoir un profil en travers autant que possible de forme régulière et stable.**
- 3. La forme du profil en travers de la rivière au voisinage de la section de jaugeage doivent être le plus régulier et le plus constant possible.**
- 4. La courbe de débit $Q = f(h)$ dans la section de jaugeage doit être aussi constante que possible et subissant le moins possible les effets des affluents du cours d'eau principal.
(courbe de débit: voir dia suivante)**

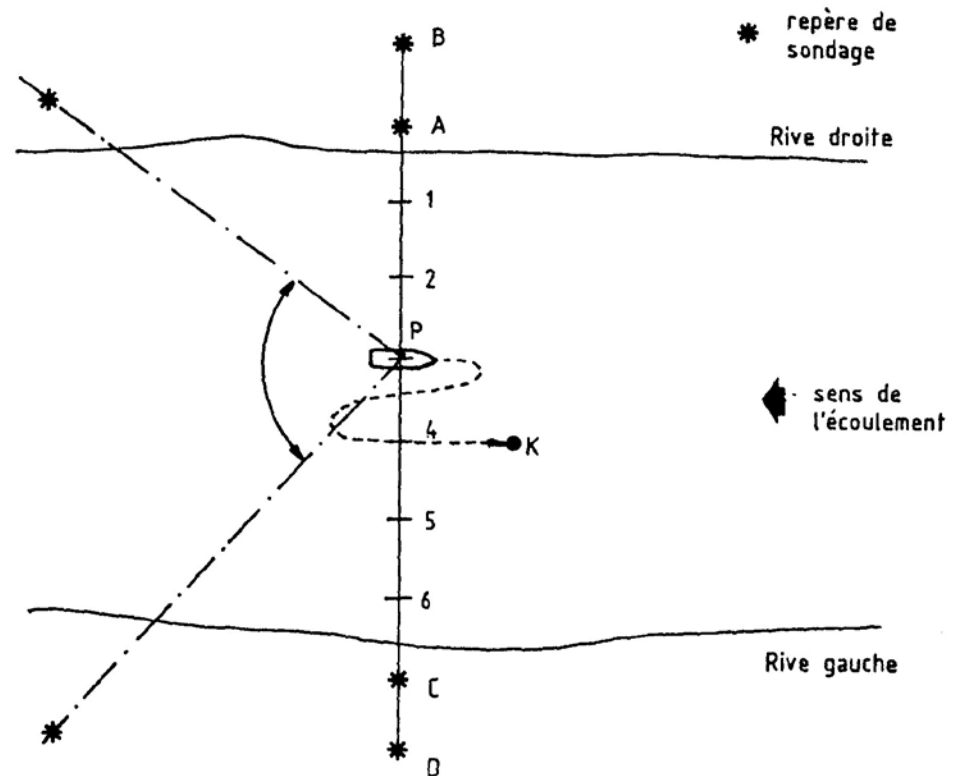
Section de jaugeage: Méthode classique au moulinet Principe



Section de jaugeage: Matérialisation d'une section : méthode classique

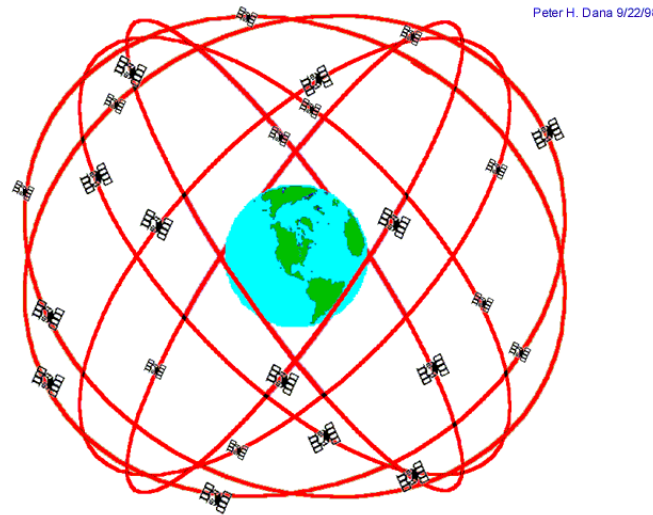
Chaque section est matérialisée par des repères. Sur chaque rive un avant plan (A et C) et un arrière plan B et D) matérialisent l'alignement de la section.

Des repères de sondage (*) placés au voisinage de la section, en amont et en aval, permettent de déterminer la position dans le profil.



Section de jaugeage: Matérialisation d'une section : méthode récentes

Des techniques plus récentes permettent de remplacer les repères de sondage placés au voisinage de la section par des stations de radio positionnement (Syledis) ou par des satellites (GPS)°



GPS

Section de jaugeage:

Détermination de la vitesse : méthodes classiques

La vitesse d'écoulement dans des rivières comparables au Fleuve Congo peut être mesurée au moyen de moulinets hydrométriques ou au moyen de flotteurs.

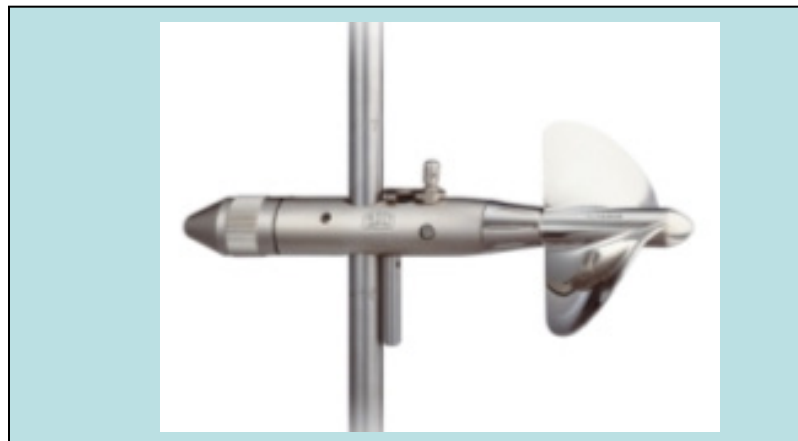
Des techniques nouvelles pour la mesure de vitesses ou de débits liquides ont été développées récemment. Leur application sur le Fleuve Congo ne peut pas être envisagée qu'après des tests approfondis (voir plus loin: Qliner, ACDP...).

Section de jaugeage: Détermination de la vitesse : Moulinets hydrométriques

Appareils de mesurage de la vitesse munis d'un élément rotatif ou rotor.

On distingue deux sortes de rotors: les coupelles et les hélices.

Ce sont les dernières qui sont en usage à la RVM.



Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Equipement

- un davier pour la suspension du moulinet à distance de la coque
- un treuil muni d'un compte-tours permettant la lecture de la longueur de câble dévidé
- un moulinet hydrométrique et ces accessoires. L'ensemble comporte *une hélice, un corps de moulinet* relié à la surface par un fil conducteur, *un plomb-poisson (saumon)* avec contact de fond, suspendu à un câble d'acier et *une queue* muni d'ailerons.
- un chronomètre
- deux sextants et un stigmographe
- un échosondeur

Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Fréquence

Mesures de débit liquide au moulinet

fréquence: mesures à Banc Ntua Nkulu au moins tous les mois

Répartition des débits (mesures aux flotteurs)

fréquence: en fonction de la montée des eaux =

- pour des cotes à l'échelle de Boma de 0 à 2 m: tous les 0,5 m
- pour des cotes à l'échelle de Boma de 2 à 2,9 m: tous les 0,3 m
- pour des cotes à l'échelle de Boma de 2,9 à 3,9 m: tous les 0,2 m

Section de jaugeage: Détermination de la vitesse : Moulinets hydrométriques

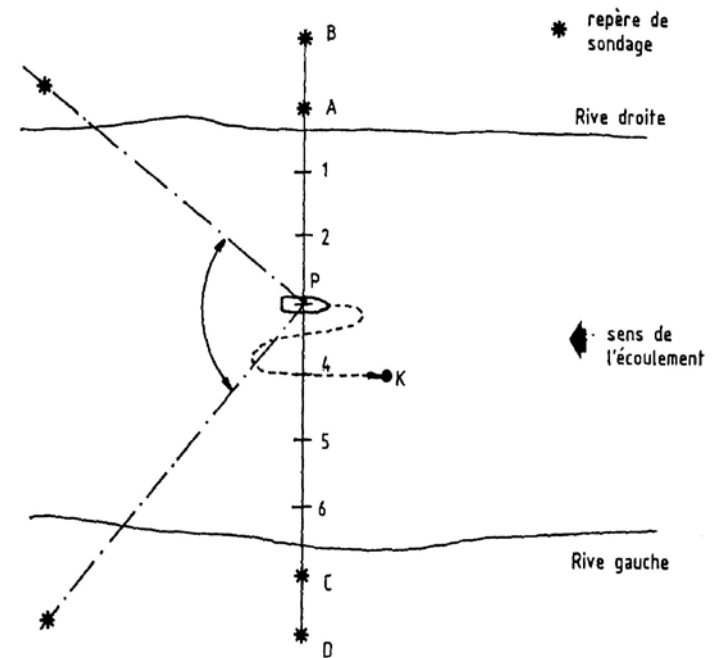
Principe de fonctionnement des appareils à hélices:

- Le principe de fonctionnement repose sur la proportionnalité entre la vitesse locale de l'écoulement et la vitesse angulaire correspondante de l'hélice du moulinet.
- La vitesse d'eau est déterminée par comptage du nombre de révolutions de l'hélice pendant un intervalle de temps donné et par conversion de ce temps en vitesse à l'aide de la table d'étalonnage du moulinet.
- Les moulinets utilisées au bief maritime sont du type OTT C31.

Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Sélection des verticales

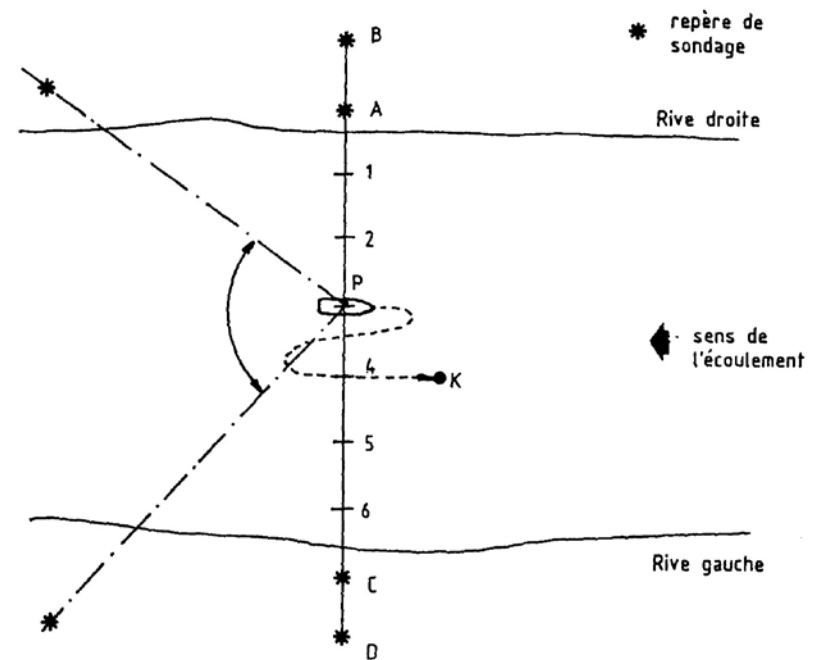
La section en travers est subdivisée en segments par sélection des verticales.

A cause de la grande largeur de la plupart des sections de jaugeage dans la région divagante, les opérations s'effectuent à partir d'un canot hydrographique, mesurant en position fixe (à l'ancre) aux différents endroits (verticales) qui auront été choisis en fonction de la configuration du profil de fond et de la répartition des vitesses.



Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Sélection des verticales

Le nombre de verticales est limité afin de rendre le temps de mesure le plus court possible de façon à ce que le débit varie peu pendant la mesure à cause de la crue et de la marée.

