



INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

PROJET MAD

MESURE AUTOMATISEE DES DEBITS

Cahier des Charges pour la réalisation d'un automate
à microprocesseur pour l'automatisation des jaugeages par
la méthode du canot mobile

--

par

Jean Marie FRITSCH .

Chargé de recherches de l'ORSTOM

--

S O M M A I R E

	Page
1. Enoncé du problème	1
2. Principe de la méthode du canot mobile	4
3. Objectifs du système MAD	8
4. Diagramme fonctionnel	9
5. La mesure de la vitesse	9
5.1 Le moulinet à impulsions (MAC 1.0.)	11
5.2 Le moulinet à génératrice (MAC 1.1.)	12
6. Mesure de l'angle (MAC 2)	14
7. Mesure de la profondeur (MAC 3)	14
8. Le module de traitement de l'information "Capteurs" (TIC)	15
9. Le module d'Entrée des Commandes Utilisateur (ECU)	15
9.1 Les commandes	15
9.2 Les paramètres de la mesure	16
10. Le module de calcul en débit (MOCA)	18
11. Contrôle et Affichage des Résultats (Module CAR)	19
12. Alimentation - conditionnement	21
BIBLIOGRAPHIE	22

PROJET M.A.D. : Mesure Automatisée des débits

(version 1.0. - juillet 86)

1. Enoncé du problème

Mesurer le débit d'un cours d'eau, c'est se donner les moyens de connaître :

- l'aire de la section mouillée selon une coupe transversale de la rivière, perpendiculaire à la direction du courant (A).
- la vitesse moyenne du courant à travers cette section (U).

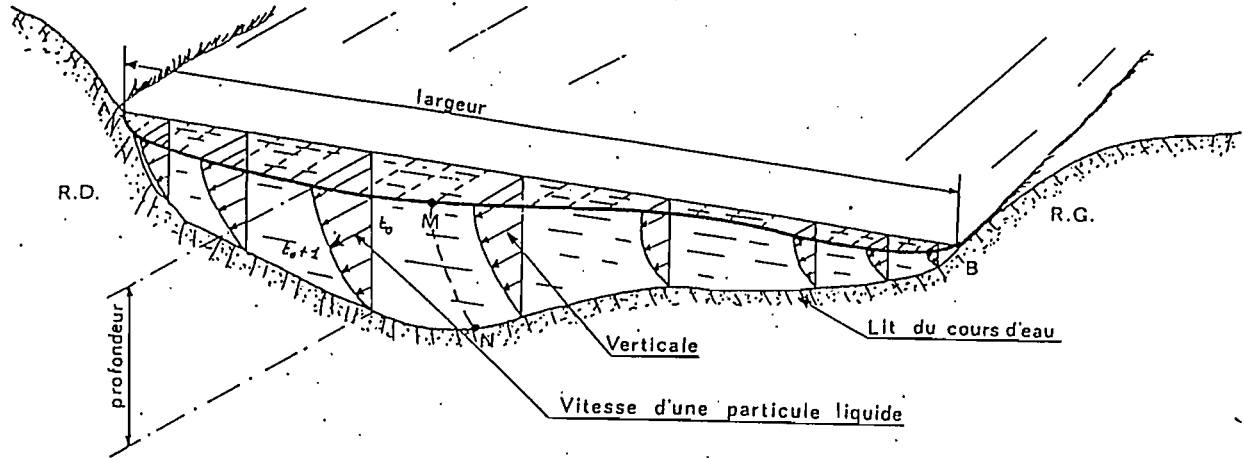
Le débit Q s'exprime sous la forme :

$$Q = U \times A \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} Q \text{ en } m^3 \cdot s^{-1} \\ A \text{ en } m^2 \\ U \text{ en } m \cdot s^{-1} \end{array}$$

En général, la vitesse est très variable dans la section (fig.1) :

- . elle diminue avec la profondeur en un même point pris sur la largeur du cours d'eau (sur une même "verticale").

FIGURE 1 : Représentation du débit



Extrait de 'ISO/DIS 4369'

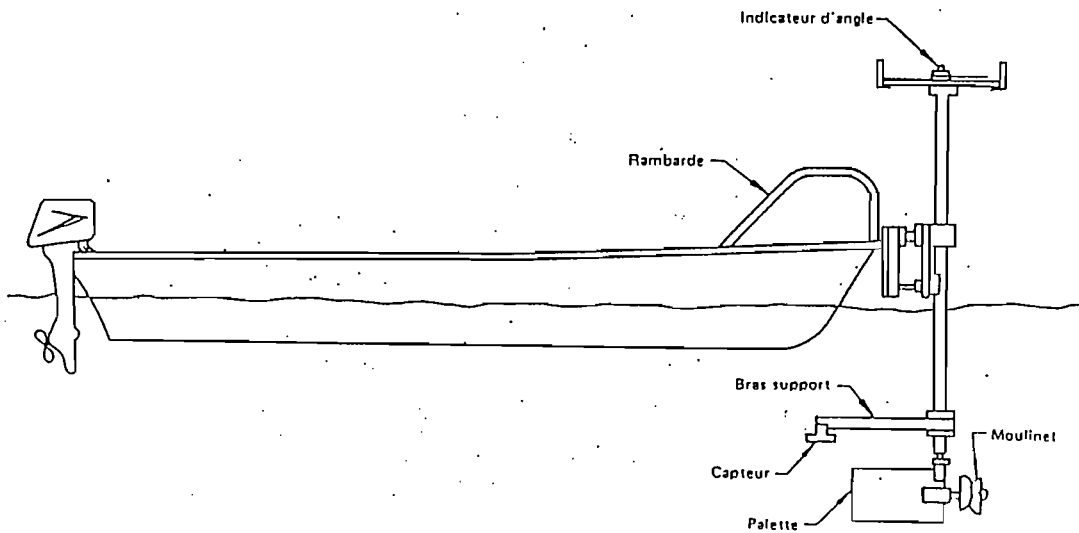


FIGURE -2 - Schéma du canot et du matériel - Méthode 1

. Pour une profondeur donnée la vitesse varie dans la largeur, les vitesses étant généralement plus fortes vers le milieu de la rivière que près des rives.

. En supposant la vitesse constante sur un petit élément de surface dS de largeur dl et de profondeur dp , le débit s'exprime par :

$$Q = \iint_S V. dp. dl$$

En pratique, pour effectuer une mesure de débit (un "jaugeage"), l'hydrologue place un capteur de vitesse en différents points de la section mouillée et procède à une intégration graphique ou arithmétique par la méthode des trapèzes. Un jaugeage comporte un nombre de points typique de l'ordre de 55, répartis par exemple en 11 "verticales " et 5 points en profondeurs par verticale.

La mesure du débit par la méthode décrite (exploration du champ des vitesses, point par point), requiert une infrastructure assez lourde, dès que la largeur de la rivière augmente quelque peu. Pour se positionner sur une verticale, en travers de la section, il faut pouvoir opérer à partir d'un pont, ou utiliser un bateau. Il est nécessaire alors de tendre un câble gradué en travers de la rivière, ou de déterminer sa position par des moyens optiques dès que la largeur dépasse quelques centaines de mètres. Pour immerger le capteur à différentes profondeurs choisies et jusqu'au fond de la rivière, il faut l'adapter sur lest profilé (dit "saumon") de 25 ou 50 kg par exemple. Ce saumon est suspendu par un câble électro-porteur et manoeuvré par l'utilisateur au moyen d'un treuil.

La technique du canot mobile permet de s'affranchir de ces contraintes en permettant des mesures répétitives rapides, sans infrastructure particulière sur le site. La seule limitation dans la précision du résultat final, est que le rapport, la vitesse à une profondeur donnée, en général 1 mètre sous la surface (V_{100}) avec la vitesse moyenne sur la verticale (V) demeure constant sur toute la largeur du fleuve. Selon les lois de l'hydraulique, confirmées par l'examen des écoulements d'un grand nombre de rivières importantes aux Etats-Unis et dans le monde, cette situation favorable existe sur la plupart des cours d'eau très larges, et de surcroît ces coefficients hydrauliques de sites (V/V_{100}) varient dans une gamme relativement étroite de 0,85 à 0,92. (Travaux de l'U.S. Geological Survey). La valeur locale du rapport V/V_{100} peut être obtenue par quelques jaugeages complets point par point.

2. Principe de la méthode du canot mobile (pour description détaillée consulter l'ANNEXE I)

La mesure du débit avec le canot mobile est faite pendant une traversée du cours d'eau le long d'une trajectoire perpendiculaire à l'écoulement. Pendant la traversée un écho-sondeur mesure la profondeur de l'eau et un capteur de vitesse (un moulinet à hélice) permet de connaître le module du vecteur vitesse apparente \vec{V} (fig. 2). Le moulinet est fixé au bout d'un axe vertical tournant et assujéti à une palette formant gouvernail qui place à tout instant l'axe de l'hélice dans le sens du courant apparent, résultante vectorielle de la vitesse du bateau dans la largeur et du courant de la rivière. Les projections du vecteur \vec{V} selon la section transversale du fleuve suivie par le bateau, et perpendiculairement à celle-ci, donnent respectivement (fig. 3) :

- la vitesse du bateau $V_b = V \cdot \cos \alpha$
- la vitesse du courant $V_c = V \cdot \sin \alpha$

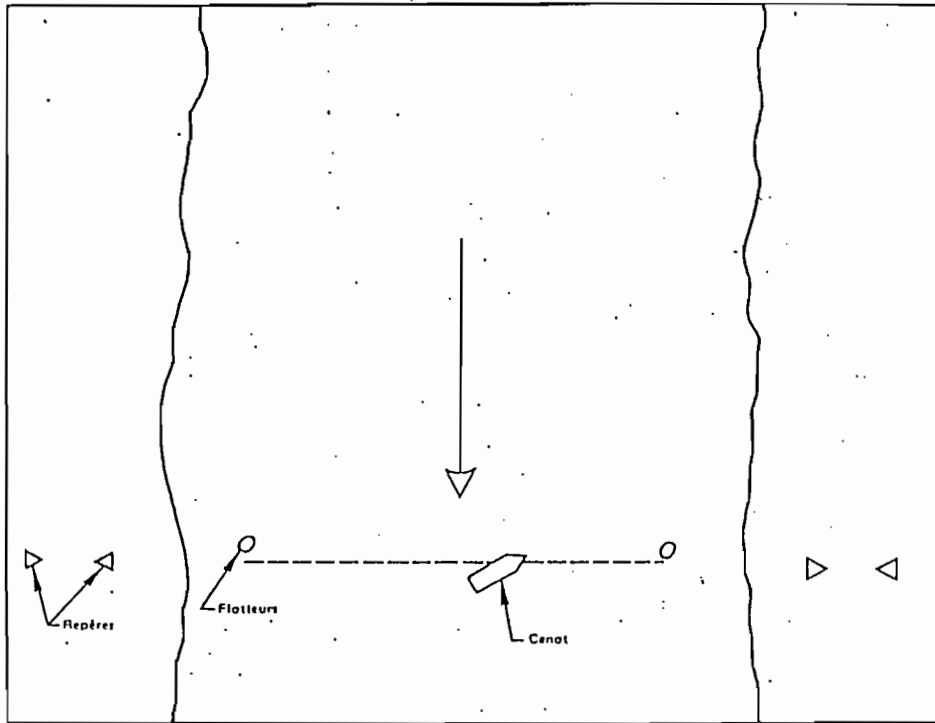


Schéma du cours d'eau avec les repères

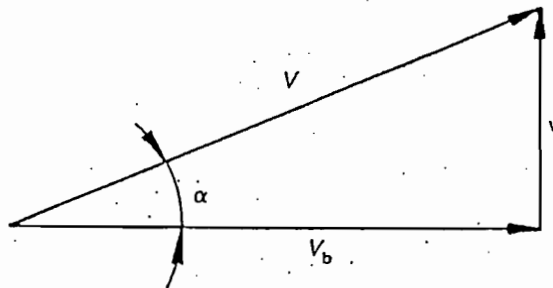


FIGURE 3 — Diagramme des vecteurs de vitesse

La vitesse du bateau sur l'axe de la section permet de connaître la distance Δl parcourue entre deux instants t_1 et t_2 :

$$\Delta l = \int V \cdot \cos \alpha \cdot dt$$

Si t_1 et t_2 sont suffisamment proches, on peut supposer constant dans l'intervalle et calculer Δl par :

$$\Delta l = \cos \alpha \int V \cdot dt$$

où $\int V \cdot dt$ représente la distance parcourue par les pales de l'hélice du moulinet dans l'intervalle t_1 à t_2 .

Ainsi, en connaissant la profondeur moyenne, la vitesse moyenne apparente du bateau et l'angle moyen du vecteur vitesse apparente avec la section pour un nombre m de segments, on peut calculer le débit Q par sommation (fig. 4) :

$$Q = \sum_{i=1}^m l_i \cdot p_i \cdot V_{c_i}$$

ou l_i : largeur du segment de rang i
 p_i : profondeur moyenne du segment de rang i
 V_{c_i} : vitesse moyenne dans le segment de rang i
 m : nombre de segments

Lorsque la méthode est conduite de façon habituelle, un opérateur est chargé du pilotage de l'embarcation, pendant que deux observateurs relèvent et notent simultanément la vitesse du moulinet matérialisée sur un indicateur analogique (voltmètre par ex.) et l'angle existant entre la palette du moulinet et la section transversale, lu sur une rose graduée, fixée au sommet de l'axe vertical supportant l'ensemble palette-moulinet.