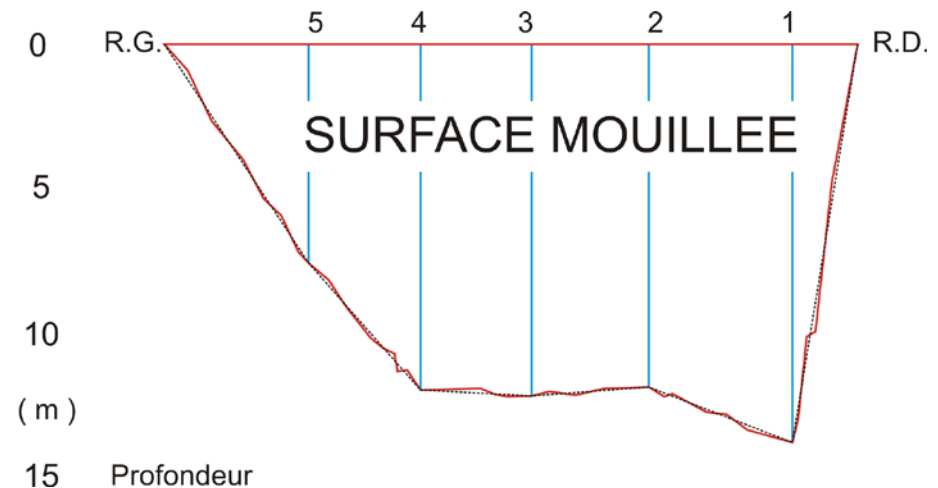


Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Sélection des verticales

L'emplacement des verticales sera choisi en tenant compte des éléments suivants:

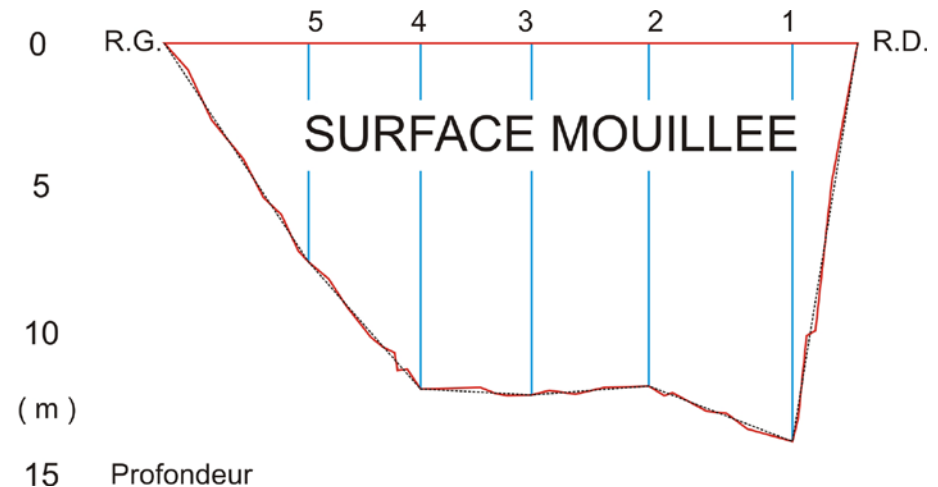
- Diviser le profil en travers en autant de trapèzes rectangles que possible. Chaque trapèze étant limité par un point d'inflexion du lit tel que représenté à l'échogramme et un autre point d'inflexion ou la rive.

- Là où un courant fort a été observé, on augmentera le nombre de verticales, par des verticales intermédiaires.



Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Sélection des verticales

- Il est recommandé d'implanter une verticale proche de chaque rive et de contrôler si la différence de vitesse moyenne entre deux verticales adjacentes ne dépasse pas 20%, et que le débit dans un segment ne dépasse pas à 10% du débit total.



- On essaiera de ne pas dépasser les 100 mètres entre deux verticales.

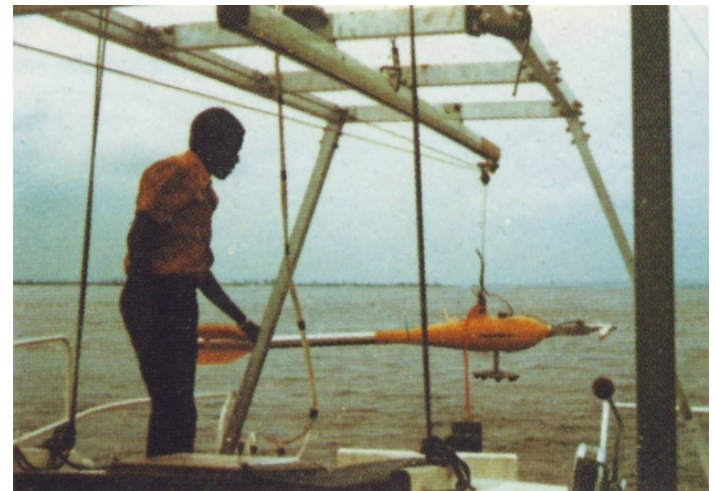
- Si le nombre de verticales est supérieur à 12 (2 jours de mesure), on essaiera d'effectuer les mesures avec 2 embarcations.

Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Mesure de la profondeur

La profondeur est déterminée de la façon suivante.

On descend le moulinet jusqu'à ce que les eaux de surface atteignent l'axe de l'hélice.

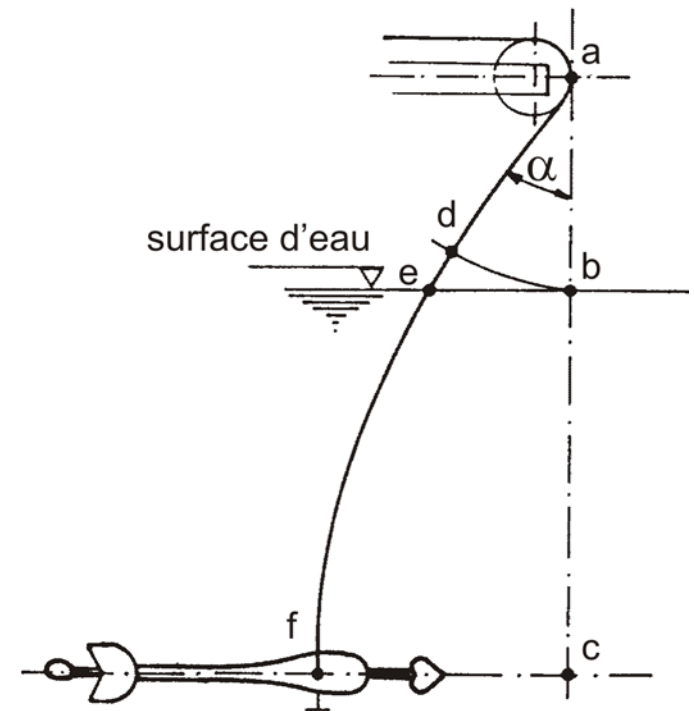
A ce moment le compteur du treuil est mis à zéro et le moulinet est descendu jusqu'au déclenchement d'un signal continu émis par le compteur électronique Z200. Ce signal indique que le contact du fond, qui se trouve à 20 cm en dessous de l'axe du moulinet a atteint le lit de la rivière.



Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Mesure de la profondeur

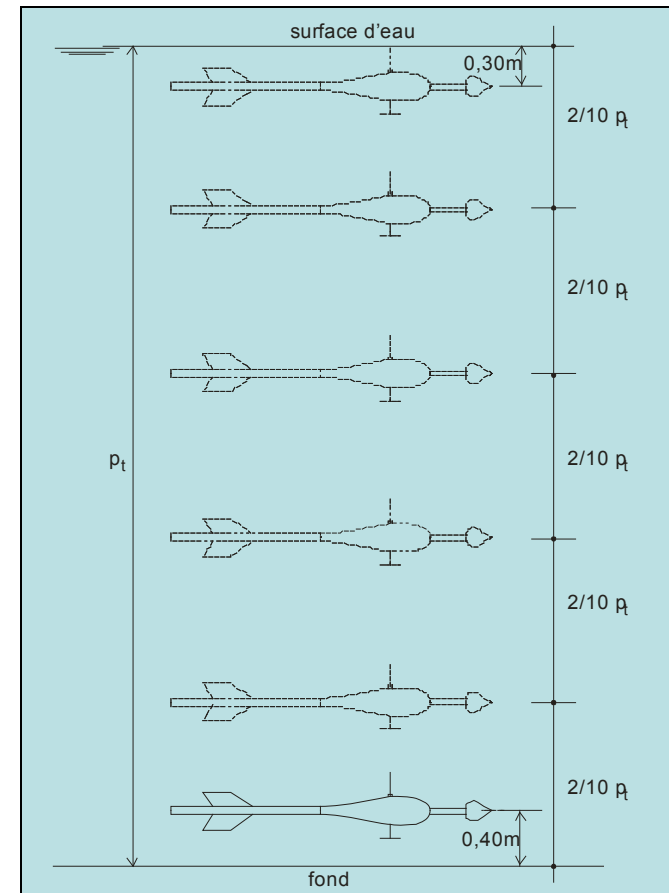
Par forts courants et malgré la dérive du moulinet par le courant à pour conséquence que les profondeurs déduites de la longueur déroulée du câble de suspension sont plus élevées que les profondeurs réelles auxquelles se trouve le moulinet. Une correction s'impose.

L'angle α de l'inclinaison du câble exondé est mesuré avec un clinomètre. Des tableaux de correction donnent les coefficients de corrections en fonction de α .



Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Mesure de la vitesse

- Dans chaque verticale la vitesse est mesurée à la surface, au fond et à 2, 4, 6 et 8 dixièmes de la profondeur.
- La vitesse de surface est mesurée à une profondeur de 30 cm et la vitesse de fond à 40 cm du fond afin d'éviter les effets de paroi ou d'interface.
- Lors de la détermination de la profondeur totale apparente (le contact de fond touche le sédiment) l'axe du moulinet se trouve à 20 cm du fond, l'appareil est ensuite remonté de 20 cm. Les mesures de vitesse débutent à cette profondeur ($p_t - 40\text{cm}$).



Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Mesure de la vitesse

- **Le compteur d'impulsion et le chronomètre sont mis à zéro et l'opérateur peut déclencher la mesure. Au bout de 300 secondes le compte-tours est arrêté et le nombre de révolutions de l'hélice est noté.**
- **Cette même procédure de mesure sera recommencée à 2/10, 4/10, 6/10, 8/10 et 0.3 m de profondeur et ce pour chaque verticale.**
- **Les profondeurs de mesure sont calculées en prenant des dixièmes de la profondeur apparente, c'est-à-dire à la longueur du câble déroulé à partir de la surface plus 0.4 m.**

Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Calcul des vitesses

La vitesse est déterminée à partir du nombre de révolutions de l'hélice à l'aide des tables d'étalonnage qui donnent la vitesse en fonction du nombre de révolutions par unité de temps.

La courbe d'étalonnage peut généralement être approchée avec une précision suffisante par une ou plusieurs droites.

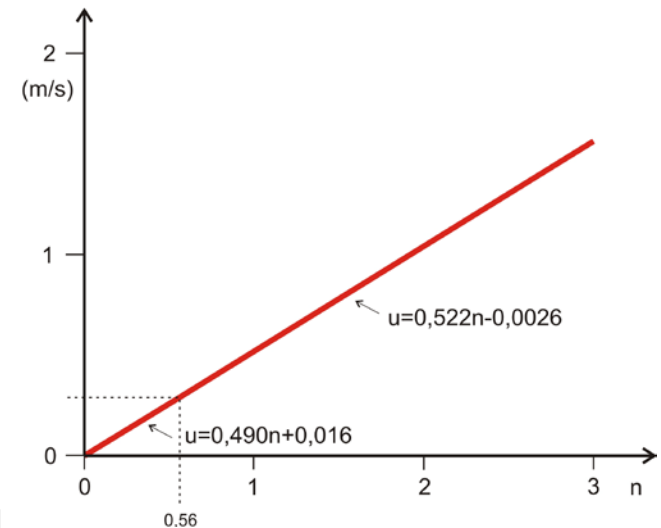
Les formules sont du type : $u = a.n + b$ ou

u = vitesse en m/s

a = constante tenant compte des frottements des mécanismes

b = pas de l'hélice

n = nombre de révolutions par seconde

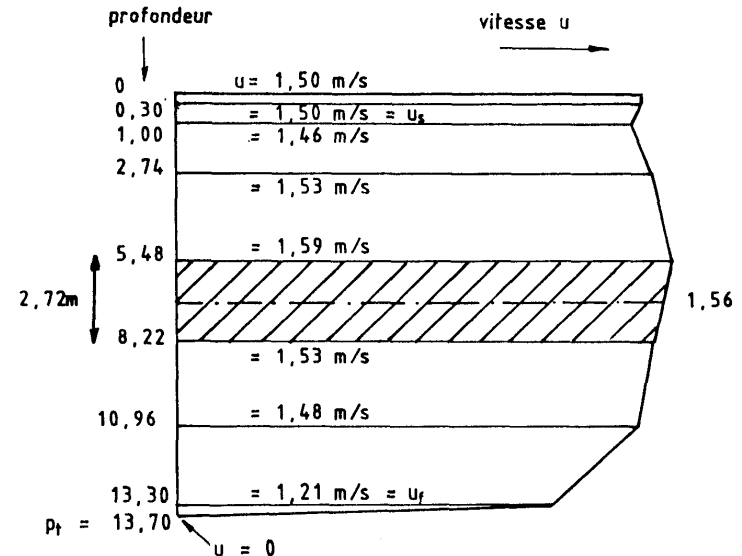


Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Calcul du débit par unité de largeur

Le débit par unité de largeur est le débit passant dans un segment d'un mètre de largeur. Il est déterminé pour chaque verticale en traçant le polygone des vitesses en fonction des profondeurs.

La surface de ce polygone est égale au débit par unité de largeur et est déterminée par planimétrie ou par calcul.

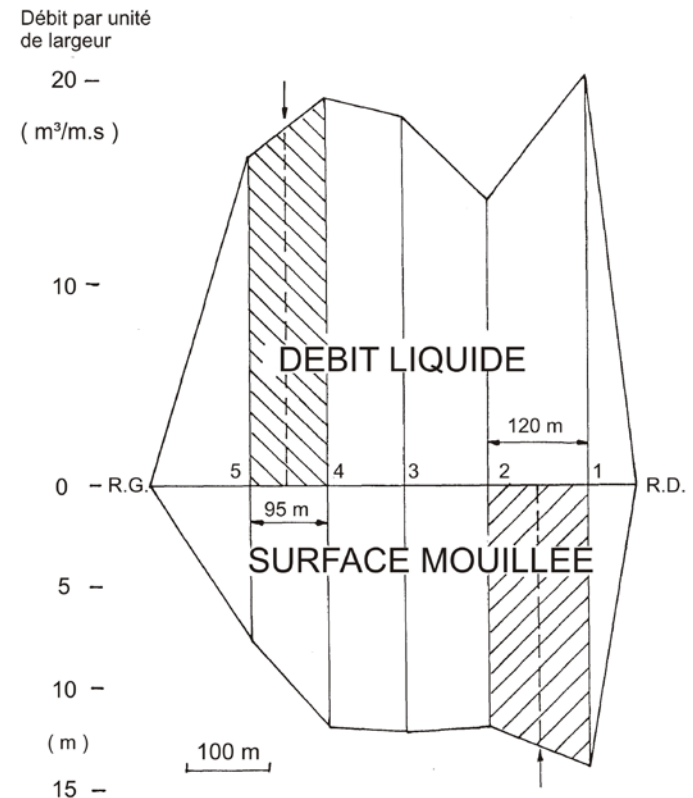
Elle représente le produit $u_m \cdot p_t = q_1$.



Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Calcul du débit total

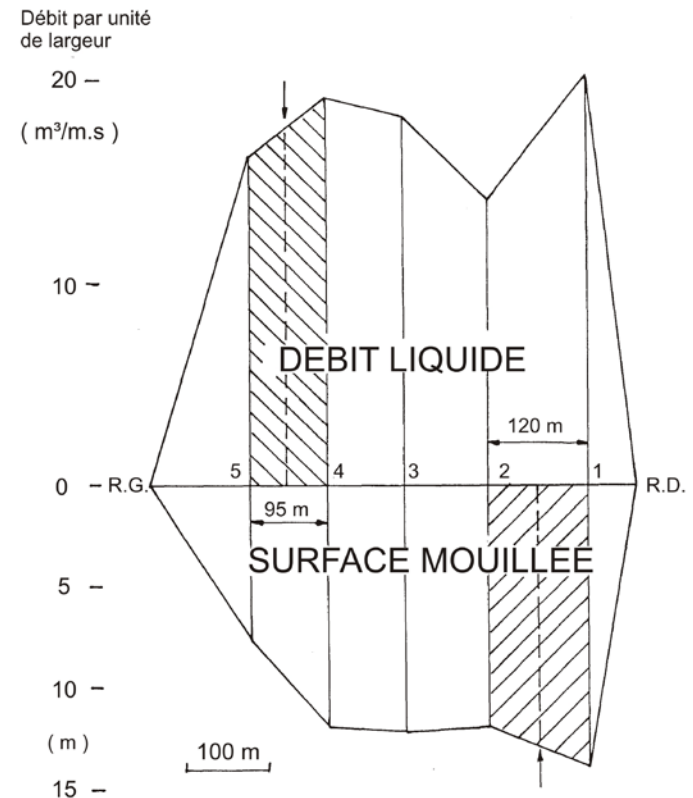
Connaissant les débits par unité de largeur pour les diverses verticales et par l'intermédiaire des distances entre les verticales, les débits dans les segments partiels peuvent être calculés. La sommation des débits partiels donne le débit total dans la section.

Le calcul ou le planimétrage se fait d'une manière analogue que pour les la détermination du débit par unité de largeur .



Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Calcul de la section mouillée

Sur la section en travers on porte verticalement les profondeurs p_t (profondeurs corrigées).
Après avoir joint les points représentant le fond à chaque verticale par des segments de droite, la section mouillée est obtenue par calcul ou par planimétrage de la surface ainsi dessinée correspondant à la somme des trapèzes.



**Mesure du débit liquide:
Méthode classique au moulinet
Calcul de la vitesse moyenne et de la
profondeur moyenne de la section**

Vitesse moyenne de la section:

Cette vitesse s'obtient en divisant le débit liquide par la section mouillée.

Profondeur moyenne de la section:

Cette vitesse s'obtient en divisant la surface mouillée par le largeur de la section.

Mesure du débit liquide: Méthode classique au moulinet Avantages et désavantages de la méthode

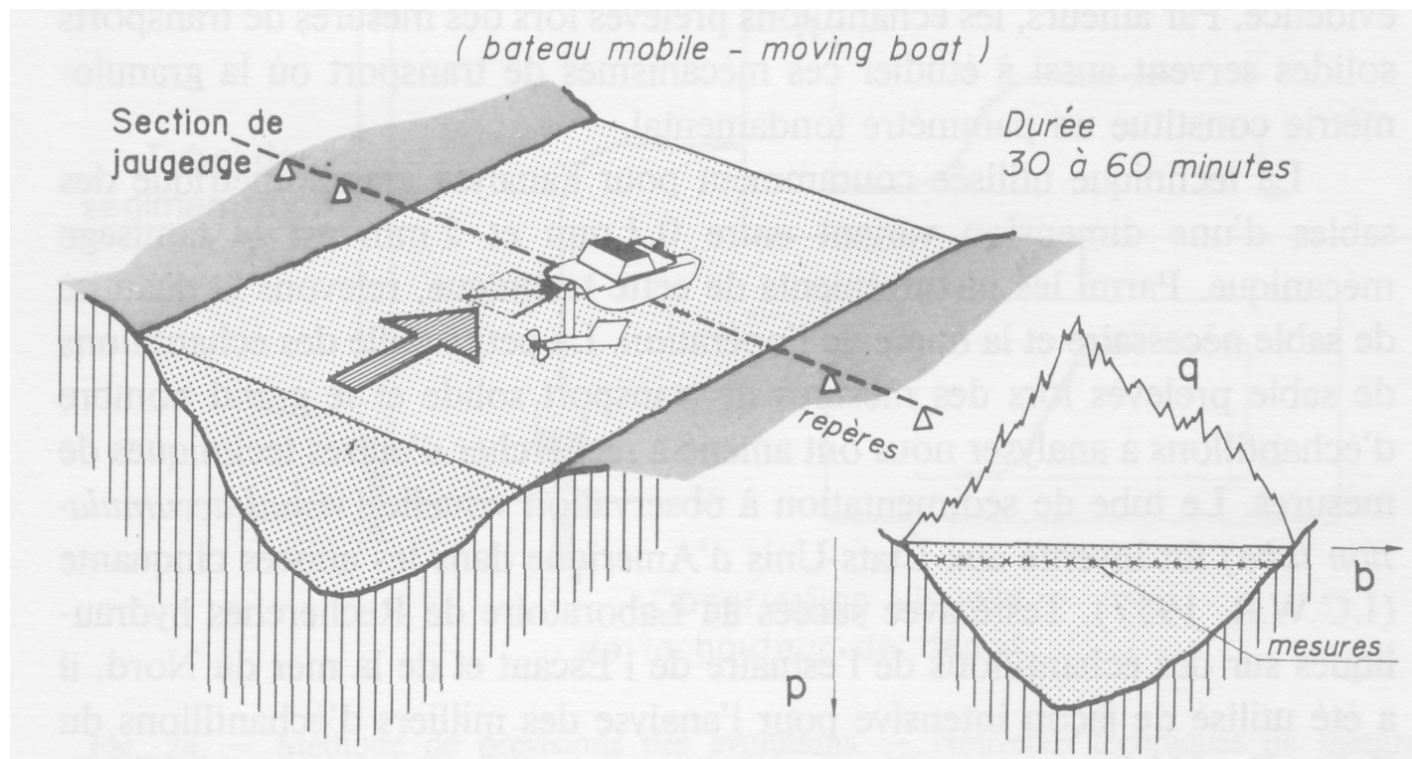
Avantages:

- Le matériel utilisé est d'excellente qualité et donne de très bons résultats
- Le matériel est robuste, fiable et d'une grande longévité
- La mesure s'effectue dans l'entièreté de la section et fournit une bonne image de la distribution des vitesses.

Désavantages:

- L'équipement est très cher à l'achat
- L'équipement est lourd et peu maniable
- La durée des mesures est longue, surtout pour les larges sections
- La mesure demande un bateau spécialement équipé
- Le personnel doit être qualifié

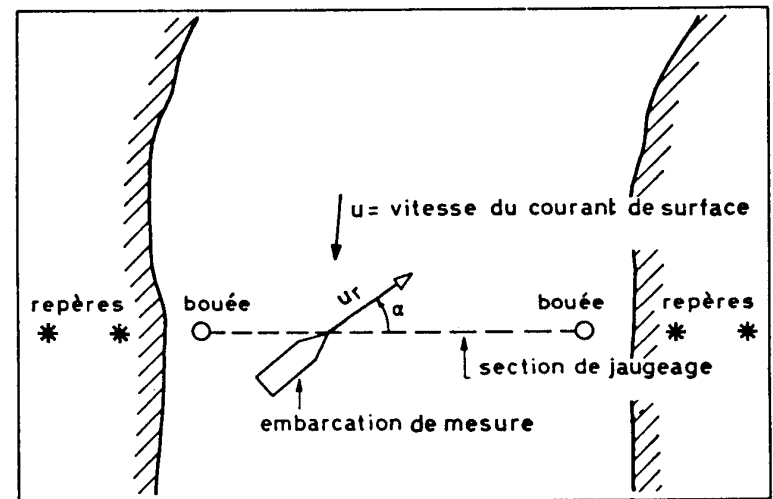
Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Principe de la méthode



Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Principe de la méthode

La méthode consiste à profiler la section de jaugeage, choisie le plus perpendiculaire possible à la direction moyenne des lignes de courant de surface, à l'aide d'une embarcation équipée:

- d'un échosondeur pour déterminer les profondeurs
- d'un moulinet hydrométrique muni d'un appareillage électronique permettant une lecture directe de la vitesse relative u_r de l'eau par rapport au moulinet
- d'un indicateur de direction de l'empennage (angle α) du moulinet par rapport à la direction du profil
- d'un chronomètre



Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Principe de la méthode

Au cours de la traversée, on peut, à tout instant, déterminer, à d'éventuelles corrections près:

- la position du bateau sur le profil transversal: à l'instant t:

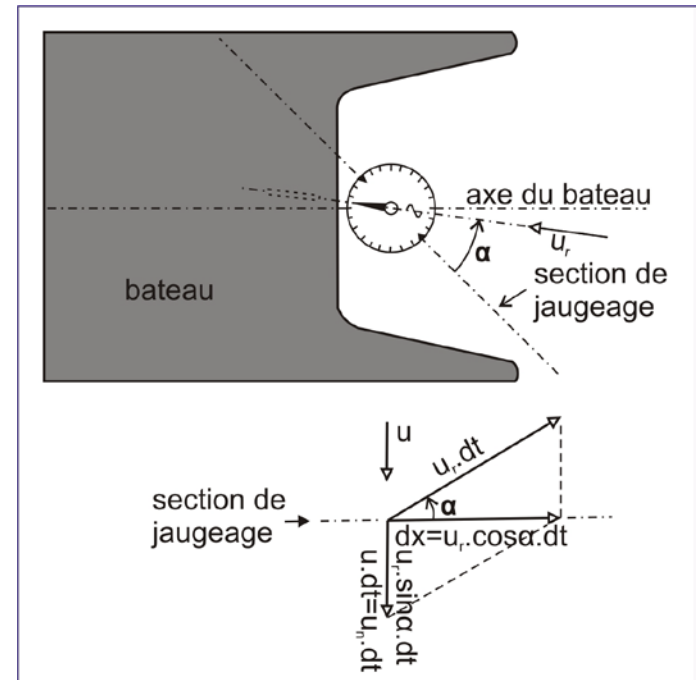
$$\int_0^p r_r \cdot \cos \alpha \cdot dt$$