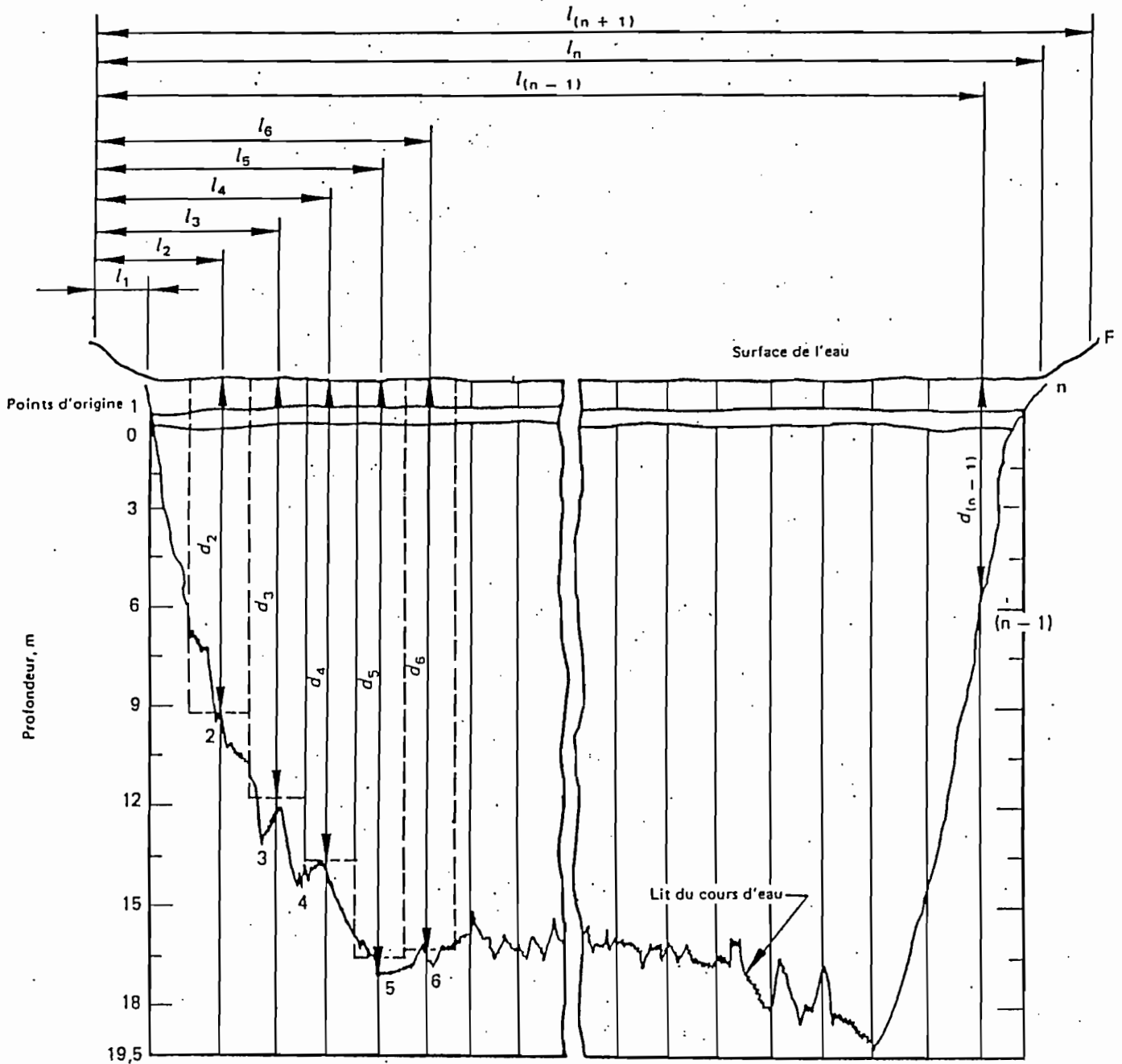


FIGURE 4 - Schéma illustrant la méthode de calcul à mi-section, superposée à un fac simulé de graphique de sondeur sonique

La simultanéité des 2 mesurés est possible grâce à une base de temps qui émet des tops sonores et qui fournit en outre des impulsions qui s'inscrivent sur le diagramme déroulant de l'écho-sondeur, qui permettront de repérer la profondeur moyenne de chaque segment.

Toutes choses étant égales par ailleurs, le procédé est d'autant plus précis que le nombre de segments augmente. Le projet de norme ISO/DIS 4369 (ANNEXE I) recommande au moins 25 segments. Le "Hydrometric Field Manual" du ministère canadien de l'Environnement fixe le nombre optimal entre 25 et 40.

3. Objectifs du système MAD

Le projet MAD a pour objectifs d'automatiser le mode opératoire du jaugeage par bateau mobile, tel qu'il est décrit dans le document ISO/DIS 4369 - Méthode I, p 21 à 23, en utilisant les techniques de traitements des données de capteurs par microprocesseur.

Ces améliorations auront pour effets :

- 1) de supprimer la collecte sur carnet de notes des couples vitesse-angle, qui mobilise deux observateurs, et qui est facilement source d'erreurs.
- 2) de s'affranchir de la phase postérieure d'un dépouillement manuel, long et fastidieux (cf. Annexe B de la norme ISO), de façon à obtenir le débit sur le site, dès la fin de la traversée de la rivière.
- 3) d'améliorer la précision de la méthode en multipliant le nombre de segments élémentaires.

4. Diagramme fonctionnel

Sans présager des solutions matérielles qui seront mise en oeuvre par le CFPK, il est commode pour faciliter l'exposé de diviser le système en un certain nombre d'unités fonctionnelles.(fig. 5).

Le système utilise 3 capteurs :

Vitesse

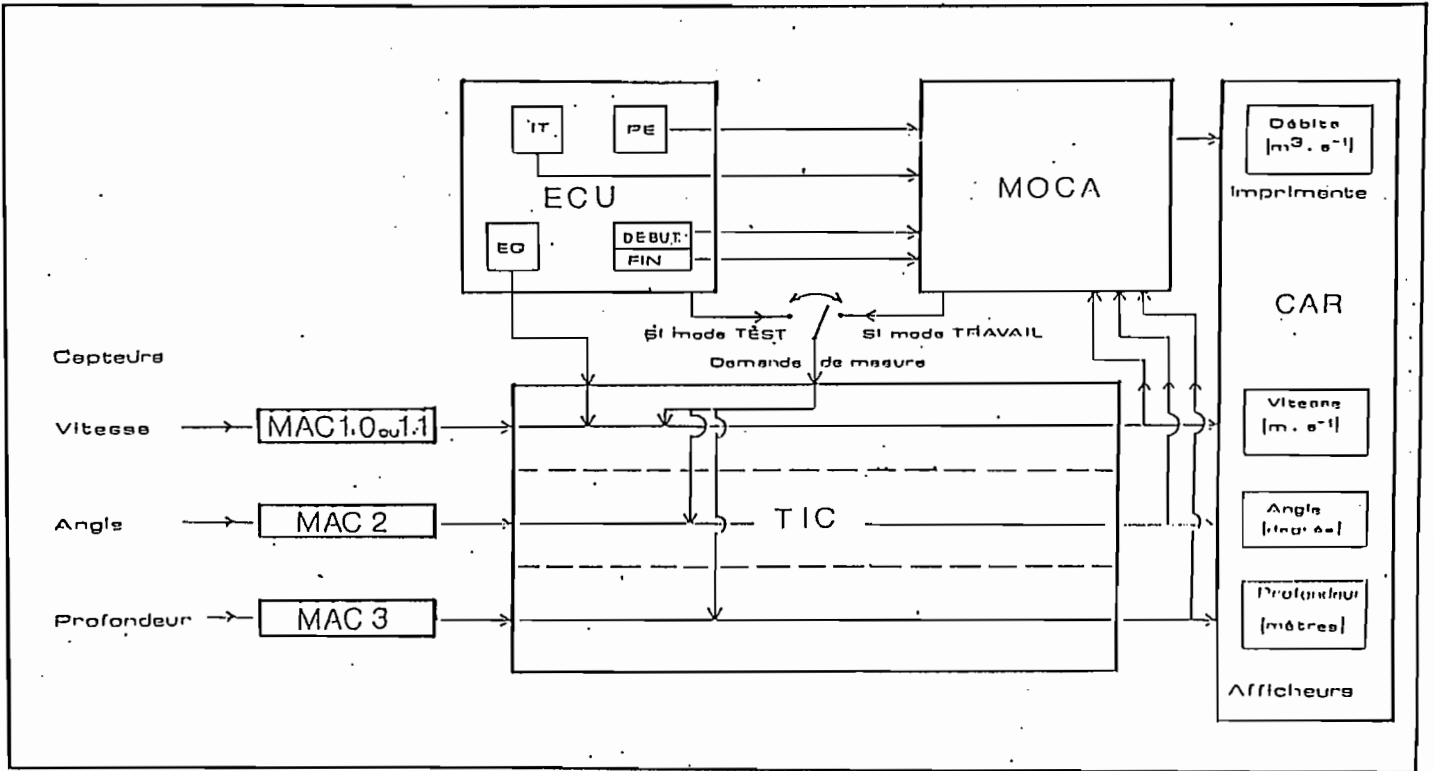
Angle

Profondeur

Chacun de ces capteurs présente en sortie un signal électrique en relation avec la grandeur physique mesurée. Un Module d'Adaptation Capteur (MAC) est donc requis sur chaque voie pour assurer l'entrée de ces données dans le module de Traitement de l'Information Capteur (TIC). Ces données sont utilisées par un Module de Calcul (MOCA), qui effectue les opérations arithmétiques requises pour l'obtention du débit de la rivière. Coté utilisateur, les sorties sont matérialisées sur un module de Contrôle et d'Affichage des Résultats (CAR), et les différentes commandes (début et fin de mesure, mode Test, ... etc. sont introduite à porter d'un module d'Entrée des Commandes Utilisateurs (ECU).

5. La mesure de la vitesse

L'ORSTOM utilise en Guyane, 2 types de moulinets fabriqués par OTT, le moulinet à impulsions et le moulinet à génératrice. Le deuxième type paraît mieux adapté à la technique du canot mobile, mais le modèle à impulsions est d'un usage plus répandu. On a donc admis que M.A.D. pourrait utiliser alternativement l'un ou l'autre type de capteur, ce qui suppose de développer deux modules MAC différents.



ECU: Entrée des Commandes Utilisateur
 MAC: Module d'Adaptation Capteur
 TIC: Traitement de l'Information Capteur
 CAR: Contrôle et Affichage des Résultats
 MOCA: Module de Calcul des débits

MAD : Mesure Automatisée des Débits

FIGURE 5 : Synoptique Fonctionnel de MAD

5.1. Le moulinet à impulsions (MAC 1.0.)

Le moulinet à impulsions produit à chaque tour d'hélice la fermeture d'un contact commandé par une masse aimantée tournante, solidaire de l'axe de l'hélice. La vitesse du courant produit ainsi un train d'impulsions. La tension d'alimentation aux bornes du moulinet ne doit pas dépasser 9 volts, mais peut-être bien inférieure à cette valeur, car en association avec un compteur à chiffres sautant de type F4, le constructeur alimente le moulinet avec 2 piles R20 (3 volts). Le pouvoir maximum de coupure de l'émetteur d'impulsions est de 1,6 watts, sous réserve d'un bon amortissement des pulsations dans les unités de comptage. Il paraît souhaitable de rechercher des puissances bien inférieures à ce seuil.

Si l'on compte un nombre total N d'impulsions pendant un temps de T secondes, la vitesse du courant est une fonction linéaire de $n = N/T$, c'est à dire du nombre de tours d'hélice par seconde.

Cette relation est propre à chaque moulinet et à chaque hélice. On a par exemple, pour le moulinet de type C 31 N° 35260, équipé de l'hélice N° 4, de pas nominal 0,125 m les relations :

$$V = 0.1287 \times n + 0.028 \text{ pour } n < 1,28 \text{ tours/seconde}$$

$$V = 0.1365 \times n + 0.018 \text{ pour } n > 1,28 \text{ tours/seconde}$$

En pratique, pour la réalisation de MAD, on pourra admettre qu'il n'existe qu'une seule et unique relation valable pour la gamme possible de n . Les vitesses de courant que l'on mesure par la méthode du bateau mobile se situent en général dans la gamme $0 - 1,5 \text{ m.S}^{-1}$, c'est à dire que l'on obtiendrait en sortie des impulsions de fréquences comprises entre 0 et 15 Hertz avec l'hélice présentée plus haut et en admettant une vitesse du bateau égale à celle du courant.

Ce type de capteur impose une contrainte très importante au module de traitement (TIC) : à chaque intervalle de temps T, on vient lire le nombre de tours N réalisés par l'hélice, de façon à calculer $n = N/T$. Or ce nombre N peut-être très faible (5 par exemple si T est petit, ou s'il y a peu de courant). Comme il y a obligatoirement une imprécision absolue d'un hertz à chaque comptage, l'erreur relative commise est alors très importante (20 % pour $n = 5$). De façon à ce que les erreurs ne se cumulent pas à chaque segment, il faut gérer un registre dans lequel est cumulé le nombre total des tours NR, depuis le début de la mesure. Le nombre N_i des tours d'hélices sur le segment de rang i étant obtenu par différence : $N_i = NR - N_{i-1}$.

5.1. Le moulinet à génératrice (MAC 1.1)

Sur ce type de capteur, l'hélice produit en tournant, un signal de mesure sous forme d'une tension proportionnelle à la vitesse d'écoulement.