- la profondeur du fleuve: p_t

- la composante normale à la section de mesure de la vitesse du courant:

$$u_n = u_r \cdot \sin \alpha$$

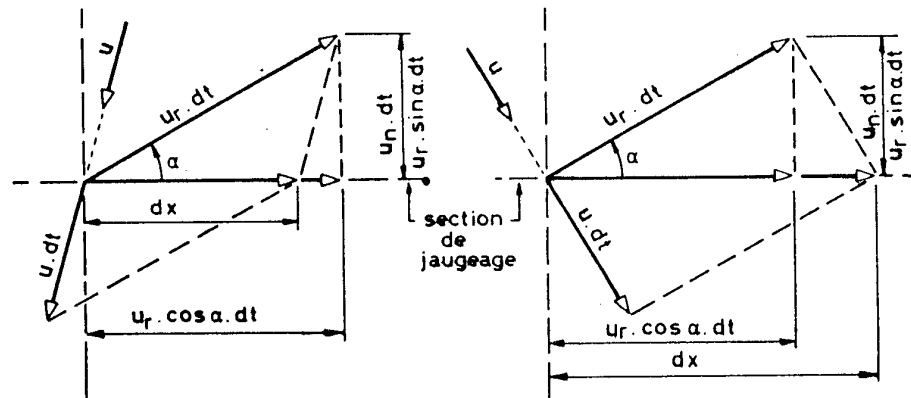
- si le courant est rigoureusement normal au profil de mesure, $u_r \cdot \sin \alpha$ est égal à la vitesse du courant.



Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Principe de la méthode

En pratique, les lignes de courant ne sont ni partout, ni rigoureusement normales à la section de mesure.

Selon l'orientation réelle des dites lignes par rapport à la section, les distances calculées $u_r \cdot \cos \alpha \cdot dt$ sont ou plus grandes ou plus petites que les distances élémentaires réelles dx .



Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Principe de la méthode

L'opération est répétée en reprofilant la section en sens inverse; cette mesure de retour compense en partie certains écarts de la mesure aller et notamment ceux dus à l'obliquité des lignes de courant.

On admet que le débit est la moyenne des résultats obtenues à l'aller et au retour.

Les vitesses sont mesurées à une profondeur fixe, correspondant à l'immersion du moulinet (≈ 1 m) lorsque la section de jaugeage est très profonde. Il faut multiplier les résultats obtenues par un coefficient proche de 0,90, égal au rapport de la vitesse moyenne dans la section et de la moyenne pondérée des vitesses à 1 m profondeur mesurées.

Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Equipment

- **Echosondeur**

- **Empennage avec indicateur.** L'empennage portant le moulinet est attaché à 1 m environ sous la surface de l'eau à un axe vertical. Le moulinet s'oriente librement dans le sens du courant. Son orientation est repérée par un indicateur de direction se déplaçant au-dessus d'un cercle gradué dont le zéro est maintenu par visée dans la direction du profil de mesure. L'angle peut être lu à tout moment.

- **Le moulinet hydrométrique équipée d'un compteur d'impulsions.**

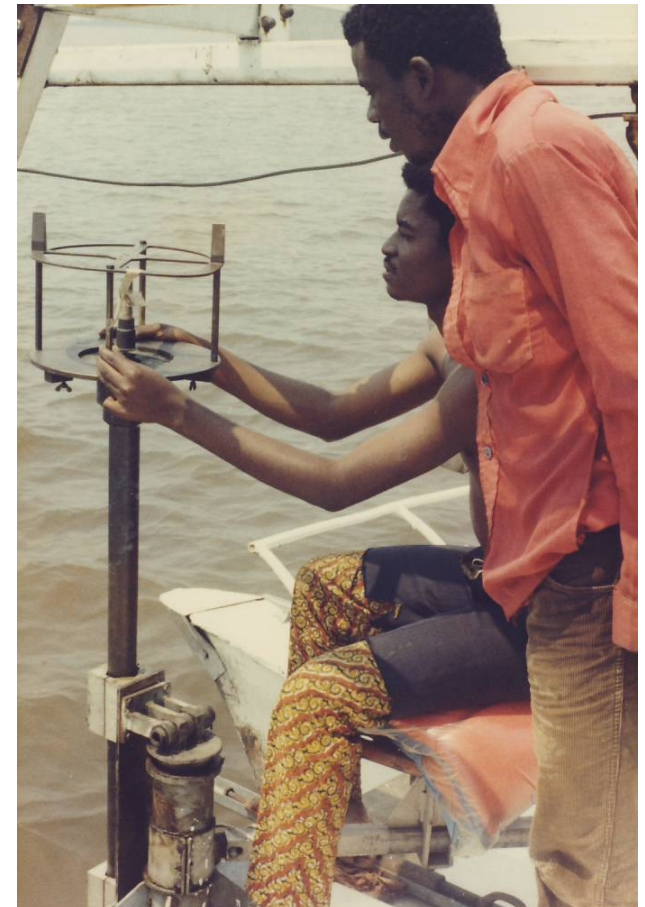
- **Un bouton poussoir permet de donner à des intervalles de temps prédéterminés des impulsions marquant l'échogramme (des tops) et provoquant un signal sonore pour la mesure visuelle de l'angle et de la position du compteur.**

Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Technique de jaugeage

Pour effectuer la mesure, le profil de jaugeage est repéré par des alignements sur les deux rives et délimité par des bouées de travail ancrées près de la rive.

La vedette hydrographique est manœuvrée par un barreur qui maintient l'embarcation dans le profil de jaugeage.

Il adapte continuellement la vitesse aux indications de l'opérateur qui mesure l'angle α , de façon à garder celui-ci voisin de 45° .



Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Technique de jaugeage

Un 'top' est donné plusieurs fois par minute et enregistré sur l'échogramme; le compteur totalisateur du moulinet est relevé à chaque top et l'angle estimé entre 2 tops.

La traversée au retour se fait immédiatement après dans les mêmes conditions de travail qu'à aller.



Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Dépouillement et calculs du débit

Bien le calcul est possible avec des moyens modestes le nombre des données très élevés et l'application des corrections demande l'usage d'un PC avec imprimante (vérification visuelle des résultats).

On déterminera entre 2 tops consécutifs, $n=1$ et n :

- le temps de parcours t_n ;
- la profondeur moyenne p_m lue sur l'échogramme;
- l'angle α_n moyen;
- le nombre de tours de l'hélice du moulinet d'où l'on déduit la vitesse relative moyenne u_m correspondante ainsi que ses composantes $u_{rm} \cdot \sin \alpha_n$ (\approx vitesse du courant) et $u_{rm} \cdot \cos \alpha_n$ (\approx vitesse de profilage).

Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Dépouillement et calculs du débit

La surface mouillée **A** est alors supposée égale à:

$$\frac{1}{2} \left[\left(\sum_0^n P_n \cdot u_{rm} \cdot \cos \alpha_n \cdot t_n \right)_{\text{aller}} + \left(\sum_0^{n'} P_{n'} \cdot u_{r'm} \cdot \cos \alpha_{n'} \cdot t_{n'} \right)_{\text{retour}} \right]$$

Le débit **Q** est alors supposée égale à:

$$\frac{1}{2} \left[\left(\sum_0^n P_n \cdot u_{rn}^2 \cdot \cos \alpha_n \cdot \sin \alpha_n \cdot t_n \right)_{\text{aller}} + \left(\sum_0^{n'} P_{n'} \cdot u_{rn'}^2 \cdot \cos \alpha_{n'} \cdot \sin \alpha_{n'} \cdot t_{n'} \right)_{\text{retour}} \right]$$

Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Dépouillement et calculs du débit

Ces résultats ont ensuite corrigés comme suit:

- A et Q sont multipliée par un coefficient correcteur égal au rapport entre la largeur réelle entre les tops extrêmes et la largeur calculée
- Pour les zones mesurées près des rives on suppose que les vitesses et les profondeurs mesurées aux tops extrêmes retombent à zéro à la rive, les surfaces des triangles ainsi formés sont ajouté au résultats des valeurs calculées de A et Q entre ces tops
- Le débit est ensuite multipliée par un 2^{ième} coefficient correcteur tenant compte des rapports entre la vitesse moyenne et la vitesse superficielle u_m/u_s (supposé égal à 0,90)

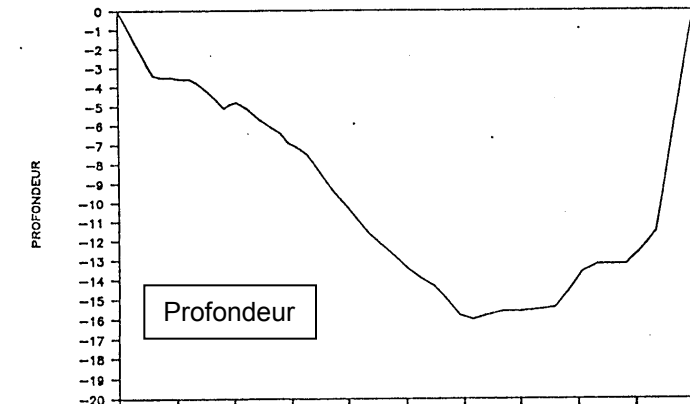
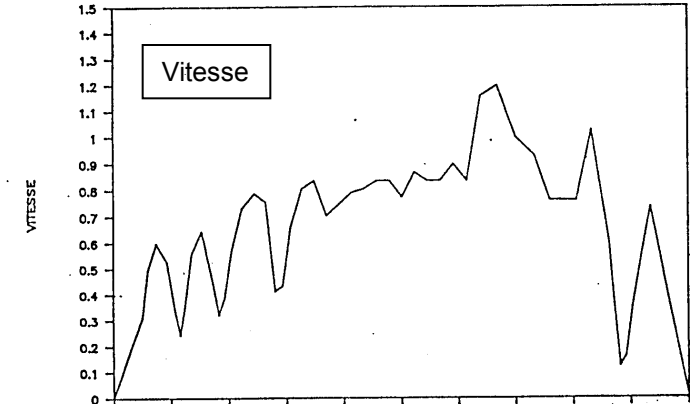
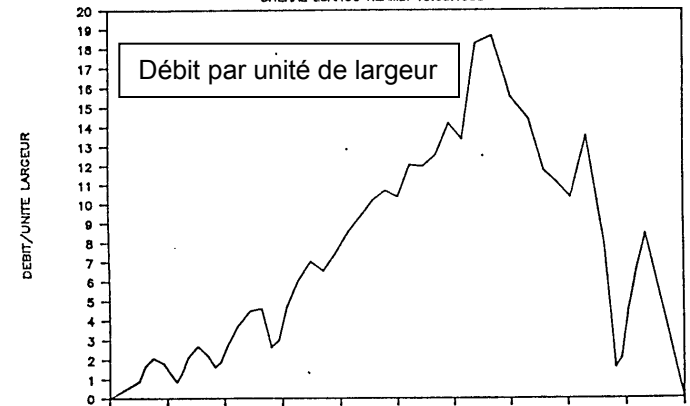
Mesure du débit liquide:

Méthode par intégration transversale

Dépouillement et calculs du débit

METHODE PAR INTEGRATION TRANSVERSALE

CHEVAL LOANGO NZAMBI 19.08.1983



Mesure du débit liquide: Méthode par intégration transversale Avantages et désavantages

Avantages:

- méthode rapide
- peut être exécuté avec une embarcation relativement petite
- utilisation des appareils classiques (moulinet, échosondeur, goniomètre, mécanique simple)