A ce titre d'exemple, le moulinet OTT C 60 N° 82 624 muni de l'hélice 4 au pas nominal de 0,125m produit une tension qui est fonction de la vitesse sous la forme :

$$V = 0,1143 \times U + 0,04$$

$$V \text{ en m. s}^{-1}$$

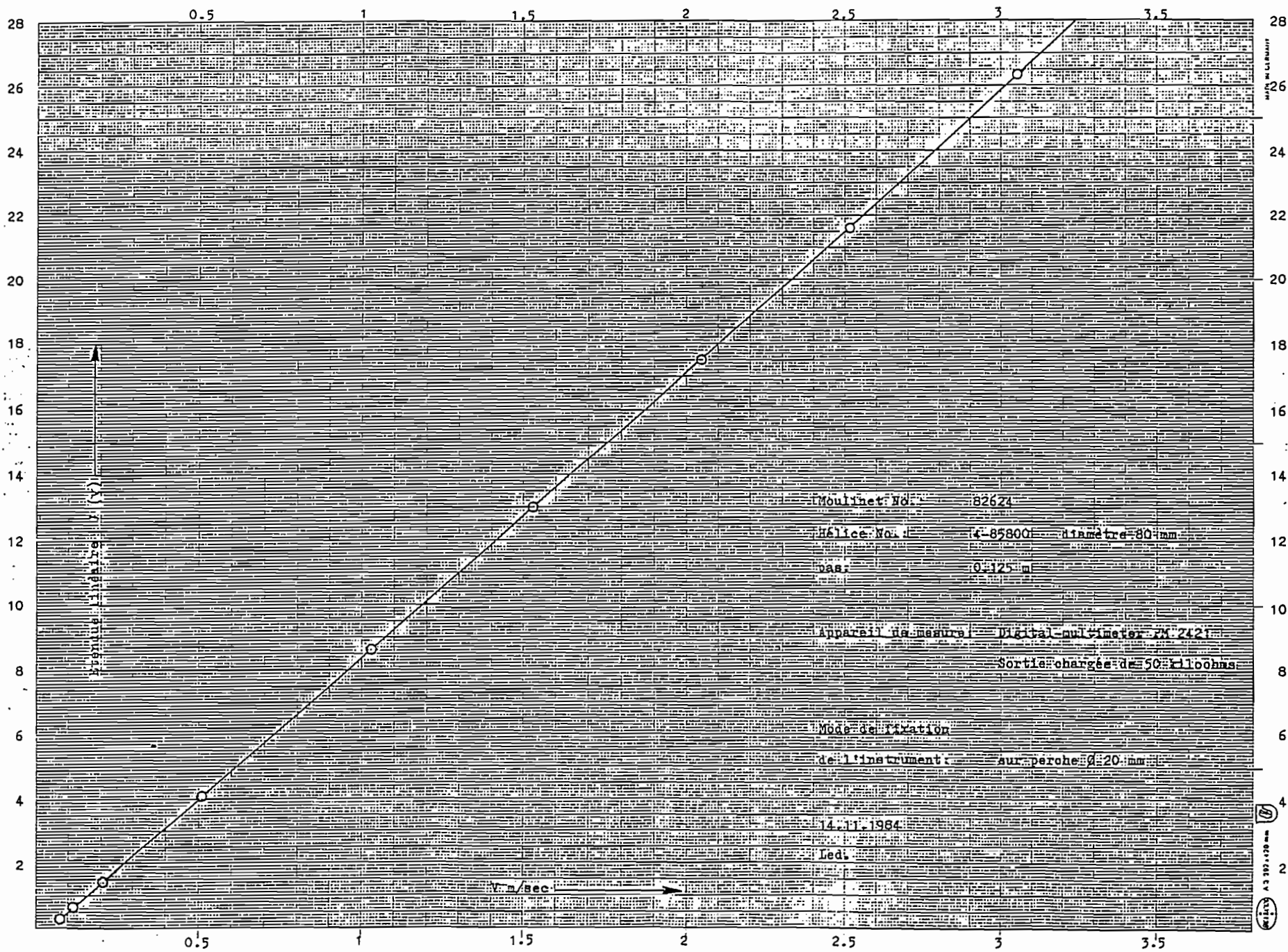
$$U \text{ en volt}$$

Pour que cette fonction soit vérifiée, il faut que la sortie du moulinet soit chargée à 50 kilo-ohms (fig. 6). A noter que pour la gamme des vitesses attendues sur les sites (0-1,5 m/s), la tension générés aux bornes ne dépasserait pas 15 volts.

L'avantage de ce type de moulinet, est de pouvoir acquérir la vitesse de façon instantanée, au lieu d'être tenu d'attendre un temps T pour obtenir un nombre minimum d'impulsions, comme c'est le cas avec les moulinets décrits précédemment.

Il serait judicieux que les sorties des cartes MAC 1.0 et MAC 1.1 soient identiques (connectique et signaux) de façon à ce que leur permutation soit transparente pour le module de traitement TIC à l'aval.

FIGURE 6 : Courbe d'étalonnage d'un moulinet
 OTI à génératrice.
 $V(m/s) = V \text{ (Volts)} \times 0.1143 + 0.04$



6. Mesure de l'angle (MAC 2)

Il s'agit de mesurer l'angle entre la palette-gouvernail du moulinet (qui se place dans le fil du courant apparent) et l'axe du profil en travers de la section de mesure. Ce capteur angulaire pourrait être un potentiomètre placé à l'extrémité supérieure de l'arbre vertical porte-moulinet. L'axe du potentiomètre serait solidaire du moulinet alors que le corps de celui-ci supporterait un oeilleton qui permettrait à un membre d'équipage de viser selon la section transversale, s'aidant d'un balisage implanté sur la berge.

Ce dispositif simple donnerait l'angle selon une fonction linéaire de la résistance. Il paraît cependant difficile à mettre en oeuvre pour des angles mesurés aussi bien à babord qu'à tribord, c'est pourquoi un codeur binaire donnant directement l'angle relatif paraît mieux adapté. La résolution requise pour ce dispositif est de un degré, en sachant qu'il sera difficile à l'observateur de faire des visées avec une précision de cet ordre.

Les caractéristiques du module MAC 2 dépendront de la solution choisie. On peut imaginer une sortie fréquence produite par un circuit oscillant R-C dans le cas de la mesure de l'angle par résistance variable, alors que l'utilisation d'un codeur numérique permettrait d'acquérir et de transmettre directement la valeur de l'angle en degré sur 8 bits parallèles.

7. Mesure de la profondeur (MAC 3)

La profondeur sera mesurée par un sondeur à ultra-sons. Le résultat de la mesure est visualisé sur un afficheur LCD, en mètres avec une précision de 0,1 m. L'acquisition du module MAC 3 sera donc une grandeur numérique, disponible sur une sortie de l'écho-sondeur, ou à récupérer à l'entrée du circuit de commande de l'afficheur.

8. Le module de Traitement de l'Information "Capteurs" (TIC)

Les fonctions du module TIC sont :

- . l'acquisition sur 3 voies des données capteurs (vitesse, angle, profondeur)
- . la transformation de ces données en unités "utilisateur". Ce cas concerne particulièrement la conversion du signal "vitesse", puisque la profondeur est directement disponible en unités métriques sous forme binaire et ceci peut également être le cas de l'angle en utilisant un codeur approprié
- . la visualisation de ces 3 données sur les afficheurs LCD du module ECU
- . la présentation des 3 données sur des ports, où celles-ci pourront être lues par le programme de calcul du débit du module MOCA.

9. Le module d'Entrée des Commandes Utilisateur (ECU)

Ce module est destiné à introduire dans l'unité de traitement les paramètres spécifiques à chaque jaugeage ainsi que les commandes requises en utilisation opérationnelle.

9.1. Les commandes

C1 : interrupteur général (On/Off)

C2 : Mode TEST ou mode TRAVAIL (contacteur bistable)

Le mode "TEST" permet de contrôler le fonctionnement des capteurs, des cartes MAC et du traitement des données sur chacune des voies. Les valeurs de la vitesse, de l'angle et de la profondeur sont affichées sur le module CAR (voir 11). Dans le mode "TEST", cette mesure est déclenchée sur les 3 voies par enfoncement d'un contacteur (C3). Dans ce mode aucun traitement interactif entre paramètres n'est réalisé par le module MOCA.

Le mode "TRAVAIL" configure l'automate en situation d'attente pour un jaugeage (pour une traversée).

C4 : début de mesure (contacteur).

Actionné par un opérateur au moment où le bateau commence sa traversée, c'est dire quand on double la bouée matérialisant la section.

Ce signal correspond à l'initialisation du programme de traitement de MOCA, à la mise à zéro des registres, à la lecture des paramètres IT et PE (voir 9.2.), etc...

C5 : fin de mesure (contacteur).

Actionné par l'opérateur quand on atteint la bouée sur la rive opposée, provoque le calcul du débit et l'affichage du résultat final.

9.2. les paramètres de la mesure

Certains paramètres de la mesure ne peuvent être figés à l'avance et il parait nécessaire de laisser aux opérateurs la possibilité de sélectionner leurs valeurs en fonction du site ou du matériel utilisé.

IT : c'est l'intervalle de temps qui sépare deux acquisitions successives de vitesses, angles et profondeurs. Cet intervalle détermine le nombre de segment de la traversée. Il paraît intéressant de pouvoir modifier facilement IT sur le prototype et de faire plusieurs traversées successives avec différentes valeurs de IT. Il faut se souvenir qu'avec un moulinet à génératrice (MAC 1.1) on peut théoriquement faire tendre IT vers zéro sans problèmes, alors qu'avec un moulinet à impulsions il faut laisser s'écouler un temps IT suffisant pour obtenir un nombre minimum d'impulsions. La solution matérielle préconisée serait la sélection et l'affichage de IT sur la face avant du boîtier MAD au moyen de 2 roues codeuses. (IT en secondes, variant entre 0 et 99).

PE : profondeur d'immersion du transducteur du sondeur à ultrasons. La profondeur réelle en un point donné est la valeur mesurée par le sondeur + PE. Au stade actuel du projet, il paraît difficile de fixer cette valeur et il est souhaitable de pouvoir l'imposer au système de traitement. La solution de la roue codeuse paraît la mieux adaptée. (profondeur en dizaine de centimètres sur 1 digit (0 à 9 ou 0 à F)).

Les deux valeurs PE et IT sont lues par le programme de calcul du débit, en début de mesure (Action sur la commande C4).

EQ : caractéristiques de l'équipement. Il s'agit de fournir au système les équations de conversions des capteurs de vitesse (moulinet), soit $V = f$ (tension) pour le moulinet à génératrice, soit $V = f$ (tours par seconde) pour le modèle à impulsion. L'introduction sur le site nous paraît lourde, représente une source d'erreurs et nécessite de gérer un clavier et un afficheur en mode conversationnel.

Il vous paraît préférable de déterminer un certain nombre de configurations matérielles, affichables par roue codeuse (0 à 9) et de mémoriser les équations correspondantes ou les tables de linéarisation sur une mémoire EPROM. Cette caractéristique d'équipement ne concerne pas les paramètres profondeur et angle qui sont disponibles en grandeur physique à la sortie des capteurs.

Il faut noter que si les paramètres IT et PE sont requis par le module MOCA seulement au moment du jaugeage (pendant la traversée), les paramètres de moulinet pointés par EQ sont nécessaires au niveau du TIC aussi bien en mode "TEST" qu'en mode "TRAVAIL", donc en fait dès la mise sous tension du système MAD.

10. Le module de calcul en débit (MOCA)

La fonction de ce module est d'assurer le calcul des débits partiels, segment par segment et leur sommation pour résultat final. La séquence logique est la suivante :

- A la fin du $i^{\text{ième}}$ intervalle de temps IT, acquisition des V_i , d_i et p_i présents sur les ports en sortie du module TIC.

- Calcul de la vitesse du courant

$$V_{c_i} = V_i \cdot \sin \alpha$$

- Calcul de la largeur du segment l_i

$$l_i = (V_{b_i} + V_{b_{i-1}}) / 2 \times IT$$

- Calcul de la profondeur moyenne du segment d_i

$$d_i = (d_i + d_{i-1}) / 2 + PE$$

- Calcul du débit partiel du segment i . (q_i)

$$q_i = (Vc_i + Vc_{i-1})/2 \times d_i \times l_i$$

- Cumul des débits partiels dans le registre du débit total Q

$$Q = Q + q_i$$

Ce processus itératif est interrompu par la pression de la touche C5 (fin de mesure) qui déclenche la sortie du résultat final après sommation du débit partiel du dernier segment.

11. Contrôle et Affichage des Résultats (Module CAR)

La proposition de mise à disposition des résultats en cours de mesure, est la suivante :

A chaque mesure faite, en mode "TEST" comme en mode "TRAVAIL", visualisation des vitesses, angles, et profondeur sur des afficheurs LCD :

Vitesse : en $m.s^{-1}$, 1 digit, 1 point décimal, 2 décimales.
(0.00 à 9.99).

Angle : en degré, 2 digits. (0 à 90°)

Profondeur : en mètres, 2 digits, point décimal, 1 décimale
(00.0 à 99.9).

Pour pouvoir contrôler à postériori le fonctionnement de MAD et détecter la présence d'un point aberrant dans la mesure, l'utilisateur souhaite avoir une trace écrite de ces résultats.

A la fin du jaugeage on disposerait alors d'un listing comportant :

- IT, PE et EQ : paramètres de la mesure.
- pour chaque point de mesure de rang i , le listage de i , V_i , α_i , d_i , l_i , q_i (débit partiel).
- en fin de mesure du résultat $Q = \sum q_i$ et de la largeur calculée $L_i = \sum l_i$.

Ceci suppose l'intégration d'une imprimante à ruban thermique dans le boîtier MAD. Se pose alors le problème de la gestion de ce périphérique si l'utilisateur sélectionne des temps IT très courts (une seconde, par ex.). On peut envisager de limiter ce paramètre, à un seuil minimum, (2 secondes par ex.), si la gestion de l'imprimante devient trop complexe (problème de gestion d'une mémoire tampon)

Il restera à l'opérateur deux corrections manuelles simples, à apporter au résultat final pour obtenir le débit réel de la rivière.

- . multiplier le résultat par V/V_{100} (rapport de la vitesse moyenne avec la vitesse à 1 mètre de profondeur).
- . effectuer la correction de largeur, égale au rapport $\sum l_i / L$, ou $\sum l_i$ est la largeur calculée pendant la mesure et L est la largeur du site connue et mesurée par des moyens appropriés. (topographiques, télémétriques, etc...).

12. Alimentation - conditionnement

La source d'alimentation sera une batterie au plomb gelifiée ou un accumulateur NiCa . La tension nominale est de 12 volts avec une capacité de l'ordre de 4 ou 5 Ah. Il est souhaitable que les alimentations de MAD ne soit pas trop "pointues" et puissent fonctionner avec des batteries un peu déchargées. (11,5 V. par exemple).

Le conditionnement de l'ensemble devra être suffisamment compact pour faciliter le transport, avec une étanchéité aux projections d'eau. (Par exemple, armoire électrique en PVC SAREL ou LEGRAND - 60 x 40 cm).

La connectique des sorties capteurs sur le module MAD devra comporter des dispositifs de verrouillage des prises.

On admettra que la longueur des cables entre les capteurs et le boitier MAD ne dépassera pas 5 mètres.

Les voies de mesure et les différents modules fonctionnels seront protégés par des fusibles accessibles sur la face avant. Des points de test permettant la mesure des tensions d'alimentation des modules et des signaux capteurs seront également implantés sur cette face avant.

BIBLIOGRAPHIE :

- . Hydrometric Field Manual - Moving Boat Method.
Inland Waters Directorate, Water Resources Branch, Environment,
OTTAWA CANADA, 1978. 23 pages

- . Mesure de débit liquide dans les canaux découverts. Méthode du
Canot Mobile. Projet de Norme Industrielle ISO/DIS 4369 - 1977.
30 pages.

- . M. ALDEGHERI - Manuel d'Hydrométrie. Tome IV, Mesure des débits
à partir des vitesses. Col. initiations et documents techniques
n° 41 - ORSTOM, PARIS, 1979. 313 pages.

- . J.M. FRITSCH - Note concernant les jaugeages par la méthode du
bateau mobile - ORSTOM - CAYENNE, septembre 1978.

PROJET DE NORME INTERNATIONALE ISO/DIS 4369

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Méthode du canot mobile

1 OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

La présente Norme internationale spécifie des méthodes de mesure du débit dans les grands cours d'eau par la technique du canot mobile. Les chapitres qui suivent esquissent les procédés relatifs à cette méthode et décrivent les caractéristiques générales du matériel nécessaire.

Elle reproduit en annexe et en fac similé un exemple complet de calcul de mesure avec un canot mobile.

2 RÉFÉRENCES

ISO 748, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Méthode d'exploration du champ des vitesses.

ISO 772, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Vocabulaire et symboles.

ISO 3454, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Matériel de sondage et de suspension.

ISO 5168, Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit.¹⁾

ISO . . . , Analyse de l'erreur totale sur la mesure de débit par les méthodes du champs des vitesses.²⁾

3 DÉFINITIONS

Les termes utilisés dans la présente Norme internationale sont ceux qui sont définis dans l'ISO 772.

4 UNITÉS DE MESURE

Les unités de mesure utilisées dans la présente Norme internationale sont les unités SI.

5 GÉNÉRALITÉS

Il est fréquemment impossible, sur les grands cours d'eau ou dans les estuaires, de suivre les méthodes classiques de mesure du débit à l'aide de moulinets, qui mettent en œuvre des procédures coûteuses et fastidieuses. Cela vaut en particulier dans les endroits reculés, où ces moyens n'existent pas ou pendant les inondations, les moyens de mesure étant submergés ou inaccessibles.

Dans les emplacements où les conditions instables d'écoulement exigent des mesures aussi rapides que possible, la technique du canot mobile est alors utilisée. Elle n'exige pas d'installations fixes et se prête à l'utilisation d'emplacements alternés.

La technique du canot mobile se base sur une exploration du champ des vitesses pour déterminer le débit. La technique nécessite les renseignements suivants :

- a) emplacements des points d'observation le long du cours d'eau, en fonction de la distance à un point d'origine;
- b) profondeur du cours d'eau, d , en chaque point d'observation;
- c) vitesse du cours d'eau, v , perpendiculairement à la section transversale, en chaque point d'observation.

1) Actuellement au stade de projet.

2) En préparation.

La principale différence entre une mesure classique et la mesure à l'aide d'un canot mobile résulte du mode de rassemblement des données. Dans le cas de la méthode traditionnelle, on détermine la vitesse moyenne dans les segments d'une section transversale du cours d'eau à partir de vitesses ponctuelles ou par intégration de la moyenne des vitesses sur une verticale. Dans le cas de la méthode à l'aide du canot mobile, la vitesse est mesurée sur toute la largeur d'un segment en suspendant le moulinet à une profondeur constante pendant la traversée du cours d'eau par le canot. La vitesse mesurée et les informations supplémentaires recueillies par le sondage en profondeur donnent les moyens nécessaires pour déterminer le débit.

6 PRINCIPE DE LA MÉTHODE

La mesure avec le canot mobile se fait par traversée du cours d'eau le long d'une trajectoire prédéterminée normale à l'écoulement (voir figure 1). Pendant la traversée, un sondeur à écho enregistre la forme géométrique de la section transversale et un moulinet fonctionnant en continu relève les vitesses combinées du cours d'eau et du canot.

Une troisième série de données nécessaires est obtenue soit en mesurant à intervalles l'angle formé par le moulinet qui s'aligne parallèlement au mouvement de l'eau, et par la route vraie du canot, soit en mesurant la distance par rapport à un point fixe de la rive.

La mesure de la vitesse relevée en chacun des points d'observation dans la section transversale est une grandeur vectorielle représentant la vitesse relative de l'eau au niveau du moulinet. Cette vitesse, v_v , est la somme vectorielle de v , composante de la vitesse du cours d'eau intégrée en fonction du temps, normalement à la trajectoire du canot dans l'intervalle et de v_b , vitesse du canot par rapport au lit du cours d'eau le long de la trajectoire choisie, cette somme vectorielle représentant la vitesse relative de l'eau au niveau de l'ensemble du moulinet. Le diagramme vectoriel de la figure 2 décrit cette relation.

Les données d'échantillonnage relevées en chaque point d'observation fournissent les informations nécessaires pour définir la vitesse du cours d'eau. Il existe deux méthodes pour déterminer cette vitesse; elles sont généralement appelées méthode I et méthode II.

La méthode I consiste à mesurer l'angle α entre la route vraie du canot et une palette verticale qui s'aligne sur la direction de l'eau à son niveau. Un indicateur d'angle fixé au support de la palette indique l'angle α .

La méthode II consiste à mesurer la distance entre les points d'observation et un point fixe de la rive d'où l'on peut déterminer la largeur du segment traversé tout en mesurant le temps. Ces données permettent de calculer la composante de vitesse du canot, v_b , et, après mesure de la vitesse totale, v_v , de déterminer la composante de vitesse du cours d'eau, v .

La mesure relevée par l'indicateur de vitesse en nombre d'impulsions par seconde sert, en combinaison avec une table spéciale, à calculer la grandeur du vecteur v_v .

Les données sont normalement recueillies en 30 à 40 points d'observation de la section transversale pour chaque cycle. On peut, en cas de possibilité, enregistrer automatiquement et simultanément tous les paramètres requis.

6.1 Détermination de la vitesse du cours d'eau

La méthode I permet de déterminer la vitesse du cours d'eau, v , perpendiculairement à la trajectoire du canot (route vraie) en chaque point d'observation 1, 2, 3 . . . , à partir de la relation :

$$v = v_v \sin \alpha \quad \dots (1)$$

La solution de l'équation (1) donne une réponse représentant la composante de vitesse du cours d'eau perpendiculaire à la course vraie, même si le sens d'écoulement n'est pas perpendiculaire.

La méthode II permet de déterminer la vitesse du cours d'eau à partir de la relation

$$v = \sqrt{v_v^2 - v_b^2} \quad \dots (2)$$

où v_b est obtenue à partir de

$$v_b = \frac{l_i - l_{i-1}}{t_i} \quad \dots (3)$$

(voir figure 3)

où

i est l'ordre du point d'observation;

l_i est la distance entre le point d'observation i et un point fixe de la rive;

t_i est le temps requis pour traverser la largeur du segment i .

6.2 Détermination de la distance entre les points d'observation

Si l'on multiplie le diagramme vectoriel (voir figure 2) par dt pour le convertir en un diagramme de distances croissantes, on obtient :

$$\Delta l_b = \int v_v \cos \alpha dt \quad \dots (4)$$

où Δl_b est la distance parcourue par le canot le long de la route vraie entre deux points d'observation consécutifs, pourvu que la vitesse du cours d'eau soit perpendiculaire à la trajectoire du canot.

Lorsque la vitesse n'est pas perpendiculaire, un réglage est nécessaire comme expliqué en 9.3.

Si l'on suppose que α est à peu près uniforme sur la distance relativement courte constituant un gradient, on peut le considérer comme constant.

En appliquant la méthode I, l'équation (4) devient donc

$$\Delta l_b \approx \cos \alpha \int v_v dt \quad \dots (5)$$

ou

$$\int v_v dt = \Delta l_v$$

où Δl_v est la distance relative dans l'eau entre deux points d'observation consécutifs représentés par les signaux de sortie de l'indicateur de vitesse et du compteur.

Donc pour la i ème distance relative :

$$\Delta l_{b_i} \approx \Delta l_{v_i} \cos \alpha_i \quad \dots (6)$$

la largeur totale, B , de la section transversale est :

$$B = \sum_{i=1}^{i=m} \Delta l_{b_i} \approx T \sum_{i=1}^{i=m} \Delta l_{v_i} \cos \alpha_i \quad \dots (7)$$

Si l'on utilise la méthode II, la largeur de l'intervalle compris entre les points d'observation est calculée comme la différence entre les mesures de distance à un point fixe sur l'une des rives comme indiqué à l'équation (3).

6.3 Détermination de la profondeur du cours d'eau

La profondeur du cours d'eau en chaque point d'observation est obtenue par addition de la profondeur du capteur à la profondeur indiquée sur le diagramme du sondeur à écho.

7 LIMITES

La méthode du canot mobile est applicable aux cours d'eau assez larges et profonds, normalement de plus de 300 m de largeur et de plus de 2 m de profondeur.

La largeur minimale exigée dépend du nombre de segments divisant la section et du temps minimal nécessaire pour parcourir ces segments afin d'obtenir une bonne précision dans les mesures.

Le nombre de segments doit être d'au moins 25.

La largeur de chaque segment dépend de la précision avec laquelle la vitesse peut être mesurée dans chaque segment. L'intervalle entre deux points d'observation doit être suffisant pour permettre à l'observateur de lire les instruments et d'enregistrer les résultats. La vitesse minimale du canot doit être telle que le canot puisse traverser la section en droite ligne. Pour des résultats optimaux, la vitesse du canot doit en général être du même ordre que celle du cours d'eau.

Le cours d'eau doit avoir une profondeur suffisante pour le tirant du canot et pour permettre sa manœuvre dans la traversée de la section. Les faibles profondeurs peuvent endommager les instruments puisque le débitmètre ou le prolongateur de la palette descendent à environ 1 m en dessous du canot.

Le cours d'eau ne doit pas présenter de courants en profondeur comme c'est le cas dans les canaux à marée où ces courants remontent l'écoulement dont on mesure la vitesse. Dans ce cas, la répartition des vitesses sur une verticale est inconnue et on ne peut pas rapporter de façon satisfaisante la vitesse moyenne à la vitesse mesurée.

Le débit ne doit pas varier de manière à fausser les résultats de manière indue pendant la traversée du canot. Dans des conditions d'écoulement instables, comme dans les cours d'eau à marée, il est souhaitable en règle générale de ne pas faire la moyenne d'une série d'essais, mais plutôt de traiter chaque résultat séparément pour mieux définir le cycle de l'écoulement (voir figure 4).

8 MATÉRIEL

8.1 Généralités

Le matériel nécessaire est similaire quelle que soit la méthode utilisée (voir chapitre 5).

L'essentiel du matériel requis pour les deux méthodes est indiqué ci-dessous. Une description plus détaillée du matériel est donnée à l'annexe A.

8.2 Canot

Un petit canot, de manœuvre facile et suffisamment stable pour le genre de cours d'eau sur lequel il doit être utilisé.

8.3 Palette et indicateur d'angle — Méthode I

Une palette équipée d'un mécanisme indicateur est montée en un endroit approprié du canot, généralement la proue. L'angle entre la direction de la palette et la route vraie du canot est indiqué sur un cadran par une aiguille alignée sur la palette. Un système de visée fixé au cadran pivotant librement permet d'aligner l'index de ce cadran sur la route vraie du canot. Le cadran est gradué en degrés (de 0 à 90°) des deux côtés de l'index.

8.4 Moulinet

Le moulinet utilisé est un élément du type à hélice avec une carrosserie spécialement conçue dans le cas de la méthode I pour s'adapter au bord d'attaque de la palette. Dans le cas de la méthode II, le moulinet et son saumon doivent être suspendus à un câble attaché au canot. Les caractéristiques du matériel de suspension doivent être conformes aux exigences de l'ISO 3454.

8.5 Indicateur de vitesse et compteur

Les rotations du moulinet sont transmises sous forme d'impulsions électriques affichées sur un compteur ou converties par l'intermédiaire d'un appareil électronique en mesure de vitesse. Dans le premier cas, les impulsions sont converties en vitesses à l'aide de la table de caractéristiques du moulinet.

Si l'on emploie la méthode I, le compteur doit permettre un pré-réglage du nombre d'impulsions comptées électroniquement. Un signal audible se déclenche lorsque le nombre fixe est atteint et le graphique du sondeur à écho s'imprime automatiquement. Le compteur doit reprendre seul son réglage initial avant de répéter la mesure. La figure 5 donne un schéma et une description de l'indicateur de vitesse et du compteur.

8.6 Mesure de la distance — Méthode II

Pour situer les points d'observation dans la section, il faut mesurer la distance entre chaque point et un point fixe de la rive. La mesure de distance peut se faire par des moyens optiques par exemple un télémètre ou par un appareil électronique, par exemple radiolog.