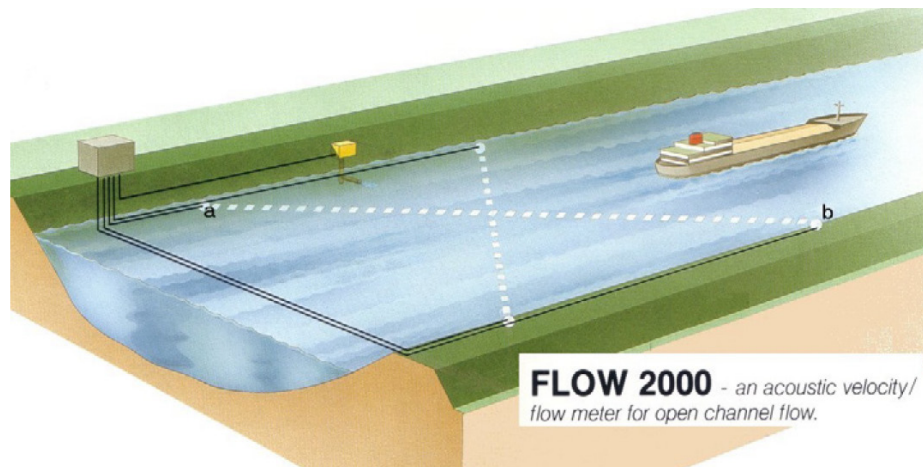
Désavantages:

- vulnérabilité de l'hélice du moulinet (inhérente à la méthode)
- méthode moins précise que la méthode classique au moulinet
- nécessite 5 personnes au minimum
- personnel doit être expérimenté
- exige un certaine connaissance du rapport u_m/u_s

Mesure du débit liquide: Nouvelles techniques

Acoustic discharge measurement (ADM)

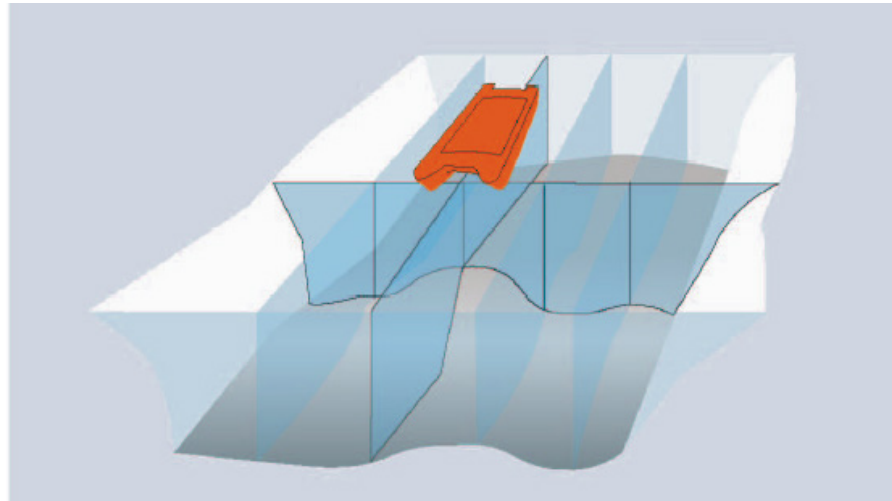
Débitmètres à ultrasons économiques conçus pour une utilisation fixe. Ils fonctionnent selon le principe de la différence de temps de transit, fondé sur le fait que la vitesse de propagation des ultrasons dans un liquide dépend de la vitesse d'écoulement de ce dernier.



Mesure du débit liquide: Nouvelles techniques

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

Un signal ultrasonique est émis dans le flux du liquide. Lorsque ce signal est réfléchi par les particules solides ou les bulles d'air, sa fréquence se modifie proportionnelle à la vitesse du fluide.



Mesure du débit liquide: Méthode par flotteurs hydrométriques Principe

Avec cette méthode le débit liquide est estimé à partir de la mesure du profil en travers par sondage de la section de mesure et par mesure de la vitesse moyenne de flotteurs de surface entre une position de départ et une position d'arrivée.

Cette méthode nécessite donc une transformation des vitesses superficielles en vitesses moyennes à l'aide d'un coefficient u_m/u_s .

Mesure du débit liquide: Méthode par flotteurs hydrométriques Equipement

- un échosondeur
- deux sextants ou autre type de localisation
- un stigmographe
- une quantité suffisante de flotteurs
- un chronomètre ou une horloge de précision

Mesure du débit liquide: Répartition du débit liquide Fréquence

Répartition des débits (mesures aux flotteurs ou mesure au moulinet par intégration transversale)

fréquence: en fonction de la montée des eaux =

- pour des cotes à l'échelle de Boma de 0 à 2 m: tous les 0,5 m
- pour des cotes à l'échelle de Boma de 2 à 2,9 m: tous les 0,3 m
- pour des cotes à l'échelle de Boma de 2,9 à 3,9 m: tous les 0,2 m

Méthode par flotteurs hydrométriques

Flotteurs hydrométriques

Principe

La méthode de détermination des vitesses au moyen de flotteurs de surface s'appuie sur la mesure du trajet s parcouru par le flotteur pendant le temps t .

Ceci permet d'en déduire la vitesse moyenne d'écoulement en surface (u_s) dans le temps t le long de la trajectoire s :

$$u_s = \frac{s}{t}$$

Les vitesses de surface diffèrent des vitesses moyennes (u_m) sur la profondeur.

Il faudra leur appliquer un coefficient de conversion égal au rapport entre u_m et u_s (voir plus loin).

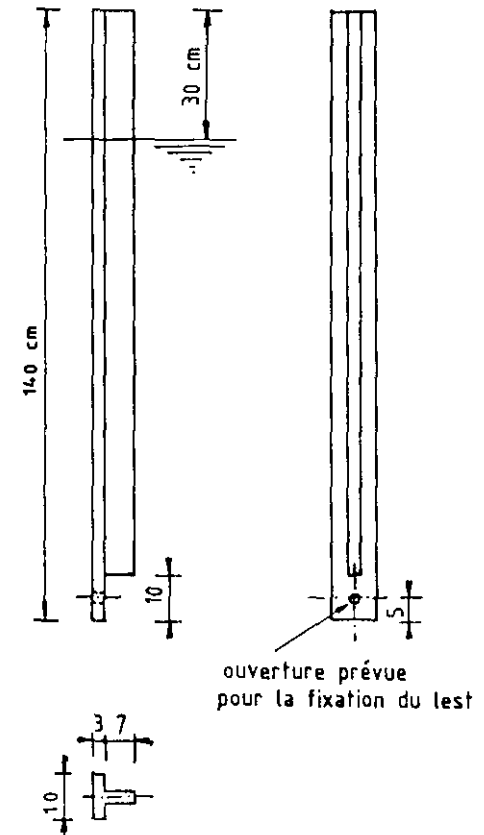
Méthode par flotteurs hydrométriques

Flotteurs hydrométriques

Description du flotteur

Les flotteurs utilisés par la RVM sont constitués de deux planches en bois de 1,40 m de longueur, lestés de façon à ce qu'ils émergent de l'eau de 25 à 35 cm environ.

Cette longueur d'émergence doit être suffisante pour permettre le repérage mais suffisante petite pour le vent n'influence pas trop la vitesse du flotteur. Elle est réglée par le lest.



Méthode par flotteurs hydrométriques

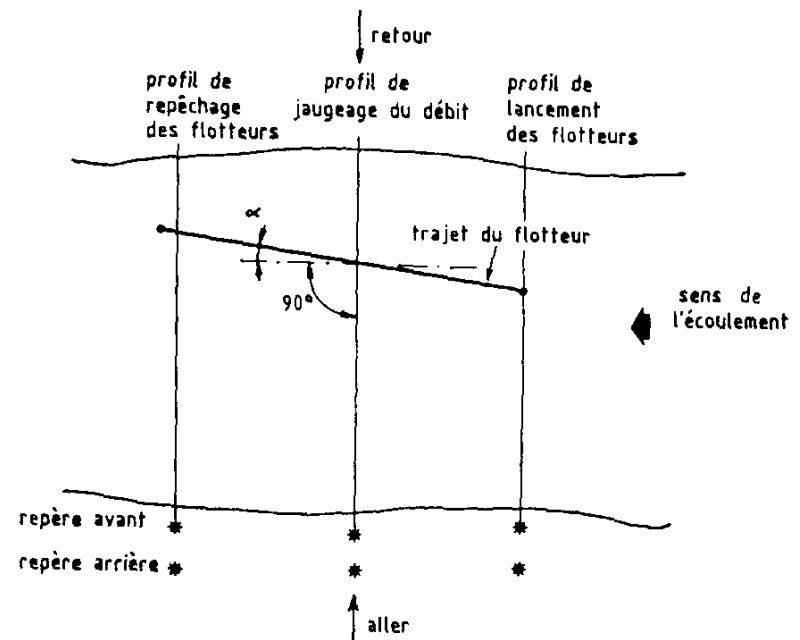
Technique et procédure de jaugeage

Mesure des vitesses

La section est matérialisée par deux repères sur chacune des deux rives. De plus chaque section de débit comprend à l'amont un profil de lancement et à l'aval un profil de repêchage de flotteurs, chacun à environ 300 m de la section.

Les flotteurs sont immergés en amont du profil de lancement par paquets.

Le canot hydrographique suit les flotteurs.



Méthode par flotteurs hydrométriques

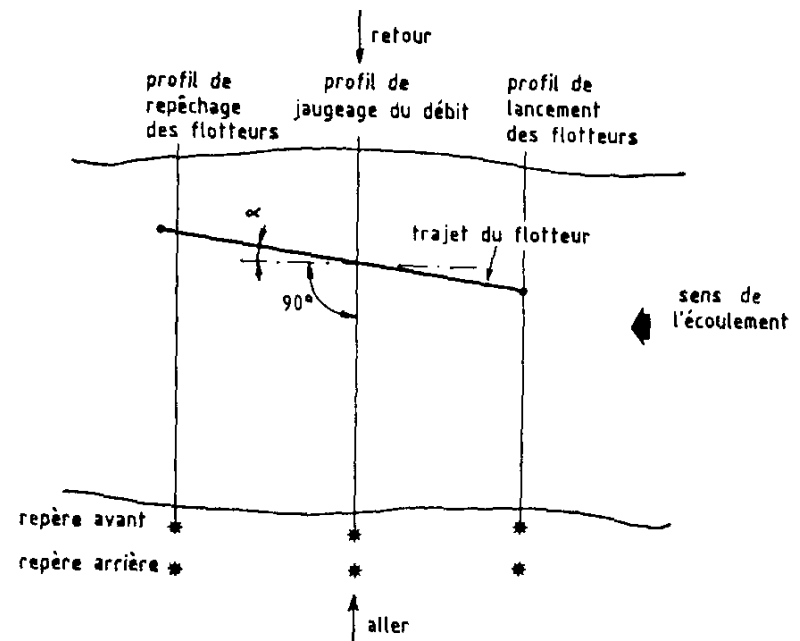
Technique et procédure de jaugeage

Mesure des vitesses

Au passage du premier profil le canot se rapproche du flotteur jusqu'à le toucher, la position et l'heure est notée.

Après le lancement de tous les flotteurs le canot se déplace vers le profil de repêchage, se rapproche successivement de chaque flotteur jusqu'à le toucher. L'heure est à nouveau notée de même que la position.

Les flotteurs sont récupérés.

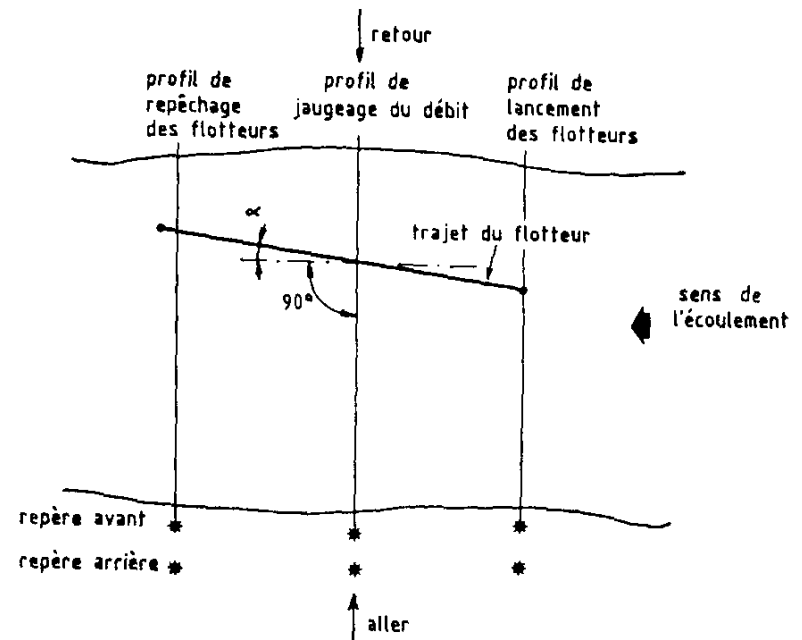


Méthode par flotteurs hydrométriques

Technique et procédure de jaugeage

Mesure des profondeurs

La mesure des profondeurs s'effectue par échosondeur en suivant le profil de débit dans les deux directions (aller et retour).