Le système de mesure de la distance doit être raccordé (par relais) au sondeur à écho de manière qu'en chaque point d'observation un trait vertical puisse venir s'imprimer (automatiquement ou à la main) sur le graphique du sondeur.

8.7 Sondeur à écho

Un sondeur à écho (portatif) doit servir à l'enregistrement en continu sur bande graphique de la profondeur de la section entre deux flotteurs. Ce sondeur à écho doit être raccordé par relais à l'indicateur de vitesse et au compteur ou à l'indicateur de distance pour déclencher le repérage par traits verticaux sur le graphique du sondeur en chaque point d'observation.

9 MÉTHODES DE MESURE

Le processus de mesure par canot mobile comprend le choix et la préparation de l'emplacement adéquat, la préparation et le montage du matériel de mesure et le choix des réglages des instruments servant au rassemblement des données.

9.1 Choix de l'emplacement

L'emplacement de mesure doit être choisi là où l'on peut s'attendre à un écoulement assez uniforme; c'est-à-dire à des lignes d'écoulement aussi parallèles que possible et à un lit sans irrégularités trop marquées.

9.2 Préparation de l'emplacement

L'emplacement doit subir quelques préparations avant que ne débute une série de mesures par canot mobile.

9.2.1 Il faut en premier lieu, choisir une trajectoire du canot qui soit autant que possible perpendiculaire à la direction de l'écoulement. Il faut ensuite placer sur chaque rive, dans l'alignement de cette trajectoire, deux repères de zones clairement visibles. La couleur de ces repères doit se détacher fortement sur l'arrière-plan. L'écartement des repères est fonction de la longueur de la trajectoire. Des espacements de 30 m environ sont nécessaires pour une longueur de trajectoire de 300 m.

9.2.2 Des flotteurs balisant la trajectoire choisie marquent l'origine et la fin des mesures. Ils sont ancrés dans le cours d'eau de 12 à 15 m de chaque rive (voir figure 1). Cette distance est nécessaire au cours de la traversée pour manœuvrer le bateau à l'entrée ou à la sortie de la trajectoire. Les flotteurs doivent être placés dans un endroit où la profondeur d'eau est toujours supérieure à 1 m (profondeur de la palette ou du moulinet).

Il est préférable de ne pas les placer directement sur la trajectoire du canot mais plutôt de les décaler de 3 à 6 m vers l'amont pour qu'ils ne se trouvent pas sur le chemin du canot abordant la trajectoire choisie.

9.2.3 On peut mesurer la largeur du cours d'eau par triangulation, par «stades» ou par d'autres méthodes, et définir la position exacte des flotteurs. On relève la distance entre les flotteurs et le bord de l'eau (à l'aide d'une chaîne d'arpenteur par exemple) et on inscrit le résultat dans la partie principale du procès-verbal de mesure servant au calcul du débit. Si l'on utilise la méthode I, il est préférable d'avoir des repères de zone permanents permettant de calculer la largeur vraie de façon convenable entre les repères et la rive. Si l'on utilise la méthode II, il faut vérifier l'écartement des repères avant chaque mesure, ce qui permet de vérifier l'étalonnage du système de mesure des distances.

9.3 Fonctions des membres de l'équipage

Trois membres d'équipage expérimentés sont généralement nécessaires pour procéder à une mesure de débit à partir d'un canot mobile. Ce sont, pour la méthode I, un opérateur pour le canot, un observateur d'angle et un releveur; pour la méthode II, un opérateur pour le canot, un observateur pour les impulsions du moulinet qui sert également de releveur, et un opérateur relevant les distances.

Avant de procéder aux mesures de débit à partir d'un canot mobile il est important que les membres de l'équipage aient fait preuve d'un haut degré de compétence dans toutes les phases de la technique.

Une brève description des fonctions des membres de l'équipage est donnée ci-dessous. Une description plus détaillée figure en annexe A.

- a) Le releveur est le responsable de la préparation et de l'exécution de la mesure. Il doit aussi noter le résultat des mesures (voir annexe B).
- b) L'opérateur du canot doit être familier de l'emplacement de mesure et doit veiller à ce que le canot demeure autant que possible aligné sur la transversale de la section de mesure.
- c) L'observateur d'angle (méthode I) doit lire l'angle formé par la palette et la course vraie du canot, et en rapporter le résultat au releveur.
- d) L'observateur de distance (méthode II) doit relever la distance qui sépare le canot d'un des repères de la rive à l'aide d'un instrument optique ou électronique. Il doit noter les points d'observation sur le graphique du sondeur à écho si cette opération se fait manuellement.

Si les enregistrements se font simultanément et de façon automatique, le nombre des membres d'équipage peut être réduit à deux.

10 CALCUL DU DÉBIT

10.1 Généralités

Le débit est donné théoriquement par la formule

$$Q = A \int v(x,y) dx dy$$

où

Q est le débit vrai,

A est la section transversale;

$v(x,y)$ est le champ des vitesses sur la largeur et la profondeur.

En pratique, l'intégrale se calcule de manière approchée par la somme :

$$Q_m = \sum_{i=1}^{i=m} b_i d_i \bar{v}_i \quad \dots (8)$$

où

Q_m est le débit calculé;

b_i est la largeur du $i^{\text{ème}}$ segment;

d_i est la profondeur du $i^{\text{ème}}$ segment;

\bar{v}_i est la vitesse moyenne dans le $i^{\text{ème}}$ segment;

m est le nombre de segments.

Le résultat d'une mesure de débit dans le cours d'eau est la somme des produits des surfaces partielles de la section transversale du cours d'eau, multipliée par leurs vitesses moyennes respectives.

La technique du canot mobile est similaire à la méthode normale de mesure au moulinet (champ des vitesses) en cela qu'elle utilise le mode de calcul à mi-section de la section transversale pour les mesures de débit. Cette méthode suppose que la vitesse relevée à mi-section représente la vitesse moyenne dans le segment. Cette zone s'étend horizontalement de la moitié de la distance au moulinet précédent à la moitié de la distance au moulinet suivant, et verticalement de la surface de l'eau jusqu'à la profondeur sondée (voir ISO 748).

10.2 Méthode de calcul

On a superposé à la figure 3 le schéma explicatif de la méthode de calcul de la section transversale à mi-section pour les mesures de débit, sur le fac simulé d'un profil transversal obtenu à partir du graphique du sondeur sonique. La section transversale est définie par les profondeurs aux emplacements 1, 2, 3, ..., n, marqués pendant la mesure sur le graphique du sondeur sonique.

Selon la méthode à mi-section, le débit partiel dans n'importe quelle section se calcule pour un emplacement i de la manière suivante :

$$q_i = v_i \left[\frac{l_{(i+1)} - l_{(i-1)}}{2} \right] d_i \quad \dots (9)$$

où

q_i est le débit non corrigé dans la section i ;

v_i est la vitesse de l'échantillon à l'emplacement i ;

$l_{(i-1)}$ est la distance du point d'origine à l'emplacement précédent;

$l_{(i+1)}$ est la distance du point d'origine à l'emplacement suivant;

d_i est la profondeur de l'eau à l'emplacement i .

La vitesse du cours d'eau doit être déterminée pour l'emplacement i soit par l'équation (1) dans le cas de la méthode I, soit par l'équation (2) dans le cas de la méthode II. Pour de plus amples détails, voir les tableaux 1 et 2 où figure un calcul complet pour les méthodes I et II respectivement.

La distance entre le point d'origine (repère sur la rive) et le point d'observation où sont faits les relevés est la somme des distances cumulées entre les positions du moulinet et le flotteur, le flotteur et le bord de l'eau et la rive et le repère (voir figure 3), ces deux dernières distances étant mesurées séparément pour chaque rive. Les distances sont définies comme suit :

l_1 = distance entre le point d'origine (repère) et le bord de l'eau

l_2 = l_1 + distance mesurée entre le flotteur et le bord de l'eau

l_3 = l_2 + Δl_{b3}

l_4 = l_3 + Δl_{b4}

$l_{(n-1)}$ = $l_{(n-2)}$ + $\Delta l_{b(n-1)}$

l_n = $l_{(n-1)}$ + distance mesurée entre le flotteur et le bord de l'eau

$l_{(n+1)}$ = l_n + distance au point final (repère)

Dans ce qui précède, Δl_{b_i} est la distance entre l'emplacement considéré du moulinet et l'emplacement précédent déterminé selon la méthode I.

Dans la méthode II, les distances l_i au repère sont mesurées directement. Chacune des largeurs de segment représente la distance horizontale entre la moitié de la distance à l'emplacement précédent du moulinet ($i-1$) et la moitié de la distance à l'emplacement suivant ($i+1$). Par exemple, la largeur du segment i équivaut à

$$b_i = \frac{l_{(i+1)} - l_{(i-1)}}{2} \quad \dots (10)$$

On détermine la profondeur du cours d'eau en chaque point de mesure de la section en ajoutant la profondeur d'immersion du capteur à chacune des mesures de profondeur enregistrées sur le graphique du sondeur sonique aux remplacements d'échantillonnage.

Suivant les appareils utilisés, l'addition peut éventuellement se faire de manière automatique.

Les surfaces partielles des segments sont obtenues en multipliant la largeur par la profondeur obtenues par l'équation (9) en chaque point de mesure.

Ces surfaces partielles sont ensuite ajoutées les unes aux autres pour obtenir la surface globale non corrigée de la mesure.

Suivant l'équation (8), on obtient le débit (non corrigé) au niveau d'un segment donné en multipliant la surface non corrigée par la vitesse mesurée au point d'observation. Ces valeurs sont à additionner pour obtenir le débit total (non corrigé) correspondant à la mesure. Les parenthèses se rapportent à la méthode I.

10.3 Correction de largeur dans le cas d'un écoulement oblique — Méthode I

10.3.1 Généralités

Il est des cas où, à l'emplacement de mesure choisi, l'écoulement n'est pas perpendiculaire à la section transversale. Si l'on applique la méthode I, la largeur des segments doit alors être calculée d'après la formule (6) :

$$\Delta l_{b_i} \approx l_{v_i} \Delta \cos \alpha_i$$

Cette équation est fondée sur l'hypothèse qu'une relation du type triangle rectangle existe entre les vecteurs de vitesse considérés.

Si l'écoulement n'est pas normal à la section transversale, cette situation ne se rencontre pas et l'équation peut donner une largeur calculée trop grande ou trop petite (voir figure 6) selon que la grandeur vectorielle représentant l'écoulement oblique a une composante horizontale opposée à la direction du canot ou dans le même sens que celle-ci.

Si l'on utilise la méthode II, il n'y a pas besoin de correction de largeur puisque les distances sont mesurées directement.

La composante de l'écoulement normale à la section transversale ne dépend pas de la composante de vitesse du canot tant que la trajectoire du canot est parallèle à cette section.

Pour compenser les écarts minimes de sens d'écoulement ou les écarts entre trajectoire du canot et section transversale, il convient d'effectuer un nombre égal de mesures dans chaque sens. Voir figures 7a) et 7b).

10.3.2 Calcul de la correction de largeur — Méthode I

Dans l'idéal, la correction de l'erreur sur la largeur calculée devrait être appliquée à l'échelon de la section transversale où se produit l'erreur.

En pratique cependant, seule la largeur globale se mesure directement et donc est connue et peut servir à une comparaison avec les grandeurs calculées. Si la somme des échelons de largeur calculés n'équivaut pas à la largeur mesurée de la section transversale, on procède à des corrections proportionnelles dans chaque échelon.

La méthode du canot mobile se sert du rapport entre les largeurs mesurées et calculées de la section transversale pour déterminer le facteur de correction largeur/surface. Pour obtenir ce coefficient, on divise la largeur mesurée de la section par la largeur calculée, ce qui donne :

$$k_B = \frac{B_m}{B_c} \quad \dots (11)$$

où

k_B est le coefficient de correction largeur/surface;

B_m est la largeur mesurée de la section transversale;

B_c est la largeur calculée de la section transversale.

Le coefficient sert ensuite à corriger les valeurs de surface totale et de débit total de la mesure, comme si l'erreur sur la largeur était répartie de façon uniforme en pourcentage sur chaque échelon de largeur de la section.

Voir le tableau 1 pour un exemple d'application du coefficient de correction largeur/surface.

10.4 Correction de la vitesse moyenne sur une verticale

10.4.1 Généralités

Pendant une mesure de débit avec canot mobile, le moulinet est réglé à une profondeur fixe, déterminée à l'avance, d'environ 1 m en dessous de la surface de l'eau (voir chapitre 6); cette technique fait donc usage de la méthode de mesure de la vitesse sous la surface. Le calcul se fait d'après des mesures de vitesse effectuées à profondeur constante sous la surface sans coefficients de correction comme si celles-ci représentaient toutes une moyenne sur la verticale. L'emploi de cette méthode permet dans l'idéal de multiplier chaque vitesse mesurée par un coefficient pour obtenir la vitesse moyenne sur la verticale. On suppose cependant que dans les grands cours d'eau où la technique du canot mobile est utilisable, ces coefficients sont relativement uniformes dans toute la section transversale, ce qui permet d'appliquer au débit total un coefficient moyen pour la section. Il est nécessaire d'avoir des données relevées sur plusieurs courbes de vitesse, sur des verticales convenablement réparties sur l'emplacement de mesure, pour déterminer un coefficient représentatif de toute la section transversale.

10.4.2 Détermination du coefficient de vitesse sur une verticale

Les courbes des vitesses sur une verticale sont tracées à partir du relevé des vitesses observées par rapport à la profondeur. La méthode des courbes de vitesses verticales demande une série d'observations des vitesses (par des moyens classiques) en des points convenablement répartis entre la surface de l'eau et le lit du cours d'eau. Normalement ces points sont choisis à des paliers de profondeur de 0,1 m entre les profondeurs de 0,1 et 0,9 m. Les observations doivent également être effectuées à au moins 0,15 m de la surface de l'eau et à au moins 0,15 m du lit du cours d'eau. Dans le cas particulier qui nous intéresse, une mesure de vitesse doit en outre être faite à la profondeur d'échantillonnage de 1 m environ en dessous de la surface de l'eau.