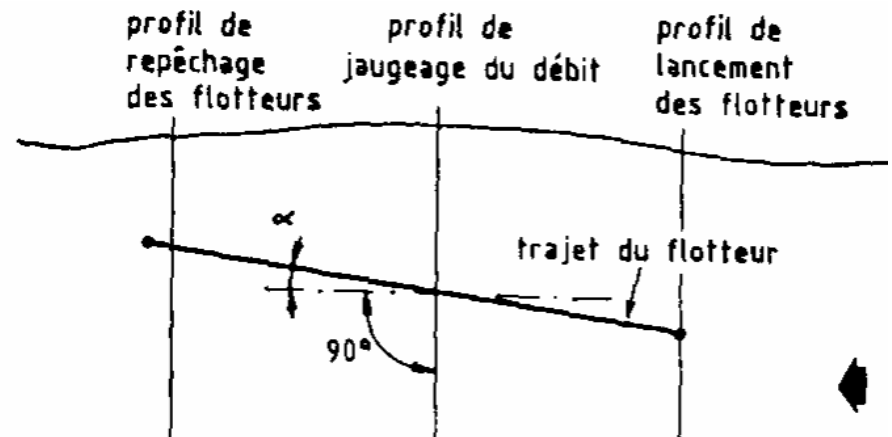


Méthode par flotteurs hydrométriques

Dépouillement et calculs du débit

Calcul des vitesses u_s et $u_s \cdot \cos \alpha$

Les vitesses sont déduites de la trajectoire moyenne par les points de départ et d'arrivée et du temps mis à parcourir cette trajectoire.



On suppose la vitesse du courant dans la section de débit à l'endroit du passage du flotteur égale à la vitesse moyenne u_s mesurée entre ces deux profils.

Une première correction $\cos \alpha$ est apportée pour tenir compte de l'angle entre la trajectoire et la normale à la section (projection sur la perpendiculaire à la section).

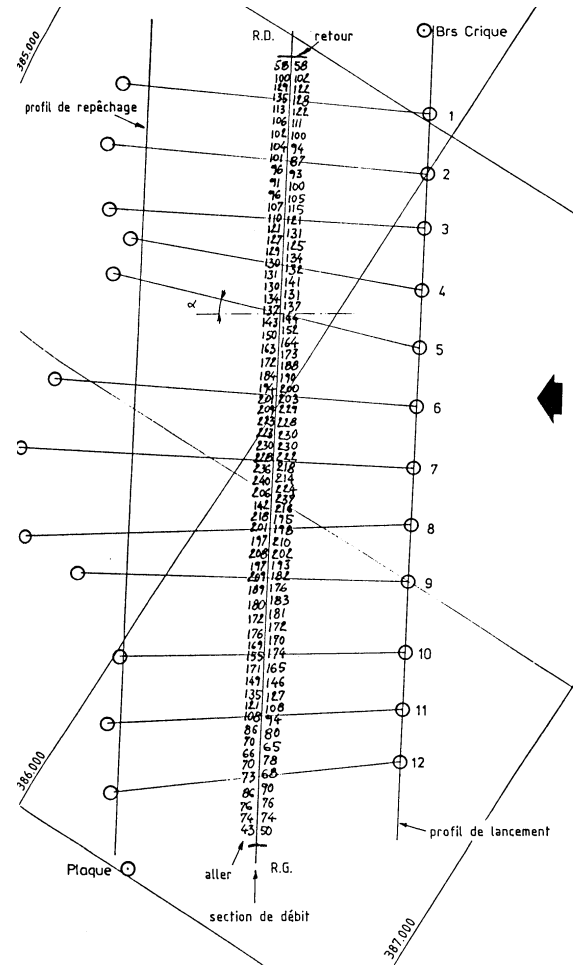
Méthode par flotteurs hydrométriques

Dépouillement et calculs du débit

Lecture des profondeurs

Après avoir tracé sur papier les profils des sections en travers levées à l'échosondeur 'aller' et 'retour', les points du passage de chaque flotteur y sont indiqués.

Les profondeurs p_t sont les moyennes arithmétiques des profondeurs lues à ces endroits.



Méthode par flotteurs hydrométriques

Dépouillement et calculs du débit

Calcul du débit

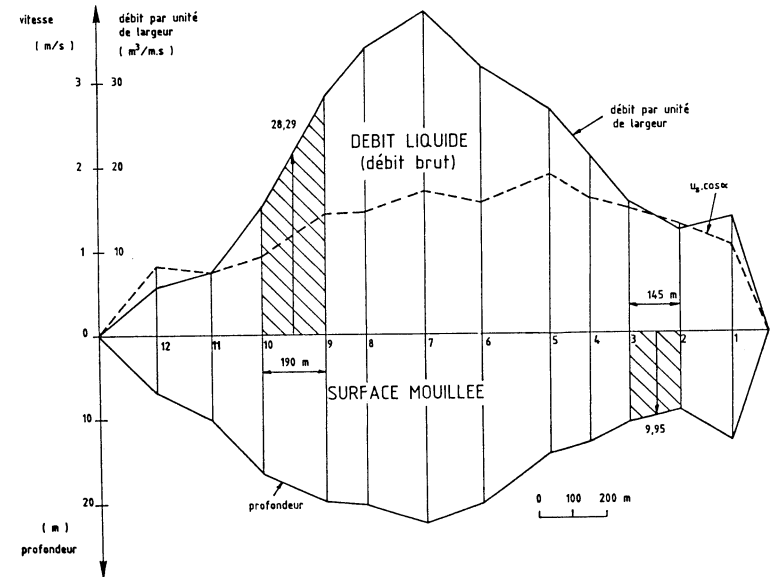
Débit par unité de largeur

Le produit $u_s \cdot \cos\alpha \cdot p_t$ est portée en ordonnée sur le graphique au regard des positions portées sur l'axe des abscisses représentant les largeurs.

Débit total

Le calcul de la surface entre l'axe des abscisses et la ligne brisée reliant les extrémités des segments $u_s \cdot \cos\alpha \cdot p_t$ donne le débit brut.

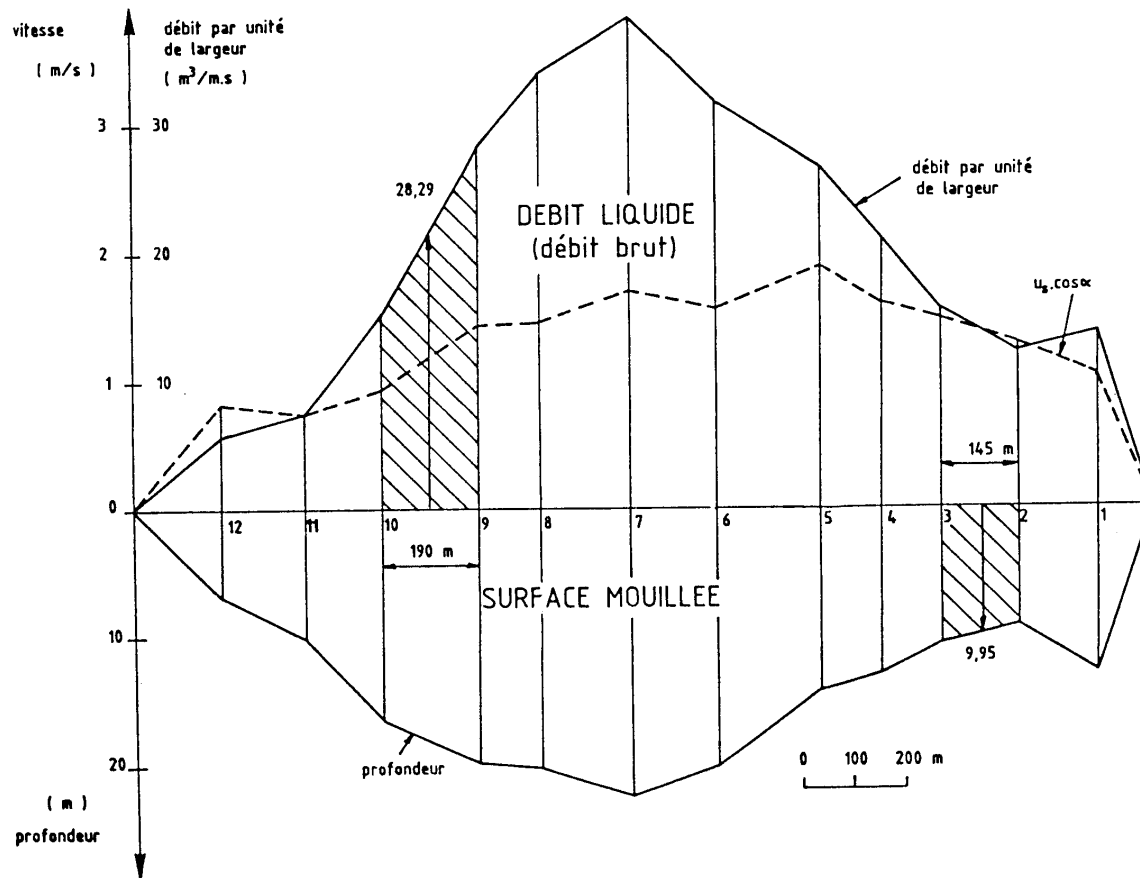
Pour obtenir le débit réel le débit brut sera multiplié par un coefficient réducteur u_m/u_s .



Méthode par flotteurs hydrométriques

Dépouillement et calculs du débit

Calcul du débit



Mesure du débit liquide: Méthode par flotteurs hydrométriques Avantages et désavantages

Avantages:

- méthode rapide
- prix de revient du matériel minime
- permet de constater et de tenir compte de certaines anomalies dans la directions des courants (trajectoires non perpendiculaires à la section de jaugeage)
- nécessite un personnel peu qualifié mais par contre adroit et précis

Désavantages:

- méthode moins précise que la méthode classique au moulinet
- exige un certaine connaissance du rapport u_m/u_s

Débit solide : généralités

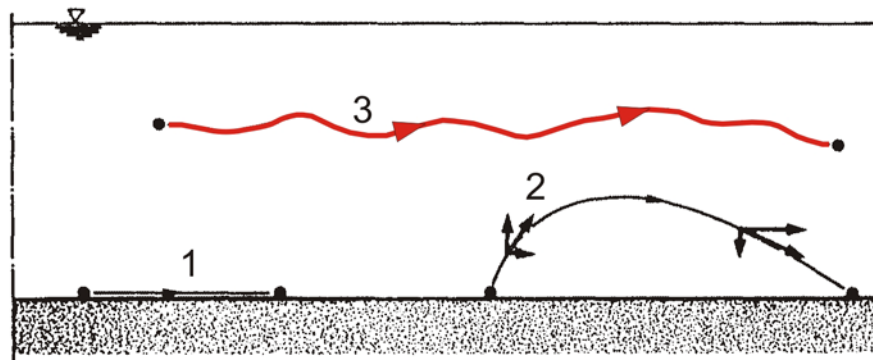
- Les eaux du fleuve Congo transportent des alluvions suivant plusieurs processus.
- En fonction de leurs caractéristiques (dimensions, poids spécifique...) et celles du courant (vitesse, profondeur...), les alluvions peuvent être traînées ou roulées sur le fond, déposées ou arrachées au fond du lit et rester en suspension dans le courant.
- Les différentes phases du charriage des alluvions se produisent simultanément et l'on ne peut établir une séparation nette entre elles.
- Cependant pour les besoins de l'analyse, on classe habituellement les transport solides en 2 catégories: les transport solides en suspension et les transport solides charriés sur le fond (ou charriage).

Débit solide : généralités

Il existe donc 2 mécanismes physiques différents: le charriage et la suspension. La saltation est une combinaison de ces deux.

• La suspension: les particules solides les plus fines sont entraînées par le courant et restent suspendues dans le liquide par lequel elles sont transportées, et ne touchent jamais le fond. Les particules sont plus ou moins entraînées à la même vitesse que le courant.

TYPES DE TRANSPORT D'UNE PARTICULE SOLIDE
AU DESSUS D'UN FOND PLAT

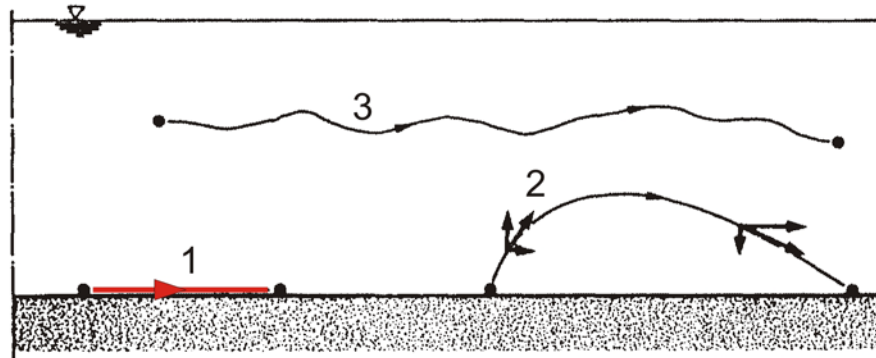


- 1 Transport par charriage
- 2 Transport par saltation
- 3 Transport en suspension**

Débit solide : généralités

- **Le charriage**: les grains les plus grossiers roulent ou glissent sur le fond sans jamais le quitter. Les grains charriés sur le lit ont une vitesse inférieure à celle du courant près du fond.

TYPES DE TRANSPORT D'UNE PARTICULE SOLIDE
AU DESSUS D'UN FOND PLAT



1 Transport par charriage

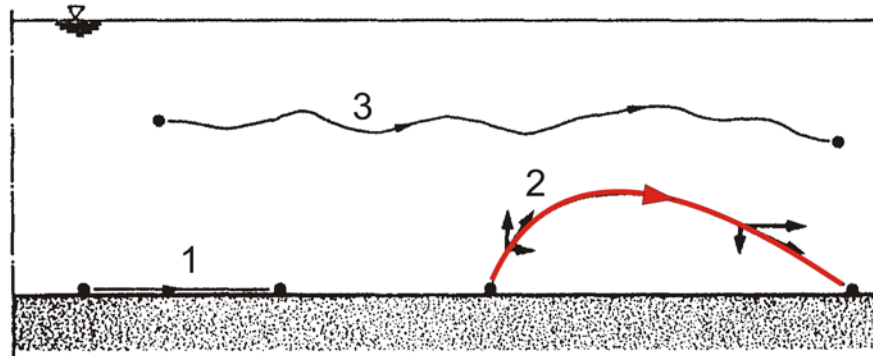
2 Transport par saltation

3 Transport en suspension

Débit solide : généralités

- La saltation: certains matériaux de granulométrie intermédiaire reste souvent en contact avec le lit mais font parfois des bonds au travers du liquide pour retomber au fond.

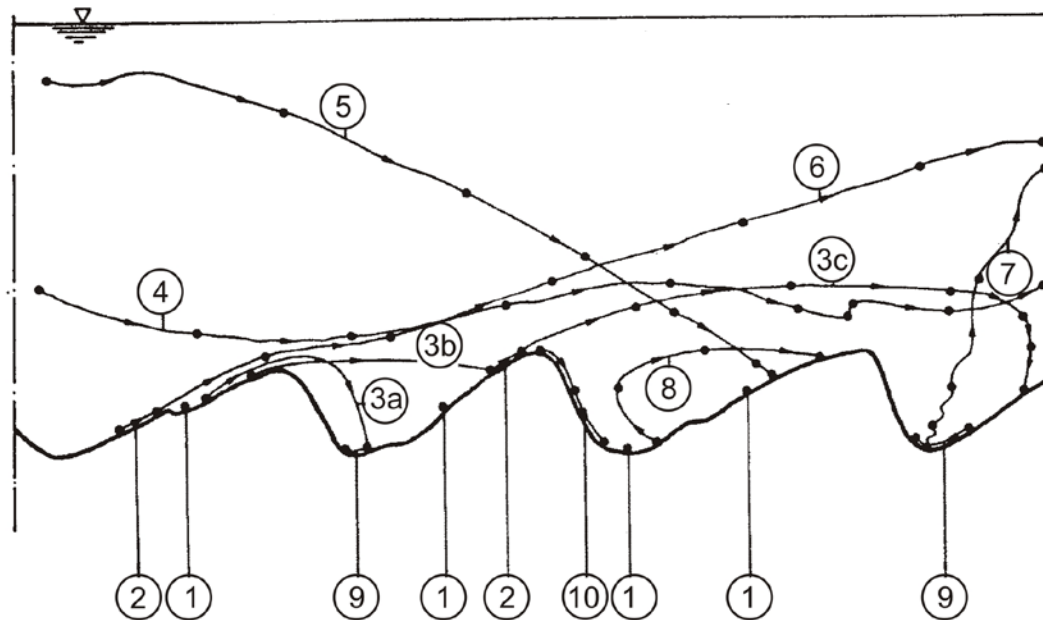
TYPES DE TRANSPORT D'UNE PARTICULE SOLIDE
AU DESSUS D'UN FOND PLAT



- 1 Transport par charriage
- 2 Transport par saltation**
- 3 Transport en suspension

Débit solide : généralités

TYPES DE TRANSPORT D'UNE PARTICULE SOLIDE AU DESSUS DES DUNES



- 1 à l'arrêt
- 2 transport par charriage
- 3 saltation
- 4, 5, 6 transport en suspension
- 7 éjection du fond par le phénomène de 'bursting'
- 8 érosion de la zone du gyre
- 9 transport par charriage vers l'amont dans la région du gyre
- 10 avalanche face aval de la dune après transport par charriage

Mesure du débit solide

Choix du site

Appareils utilisés au bief maritime

Choix du site:

Les critères pour la mesure du débit liquide s'appliquent aussi au choix du site pour la mesure des transports solides. Les mesures du transport solide se font alors dans les mêmes verticales que les mesures des vitesses.

Appareils utilisés au bief maritime

- BTMA : mesure dans les premiers cinq centimètres
- DF2 : mesure dans les premiers quarante centimètres
- DF1 : mesures entre 40 cm du fond et la surface d'eau

Mesure du débit solide - B.T.M.A.

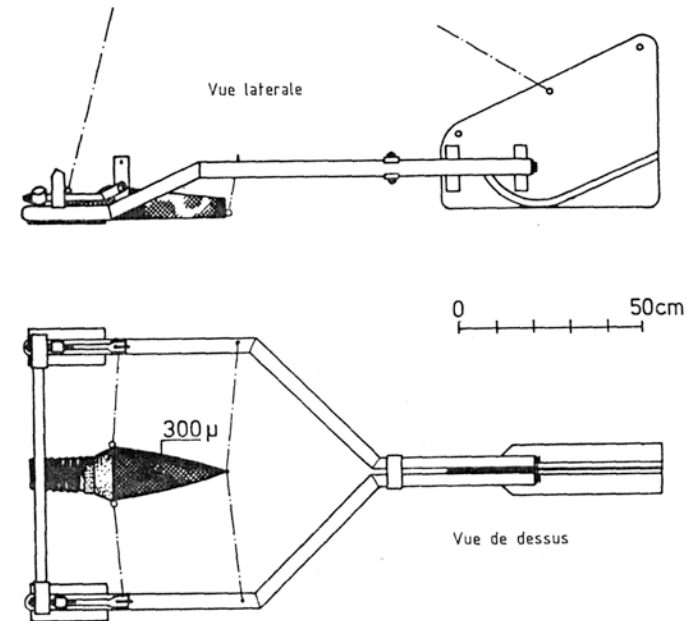
Description de l'appareil

Technique de jaugeage

L'instrument est constitué par un récipient de prise de sable suspendu dans un cadre qui prend la direction du courant, grâce à un gouvernail.

Tout l'appareil est suspendu à un davier de façon à ce que l'appareil se pose tranquillement sur le fond.

L'embouchure, large de 85 mm et haute de 50 mm est fixée au cadre au moyen d'une lamelle flexible qui le maintient contre le lit. Le corps du récipient est constitué d'un treillis dont les ouvertures ont 0,3 mm de côté.



Mesure du débit solide - B.T.M.A.

Description de l'appareil

Technique de jaugeage

Grâce à la forme hydrodynamique de l'appareil, il se produit une dépression qui assure l'entrée non perturbée de l'eau dans le bec; l'eau quitte ensuite le treillis en abondant son sable dans le récipient. L'efficacité de l'appareil diminue avec le degré de remplissage. Un bouchon dans le fond du récipient permet de vider l'appareil.



La durée de la mesure est fonction de l'importance du transport solide. En général égale à 120 s., la durée sera réduite à 60 s. ou augmentée à 600 s. de façon que la quantité de sable recueillie est de l'ordre de 100 cm³.

Mesure du débit solide

B.T.M.A.

Calcul du débit

Mesure dans un point:

Le transport par charriage est donné par:

$$a = \frac{g.8,64}{t.c.8,5}$$

Avec :

- a** = transport (en m³/m.24h)
- g** = prise (en cm³)
- t** = durée de la mesure (en s)
- c** = coefficient d'efficacité
- 8,5** = largeur de l'orifice (en cm)

Mesure dans une section:

La méthode de travail est la même qu'au cas du calcul du débit liquide.

Mesure du débit solide B.T.M.A.

Description – technique de jaugeage

Description de l'appareil:

Les critères pour la mesure du débit liquide s'appliquent aussi au choix du site pour la mesure des transports solides. Les mesures du transport solide se font alors dans les mêmes verticales que les mesures des vitesses.

Appareils utilisés au bief maritime

- BTMA : mesure dans les premiers cinq centimètres
- DF2 : mesure dans les premiers quarante centimètres
- DF1 : mesures entre 40 cm du fond et la surface d'eau

Mesure du débit solide

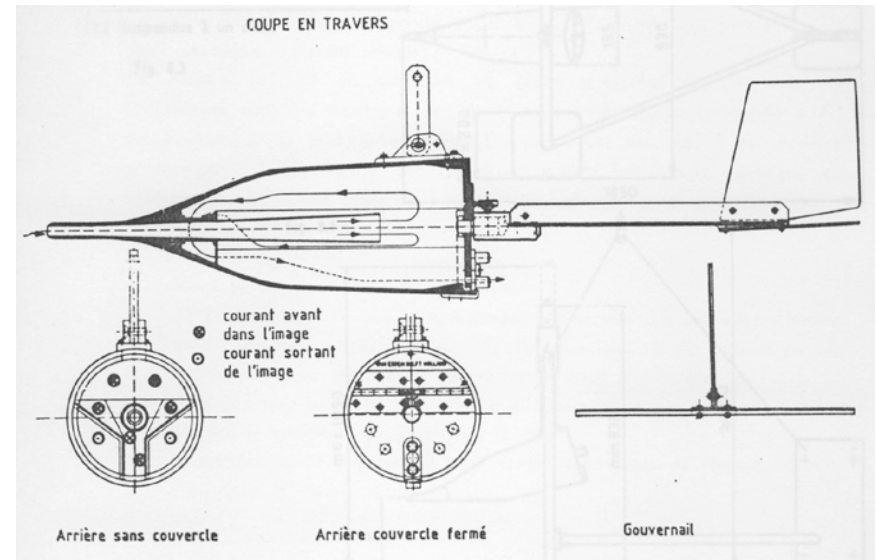
Bouteilles de Delft DF1 et DF2

Description de l'appareil

Les bouteilles de Delft ont la forme d'une bouteille qui provoque la dépression nécessaire pour faire circuler l'eau à l'intérieur du corps. Au moyen d'un tube divergent et de deux cloisons longitudinales, l'eau est astreinte à parcourir un double circuit à l'intérieur de la bouteille et la quitte par des orifices aménagés dans le fond.

Les appareils sont conçus de telle sorte que la vitesse à l'entrée du cercle de 'prise' soit égale à la vitesse locale de l'eau.

Ils sont également conçus de façon que l'orifice de prise se trouve en avant de la zone de remous engendrés par l'appareil.