Une fois la courbe des vitesses tracée on peut obtenir la vitesse moyenne sur une verticale donnée en mesurant à l'aide d'un planimètre ou de tout autre moyen, de la surface se trouvant entre la courbe et l'axe des ordonnées puis en divisant cette surface par la longueur de l'axe des ordonnées (voir ISO 748).

Pour obtenir un coefficient de correction de la vitesse sur une verticale quelconque, i , on divise la vitesse moyenne sur cette verticale par la vitesse observée à la profondeur mesurée, ce qui donne

$$k_v = \frac{\bar{v}}{v} \quad \dots (12)$$

où

k_v est le coefficient de correction de la vitesse;

\bar{v} est la vitesse moyenne sur cette verticale;

v est la vitesse observée à la profondeur de mesure.

Pour arriver à un coefficient moyen représentatif, on doit avoir un minimum de plusieurs verticales placées dans des endroits «stratégiques» représentant la portion majeure de l'écoulement dans lequel les coefficients sont déterminés. Une fois un coefficient moyen déterminé, il ne doit plus être nécessaire de le redéterminer chaque fois qu'on fait une autre mesure de débit au même endroit. Il est toutefois nécessaire de vérifier la validité de ce coefficient à des niveaux largement différents, et, pour les estuaires, à différents moments du cycle de la marée.

10.5 Application du coefficient de vitesse sur une verticale

La correction de vitesse moyenne sur une verticale se fait immédiatement après la correction largeur/surface. Pour cette correction, on multiplie le débit total déterminé à partir des mesures de vitesse en dessous de la surface par un coefficient de correction représentatif de la vitesse dans la section transversale. Le produit est le débit mesuré (voir tableaux 1 et 2).

NOTE — L'examen d'un grand nombre de rivières importantes à travers le monde révèle des coefficients se situant dans une gamme étroite comprise entre 0,85 et 0,92 pour corriger la vitesse en dessous de la surface par rapport à la vitesse moyenne. Une étude assez complète portant sur 100 cours d'eau américains, d'une profondeur de 3 m et plus, a donné un coefficient moyen d'environ 0,90 pour corriger la vitesse obtenue à 1,2 m en dessous de la surface par rapport à la vitesse moyenne.

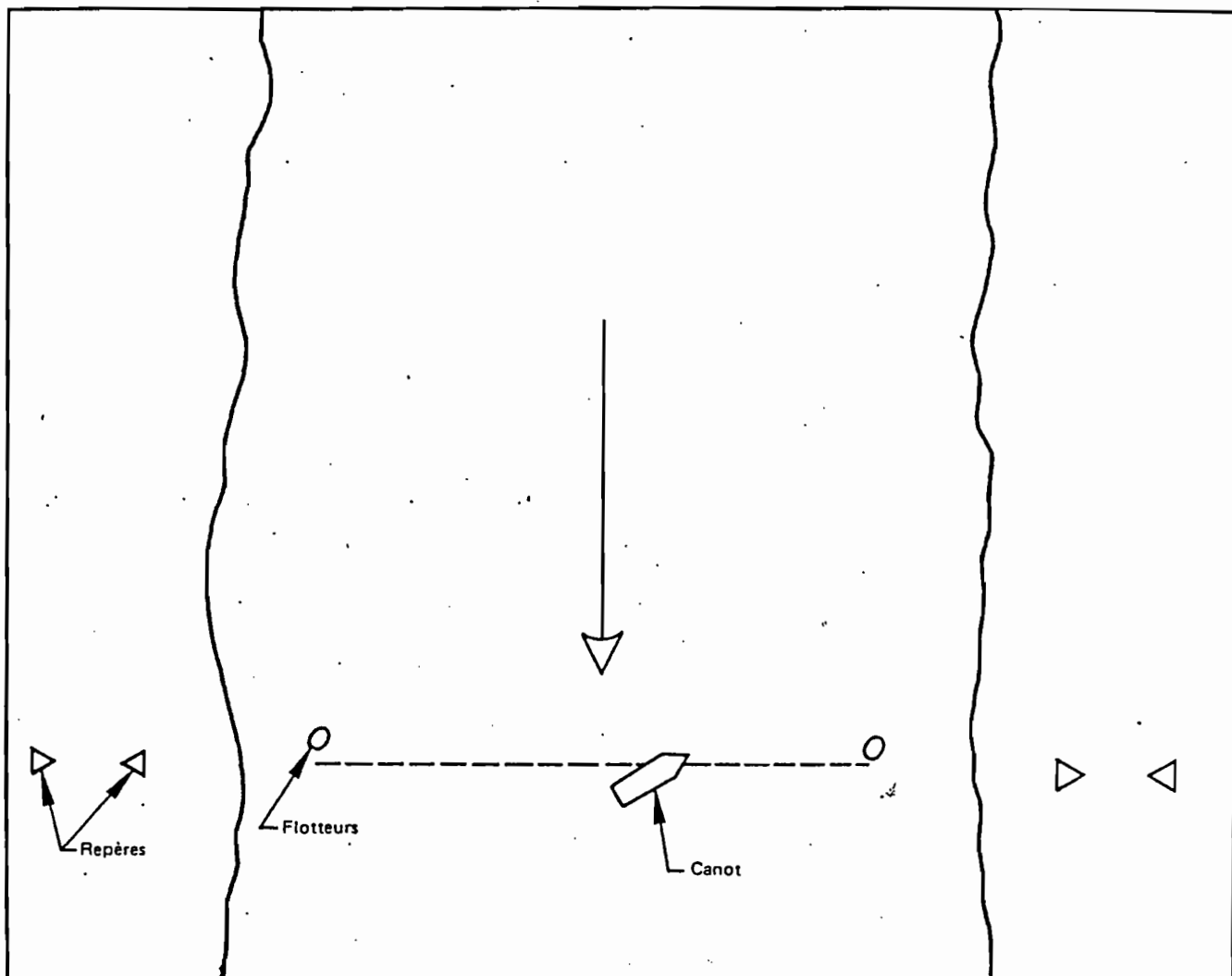


FIGURE 1 – Schéma du cours d'eau avec les repères

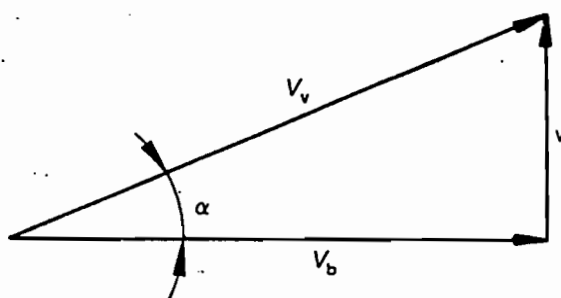


FIGURE 2 – Diagramme des vecteurs de vitesse

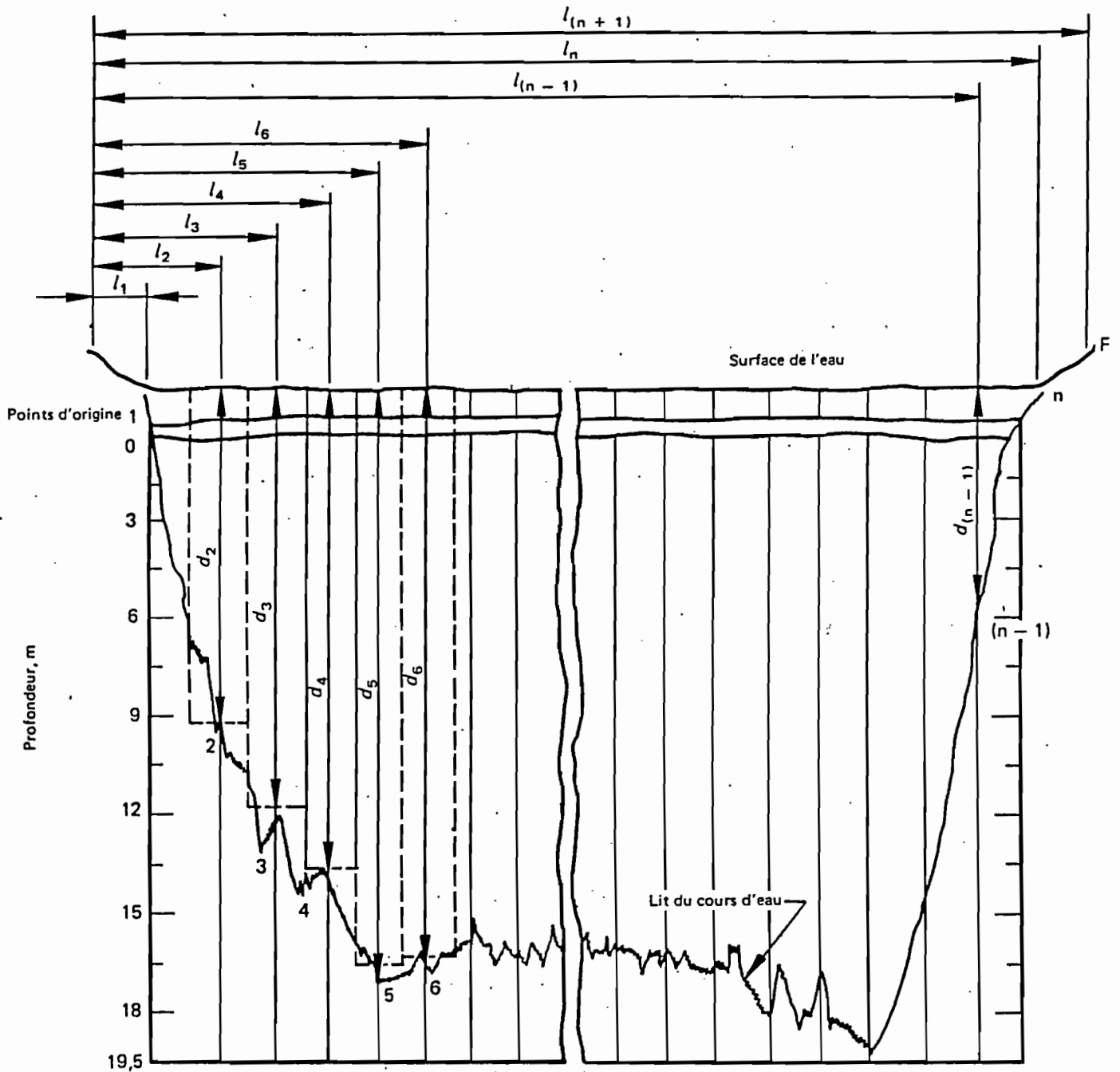


FIGURE 3 – Schéma illustrant la méthode de calcul à mi-section, superposée à un fac simulé de graphique de sondeur sonique

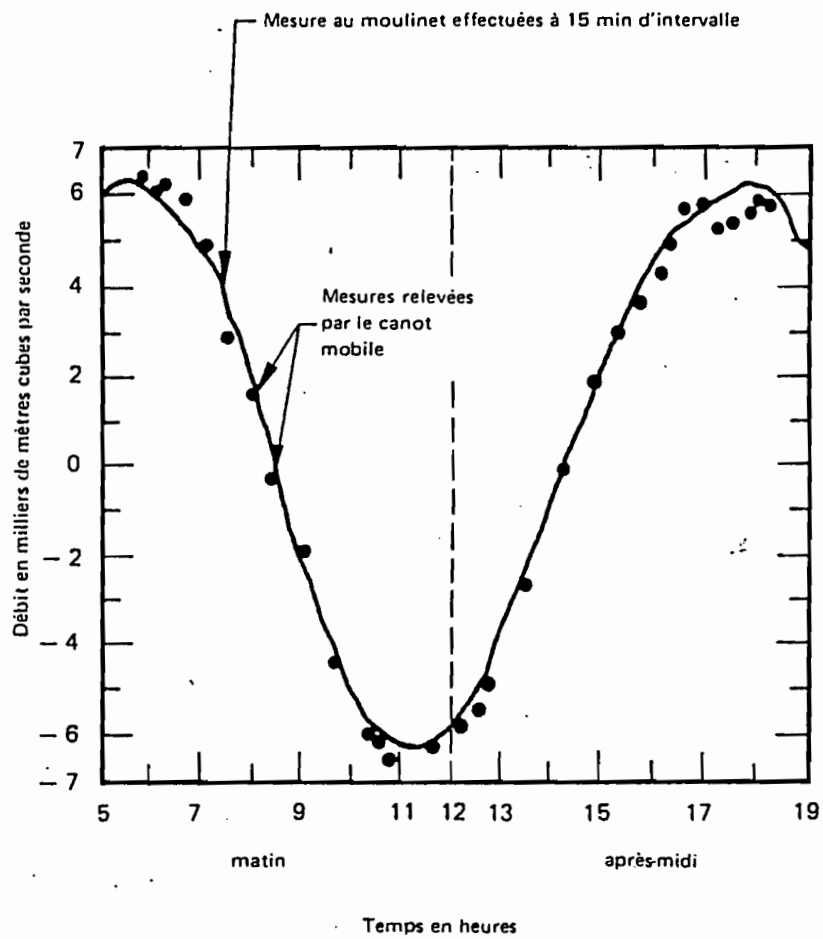


FIGURE 4 – Graphique de débit – Rivière Hudson à Poughkeepsie (N.Y.), 30 août 1966

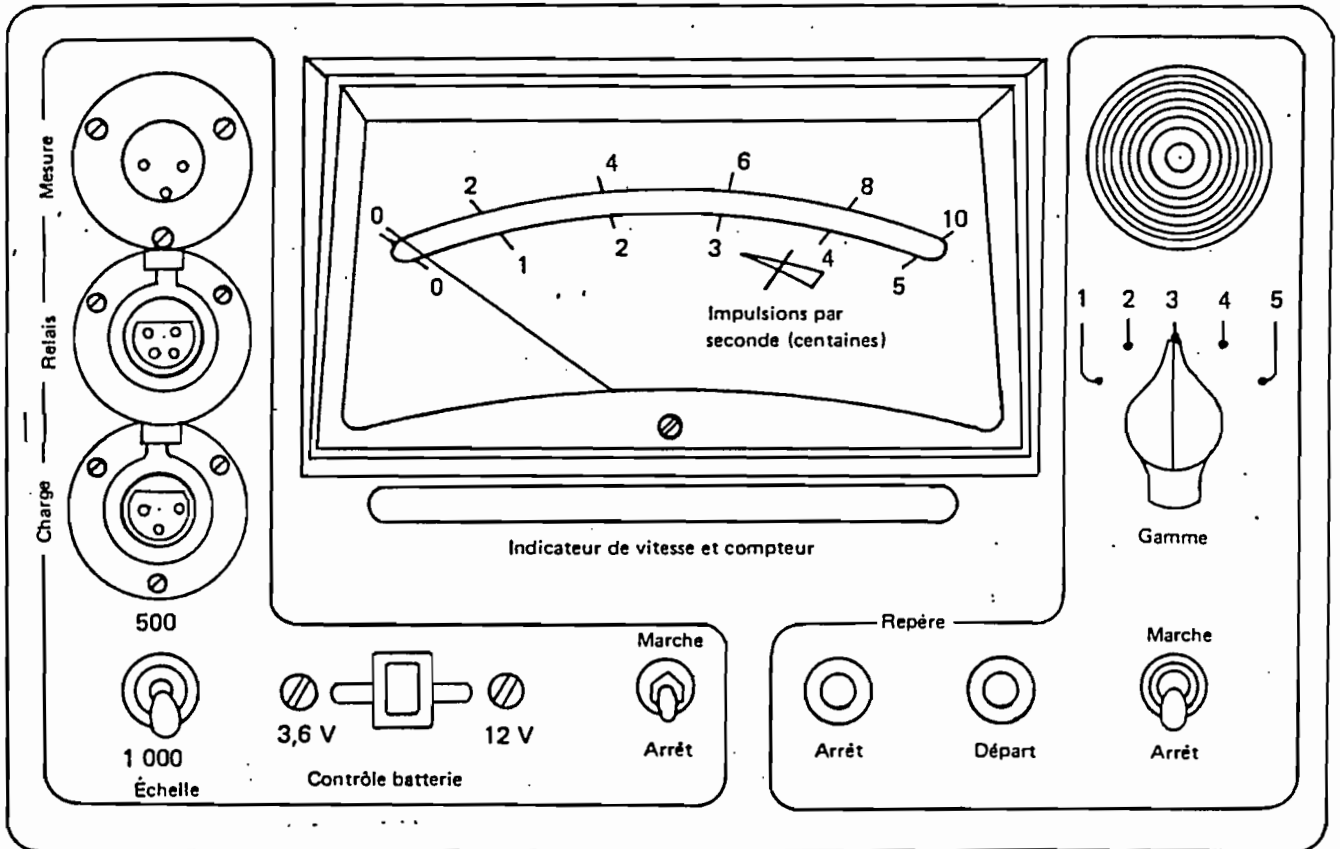


FIGURE 5 – Écran de contrôle d'un indicateur de vitesse et compteur – Méthode I

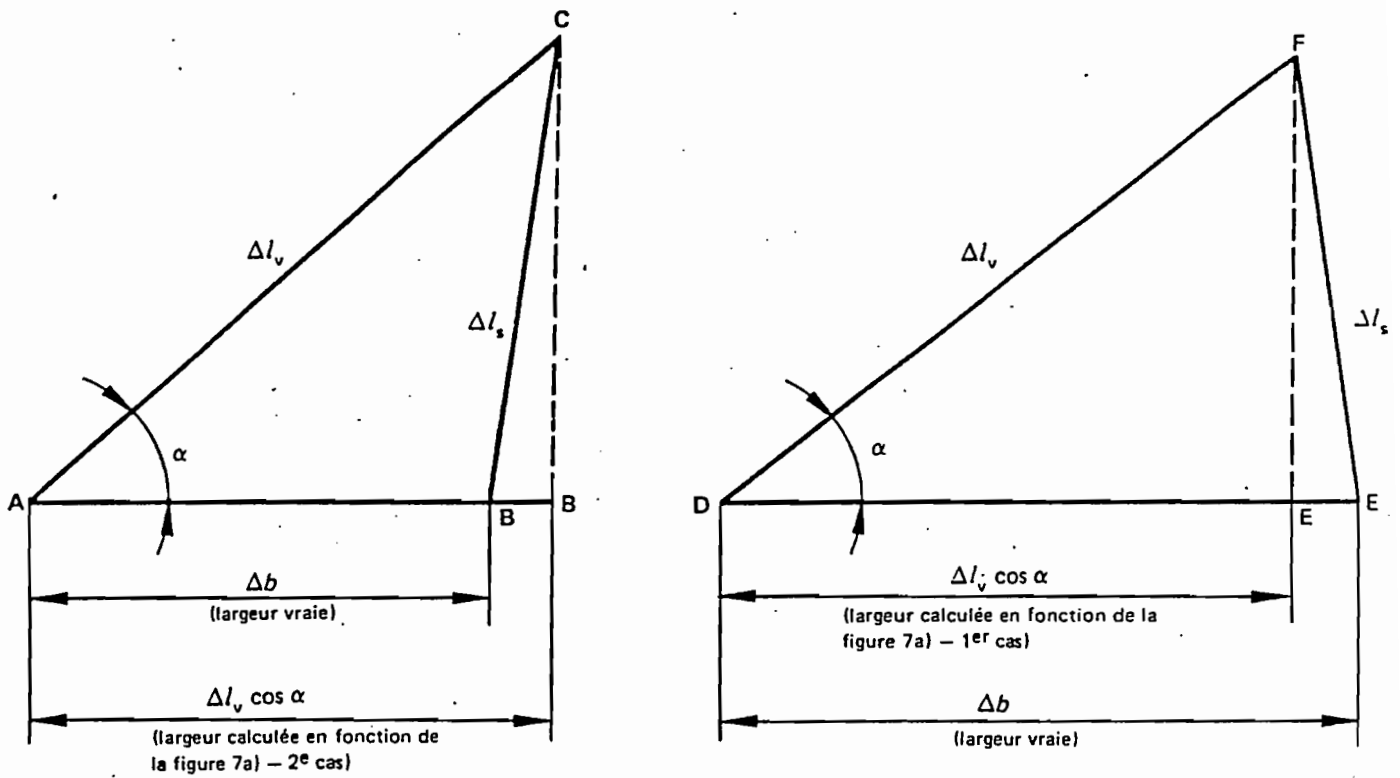


FIGURE 6 — Comparaison des valeurs réelles et calculées des échelons de largeur

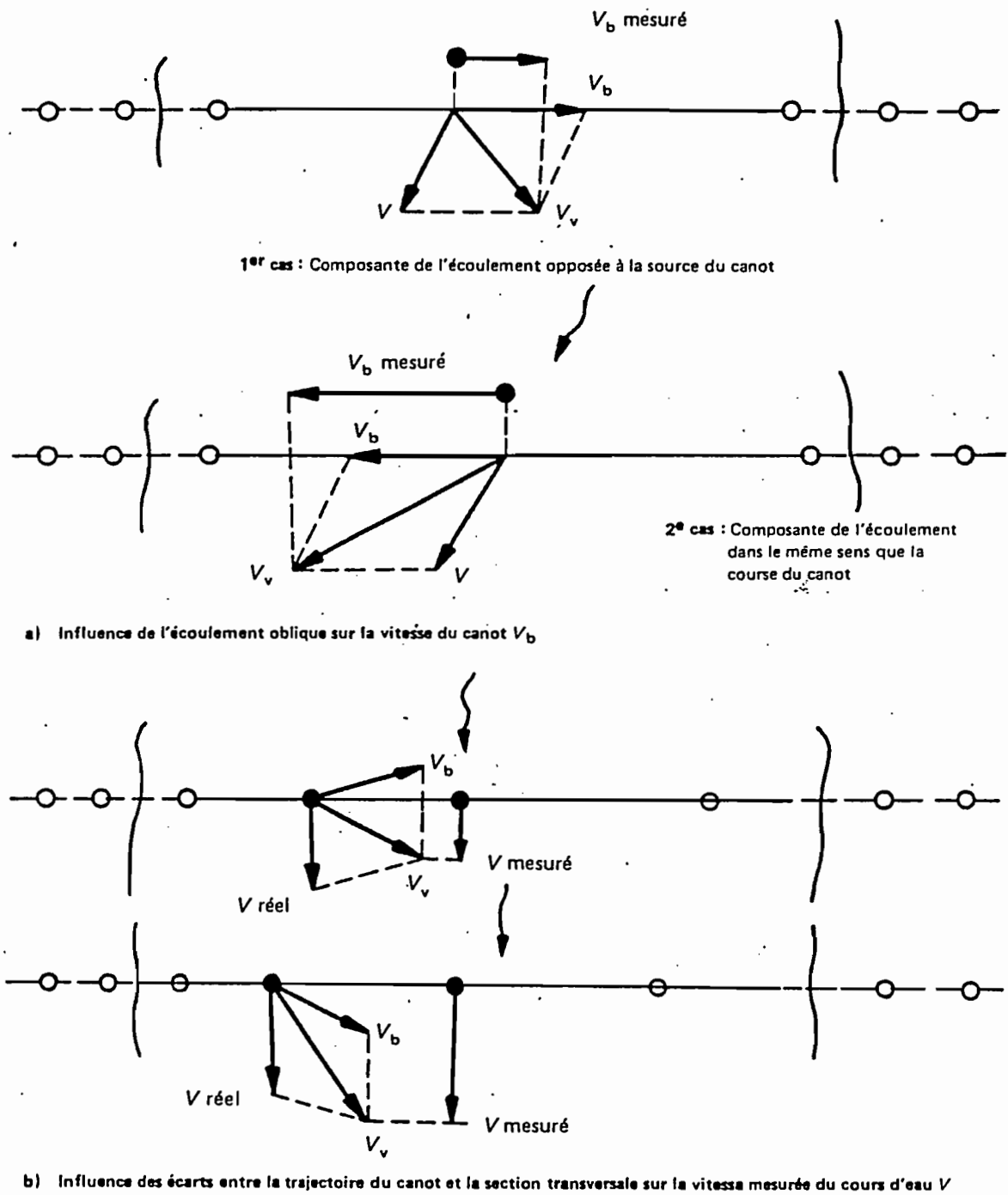


FIGURE 7 – Compensation des écarts de section ou de sens d'écoulement

ANNEXE A

DESCRIPTION DES INSTRUMENTS ET FONCTIONS DES MEMBRES DE L'ÉQUIPAGE

Pour réaliser des mesures précises, il est d'une grande importance de tenir compte de l'expérience déjà acquise; cela vaut notamment pour l'instrumentation et les fonctions de l'équipage. La mise en œuvre sur place de la méthode du canot mobile est une question à la fois d'expérience et de routine.

C'est pour cette raison que les instruments et les fonctions de l'équipage sont décrits en détail dans la présente annexe.

Les deux méthodes sont traitées séparément comme dans le corps de la présente Norme internationale. Toutefois, la méthode II n'étant en fait qu'une variante de la méthode I, les différences significatives de la 1^{ère} méthode sont traitées dans un chapitre séparé.

A.1 MATÉRIEL

A.1.1 Généralités

Méthode I

Les mesures avec un canot mobile se font grâce à une instrumentation spécialisée comprenant : un sondeur sonique, une palette à indicateur, un moulinet spécial équipé d'un matériel électronique adéquat et un petit canot de manœuvre facile quelque peu aménagé.

A.1.2 Palette et indicateur d'angle

Une palette équipée d'un mécanisme indicateur est montée à la proue du canot, la palette étant centrée à environ 1 m en dessous de la surface de l'eau (voir figure 8). Ce montage consiste en un arbre vertical, en acier inoxydable, avec une aiguille fixée à l'extrémité supérieure et une ailette mince et verticale en aluminium, de 0,3 m de hauteur et de 0,45 m de longueur, fixée à l'extrémité inférieure. L'arbre est logé dans un tube-support en aluminium, et est monté sur roulements à billes à l'extrémité supérieure et sur un palier en téflon (rendant la lubrification inutile) dans la partie inférieure, de telle manière que l'ensemble (palette, arbre et aiguille) forme une unité en rotation libre. La palette verticale s'aligne dans une direction parallèle au mouvement de l'eau. L'aiguille est fixée à l'arbre de telle manière qu'elle s'aligne sur la palette et se braque directement face à l'écoulement baignant la palette. L'angle entre la direction de la palette et la route vraie du canot (ligne de la section transversale) est indiqué par l'aiguille sur un cadran. Le cadran circulaire, gradué en degrés de chaque côté d'un index, pivote librement à l'extrémité supérieure de l'arbre vertical, juste en dessous de l'aiguille. Un système de visée fixé au cadran permet d'aligner l'index de ce cadran sur la route vraie du canot. En cas d'écoulement positif l'aiguille au-dessus du cadran se pointe toujours sur l'amont de la route vraie. L'amont pouvant se trouver à gauche ou à droite selon le sens de déplacement du canot, et compte tenu des vitesses négatives éventuelles, le cadran est gradué en degrés (de 0 à 90) des deux côtés de l'index.

A.1.3 Moulinet

Le moulinet utilisé est un élément du type à hélice avec une carrosserie spécialement conçue pour s'adapter au bord d'attaque de la palette (voir figure 8). Le moulinet à hélice est moins sensible que les autres types de débitmètres aux composantes verticales de la vitesse et a été choisi pour réduire au minimum les erreurs causées par le mouvement du canot.