Mesure du débit solide

Bouteilles de Delft DF1 et DF2

Description de l'appareil

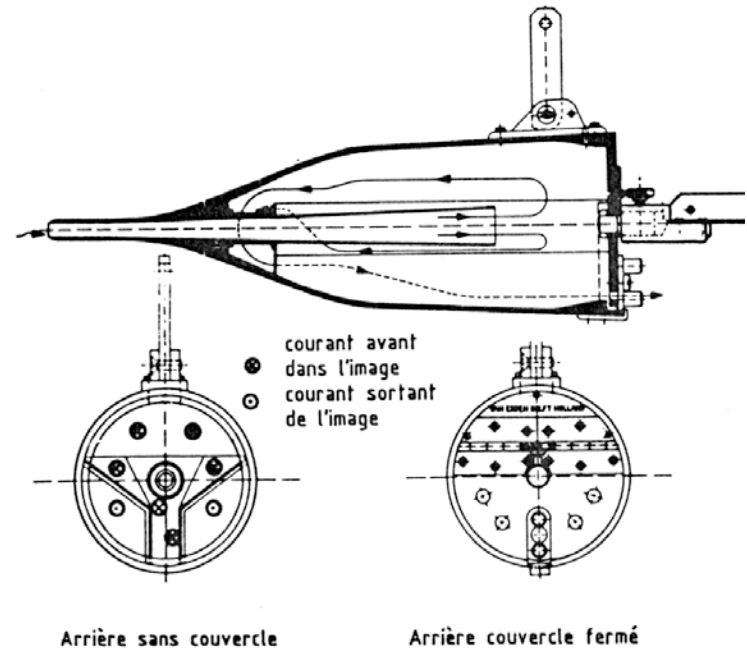
Chaque bouteille est pourvue d'un double jeu d'embouchures et un tube divergent.

Le jeu le plus large est utilisé pour les petites vitesses du courant et/ou du sable grossier.

Les orifices de sortie doivent être adaptés aux dimensions de l'embouchure:

- grande orifice ($\varnothing 22\text{mm}$, section $3,8\text{cm}^2$) pour $u < 1\text{m/s}$

- petite orifice ($\varnothing 15,5\text{mm}$, section $1,9\text{cm}^2$) pour $1\text{m/s} < u < 2,5\text{m/s}$ (dans ce cas les 2 orifices de sortie les plus bas doivent être fermés)

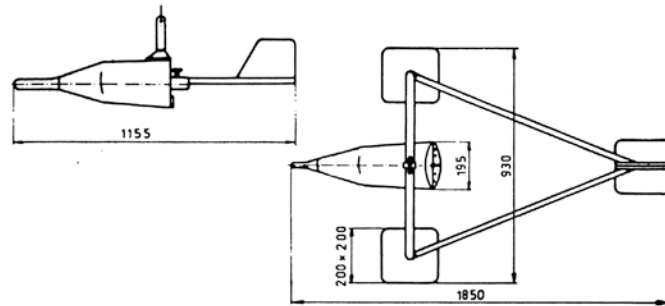


Mesure du débit solide

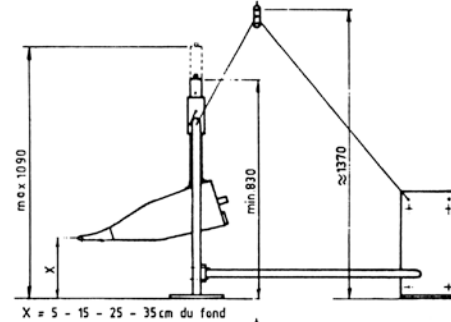
Bouteilles de Delft DF1 et DF2

Description des appareils

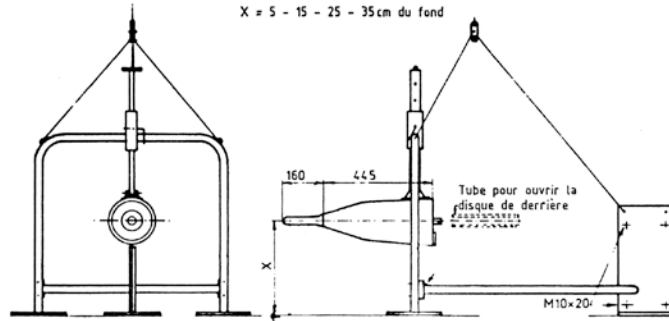
DF1 suspendue
à un câble



DF2 sur cadre



X = 5 - 15 - 25 - 35 cm du fond



dimensions en mm

Mesure du débit solide DF1 suspendue à un câble Technique du jaugeage

- La DF1 est utilisée pour mesurer le transport de sable entre 40 cm au-dessus du lit jusqu'à la surface.
- L'embouchure utilisée a la forme droite. L'orifice d'entrée dépend de la vitesse du courant ($\varnothing 22\text{mm}$ ou $\varnothing 15,5\text{mm}$).
- L'instrument est pourvu à l'arrière d'un couvercle à charnière auquel est fixé un gouvernail pour le maintenir dans la direction du courant. Il est suspendu à un câble passant sur une poulie fixée à un davier, ce qui permet de la faire descendre au point choisi.
- La mesure se fait en sommant les prises prélevées à une série de profondeurs dont les positions sont données dans un tableau en fonction de la profondeur totale.

Mesure du débit solide DF1 suspendue à un câble Technique du jaugeage

Extrait du tableau avec les profondeurs de prélèvement pour la DF1

profondeur totale (mètres)	profondeur des points en dessous du niveau d'eau (mètres)									temps par point (minutes)	temps totale (minutes)
	0,15	0,40	0,70	1,40	2,30	2,95	3,60	4,25	9,00		
1,20										10	30
2,00	0,20	0,60	1,00	1,40						9	36
5,00	0,35	1,00	1,65	2,30	2,95	3,60	4,25			5	35
10,00	0,60	1,80	3,00	4,20	5,40	6,60	7,80	9,00		5	40
15,00	0,90	2,75	4,55	6,40	8,20	10,05	11,85	13,70		5	40
20,00	1,10	3,25	5,45	7,60	9,80	12,00	14,15	16,30	18,50	5	45

Entonnoir

On utilise un entonnoir pour faciliter le recueil du sable.

Un verre gradué peut être facilement monté et démonté de l'entonnoir.



Mesure du débit solide DF1 suspendue à un câble Technique du jaugeage

Mise à l'eau pour une mesure:

- Virez la DF1 dans l'eau à la surface
- Attendez que la bouteille se mette à l'horizontale
- Mettez le compteur de profondeur à zéro
- Descendez la DF1 rapidement pour atteindre le premier point de mesure.
- Actionnez le chronomètre
- L'appareil y est maintenu pendant un temps renseigné au tableau, ensuite il est descendu aux positions suivantes.

Mesure du débit solide DF1 suspendue à un câble Technique du jaugeage

Après déroulement du temps de mesure:

- Arrêtez le chronomètre
- Remontez l'instrument pas plus vite que 20 cm/s.
- Ramenez l'appareil à bord et manœuvrez l'arrière au-dessus de l'entonnoir
- Ouvrez le couvercle avec le gouvernail comme levier
- Videz le contenu des compartiments dans l'entonnoir (bien rincer les compartiments!)
- Préparez la DF1 pour une mesure suivante
- Laissez décanter la prise dans le verre gradué attaché à l'entonnoir
- Détachez la verre et lisez la quantité de sable recueilli

Mesure du débit solide DF2 sur cadre Technique du jaugeage

- La DF2 est utilisée pour mesurer le transport de sable entre 0 et 40 cm au-dessus du lit.
- La bouteille est fixée sur un cadre. La hauteur de l'embouchure est réglable de tel façon qu'un simple manœuvre permet de mesurer à respectivement 5; 15; 25 et 35 cm du fond.
- Afin d'éviter la formation de remous près du fond par la présence de la bouteille, la partie arrière de celle-ci est placée légèrement plus haut pour les mesures à 5; 15 et 25 cm, tandis que l'embouchure est courbée. Pour la mesure à 35 cm la bouteille est placée à l'horizontale et l'embouchure droite est utilisée.



Mesure du débit solide

Bouteilles de Delft DF1 et DF2

Calcul du débit solide

Généralités:

- Le débit liquide est fonction de la vitesse d'eau, de la quantité de sable recueillie dans le récipient, du temps de mesure, du rapport de la surface de l'orifice de l'appareil par rapport à la surface qui se prétend de représenter et éventuellement d'un facteur de correction de l'appareil.
- La vitesse à l'entrée est supposée égale à la vitesse locale de l'eau.
- Les facteurs de correction sont fonction de la surface et forme de l'orifice, de la vitesse locale de l'eau et des diamètres médians du sable. Pour la Région Divagante ces facteurs de correction ne diffèrent à peine de 1.

Mesure du débit solide

Bouteilles de Delft DF1 et DF2

Calcul du débit solide

Vu les remarques ci-dessus les seules valeurs restantes qui interviennent dans le calcul sont:

- La prise (quantité recueillie)**
- Le temps de mesure**
- Le rapport entre la surface de l'orifice de l'appareil et la surface qu'elle représente, c.à.d. la surface de la tranche d'eau dans laquelle on suppose le transport solide égal au transport dans la surface de l'orifice.**

Mesure du débit solide

Calcul du débit solide mesuré par DF1

Mesure dans une verticale

La mesure se fait en sommant les prises prélevées à une série de profondeurs. Le transport solide est calculé à l'aide de la formule suivante:

$$c = \frac{g.d.F}{t}$$

Où g = prise (en cm^3)

d = épaisseur de la tranche d'eau mesurée (en m) = $p_t - 0,4\text{m}$

F = coefficient de l'appareil

3,79 pour l'embout de $\varnothing 22$

7,58 pour l'embout de $\varnothing 15,5$

t = durée totale de la mesure (en minutes)

Mesure du débit solide

Calcul du débit solide mesuré par DF2

Mesure dans une verticale

La bouteille est placée successivement à 0,05; 0,15; 0,25 et 0,35 m du fond.

Le transport dans chaque tranche d'eau d'une épaisseur de 10 cm est obtenue par la formule:

$$c = \frac{g.d.F}{t}$$

Où g = prise (en cm^3)

d = épaisseur de la tranche d'eau mesurée (en m) = 0,10 m

F = coefficient de l'appareil

3,79 pour l'embout de $\varnothing 22$

7,58 pour l'embout de $\varnothing 15,5$

t = durée de la mesure (en minutes)

Mesure du débit solide

Calcul du débit solide DF1 et DF2

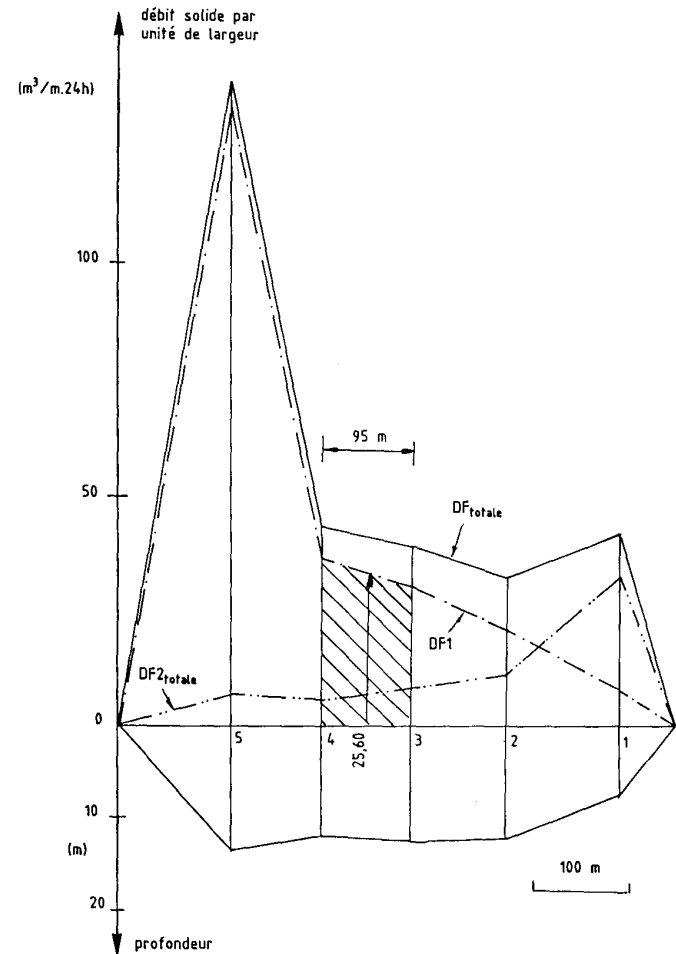
Mesure dans une section

La méthode de travail est la même qu'au cas du calcul du débit liquide.

Mesure du débit solide

Calcul du débit solide totale dans une section

Le débit solide totale est la sommation des débits solides mesurés avec les bouteilles DF2 à 0,05; 0,15; 0,25 et 0,35 m et DF1.



JE VOUS REMERCIE DE VOTRE ATTENTION