Un engrenage à 24 dents situé au voisinage d'un champ magnétique produit 24 impulsions par tour d'hélice. Ce grand nombre d'impulsions par tour facilite la conversion du nombre d'impulsions en mesure analogique. Un ensemble capteur électronique enregistre ces impulsions et les transmet à un convertisseur de fréquence en tension, après quoi elles sont affichées comme mesures sur un appareil électrique.

A.1.4 Indicateur de vitesse et compteur

L'une des principales fonctions de l'indicateur de vitesse et du compteur est d'enregistrer les impulsions du moulinet, de les transmettre à un convertisseur de fréquence en tension et de les afficher comme mesures sur un appareil électrique (voir figure 5). Les impulsions sont reçues par le câble du moulinet branché dans le réceptacle marqué prévu sur le panneau avant de l'élément. Le moulinet produisant les impulsions est étalonné de manière à pouvoir convertir pour une vitesse donnée (en mètres par seconde) et par l'intermédiaire d'une table d'étalonnage, les mesures de l'appareil électrique exprimées en impulsions par seconde (voir tableaux 3, 4 et 5). La valeur lue sur l'appareil électrique à un moment particulier représente une mesure instantanée de la vitesse.

Outre sa fonction d'indicateur de taux d'impulsions permettant les déterminations de la vitesse, cet élément a également été conçu pour fournir une méthode de sélection automatique des points de mesure dans une section, à intervalles réguliers de la distance parcourue. Ce modèle se sert du fait que chaque tour d'hélice du moulinet engendre 24 impulsions également espacées, et que, d'après l'étalonnage, on peut déterminer qu'une impulsion est égale à une certaine fraction de mètre de distance parcourue dans l'eau, ou d'eau s'écoulant sur le moulinet. À l'aide d'une série de modules diviseurs de fréquence, on peut compter ces impulsions de manière électronique jusqu'à un nombre déterminé à l'avance, qui déclenche un signal audible et le repérage automatique du graphique du sondeur. Le compteur se remet automatiquement au zéro, et le processus se répète. Le signal audible a pour but de faire savoir à l'équipage que l'emplacement d'échantillonnage est atteint. En ce point ils relèvent la mesure d'angle donnée par l'aiguille et la mesure donnée par l'appareil électrique. Les repères sur le graphique du sondeur sont automatiquement déclenchés par une impulsion électrique transmise à la sonde de profondeur par un relais se trouvant dans l'appareillage électronique du moulinet. Le câble de relais entre le compteur et le sondeur doit être branché dans le réceptacle marqué adéquat sur le panneau avant des deux éléments. Les repères sur le graphique du sondeur dénotent les points d'observation dans la section transversale et indiquent ainsi où doivent être effectuées les mesures de profondeur.

Les intervalles fixés à l'avance, disponibles sur chaque élément sont les suivants :

Sélection de la zone	Nombre d'impulsions	Distance (approximative)
1	1,024	6
2	2,048	12
3	4,096	24
4	8,192	48
5	16,384	96

Les distances données ci-dessus sont des distances type. Les distances exactes dépendent de l'étalonnage du moulinet particulier utilisé. Si possible, le commutateur du sélecteur d'impulsions doit être réglé pour une distance divisant la largeur mesurée entre les deux flotteurs en un nombre d'échelons compris entre 30 et 40.

Des indicateurs de vitesse et des compteurs analogues ont été mis au point. Ils transforment le premier comptage d'impulsions effectué au démarrage en demi-comptage, ce qui contribue à minimiser les erreurs observées en début de mesure, à un moment où le canot peut être dans une phase d'accélération et où l'angle d'observation varie plus rapidement que d'habitude.

A.1.5 Sondeur sonique

Un sondeur sonique portable sert à l'enregistrement en continu sur bande graphique de la profondeur du cours d'eau, c'est-à-dire, d'un profil de section transversale entre deux flotteurs. Son capteur libère à intervalles fixes des impulsions d'énergie ultrasonique. L'instrument mesure le temps mis par ces impulsions énergétiques pour parcourir le lit du cours d'eau, être réfléchies et revenir au capteur. La vitesse de propagation du son dans l'eau étant connue, le sondeur calcule et enregistre la profondeur. Le sondeur utilisé dans la présente application est un modèle disponible dans le commerce.

Ce sondeur sonique a subi une légère transformation qui est l'installation d'un réceptacle sur son panneau avant, sur lequel est branché le câble de relais de l'indicateur de vitesse et du compteur. Le raccordement par relais a pour but de transmettre les impulsions électriques du compteur qui déclenche automatiquement le repérage des verticales sur le graphique du sondeur en chaque point d'observation.

A N N E X E

EXTRAITS DU DOCUMENT ISO EXPLICITANT
LA METHODE DU Jaugeage PAR CANOT MOBILE.
(Méthode I - mesure de l'angle)



PROJET DE NORME INTERNATIONALE ISO/DIS 4369

ISO/TC
113

Soumis le
1977-05-19

Secrétariat
ISI

Vote clos le
1977-11-19

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ - ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Méthode du canot mobile

CE DOCUMENT EST UN PROJET SUSCEPTIBLE DE MODIFICATION. IL NE PEUT SERVIR DE RÉFÉRENCE COMME NORME INTERNATIONALE AVANT SON ACCEPTATION PAR LE CONSEIL DE L'ISO.

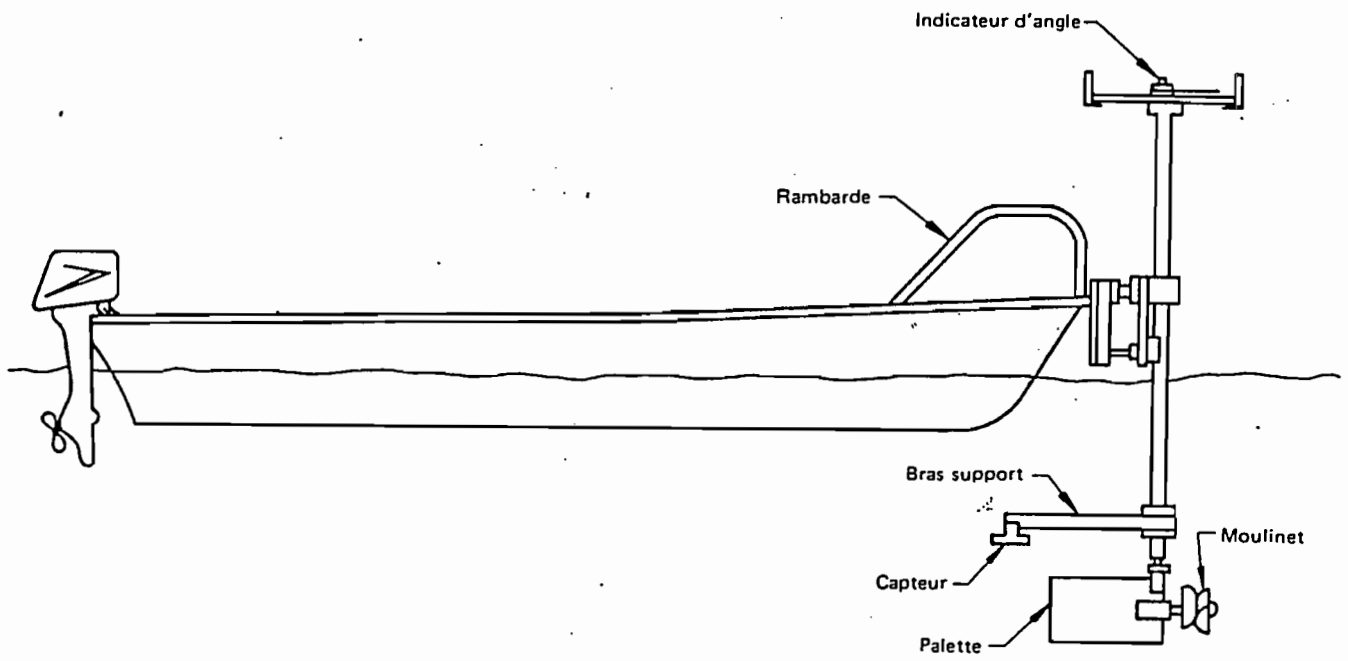


FIGURE 8 – Schéma du canot et du matériel – Méthode I

ANNEXE B

ANALYSE POINT PAR POINT À L'USAGE DU CALCULATEUR DE LA MÉTHODE DE CALCUL À PARTIR
DES EXEMPLES DE NOTES DE MESURES DONNÉES AUX TABLEAUX 1 ET 2
POUR LES MÉTHODES I ET II RESPECTIVEMENT

B.1 MÉTHODE I (voir tableau 1)

B.1.1 Les données de la première colonne sont les mesures d'angle enregistrées par le releveur pendant la mesure. Ces mesures débutant et se terminant aux emplacements des flotteurs (il n'y a pas de mesures au bord de l'eau), elles représentent les valeurs observées aux points 2, 3, 4, . . . , (m - 1).

B.1.2 Les valeurs de la deuxième colonne représentent les paliers parcourus par le canot sur la trajectoire entre deux points d'observation consécutifs. Si α_i représente la valeur de l'angle à l'emplacement i , Δl_{B_i} est la distance parcourue par le canot sur la route vraie, du point d'observation précédent, $i - 1$, vers l'emplacement i où a été relevée la mesure.

Les valeurs de cette colonne peuvent être prises directement dans le tableau 4 en utilisant les valeurs d'angle indiquées dans la colonne 1 et le numéro de zone déterminée par le sélecteur de zones du compteur. La première et la dernière valeurs de la colonne représentent deux exceptions; ce sont les distances de chaque flotteur au bord le plus proche.

B.1.3 Chacune des valeurs figurant dans la troisième colonne représente la distance séparant le point d'origine (repère) du point d'observation où les données ont été recueillies (voir 10.2).

B.1.4 Chacune des largeurs de sous-sections de la quatrième colonne représente la distance horizontale séparant, à mi-vecteur, un moulinet ($i - 1$) du moulinet suivant ($i + 1$). Par exemple, la largeur de la sous-section x est égale à :

$$\frac{l_{(i+1)} - l_{(i-1)}}{2}$$

(voir 10.2)

B.1.5 Chacune des valeurs de la cinquième colonne représente la profondeur du cours d'eau en un point d'échantillonnage de la section transversale.

B.1.6 Les données de la sixième colonne sont les mesures des impulsions par seconde enregistrées par le releveur en cours de mesure.

B.1.7 Les valeurs de la septième colonne représentent la vitesse instantanée de l'eau au niveau de la palette en chaque point d'observation. Elles sont relevées directement sur la table d'étalonnage du moulinet (tableau 3) en utilisant les valeurs des impulsions par seconde de la sixième colonne.

B.1.8 Les valeurs de la huitième colonne sont les valeurs de la fonction sinusoïdale des mesures d'angle de la colonne 1. Ces valeurs peuvent être trouvées sur le tableau 5.

B.1.9 Chacune des valeurs de la neuvième colonne représente la vitesse du cours d'eau perpendiculairement à la section transversale au point d'échantillonnage considéré. Pour obtenir ces valeurs, il est nécessaire de multiplier chaque valeur v_v de la septième colonne par la valeur correspondante du sinus α dans la huitième colonne.

B.1.10 Les valeurs de la dixième colonne représentent les surfaces transversales partielles utilisées pour la mesure. Elles s'obtiennent en multipliant les largeurs de la quatrième colonne par les profondeurs correspondantes de la cinquième colonne. Ces surfaces partielles sont ensuite additionnées pour obtenir la surface totale non corrigée nécessaire pour la mesure.

B.1.11 Chacune des grandeurs de la onzième colonne représente le débit non corrigé dans l'un des segments de la mesure de débit. Ces valeurs sont additionnées pour donner le débit total non corrigé.

B.1.12 Cette colonne sert à l'indication des observations descriptives éventuelles relatives à la mesure.

A.2 FONCTIONS DES MEMBRES DE L'ÉQUIPAGE

A.2.1 Généralités

Trois membres d'équipage sont nécessaires pour procéder à une mesure de débit à partir d'un canot mobile. Ce sont : un opérateur pour le canot, un observateur d'angle et un releveur. Avant de procéder aux mesures de débit à partir d'un canot mobile, il est important que les membres de l'équipage aient fait preuve d'un haut degré de compétence dans toutes les phases de la technique.

Cela s'acquiert par la réalisation de mesure de routine en un emplacement où le débit est connu et par comparaison ultérieure des résultats de de débit obtenus par les mesures avec canot mobile par rapport au débit étalonné. Si aucun emplacement ne peut servir à cet objectif de façon convenable, l'équipage doit alors faire une série de mesures à partir du canot mobile en un point unique et vérifier la reproductibilité des résultats.

A.2.2 Opérateur du canot

Avant le commencement des mesures l'opérateur doit se familiariser avec l'emplacement d'échantillonnage. Dans les cours d'eau à marée, l'opérateur doit connaître les conditions de toutes les phases du cycle de marée. Cela lui permettra d'éviter d'échouer le canot sur des fonds peu profonds et d'endommager le matériel se trouvant sous la surface de l'eau. Pendant la manœuvre du canot, il est nécessaire d'éviter les virements de bord soudains qui peuvent abîmer le câble du moulinet en l'enroulant autour de la palette.

L'opérateur doit choisir un chemin d'accès permettant la mise en position adéquate du canot avant le passage du premier flotteur. Ce chemin doit commencer en un point aval situé aussi près que possible de la rive que le permet la profondeur. À partir de ce point de départ, le canot doit être accéléré jusqu'au voisinage de sa vitesse normale de fonctionnement et la rotation dans la section de mesure effectuée avant le début de ces mesures. Le fait d'atteindre en même temps à la vitesse adéquate et à l'alignement convenable avant de passer le flotteur permet une stabilisation des instruments de lecture avant la prise du premier échantillon.

Durant la traversée, la seule fonction de l'opérateur du canot est de piloter celui-ci. Il maintient le cap en se déplaçant de côté « à la manière d'un crabe » dans la direction de l'écoulement de façon à rester dans un alignement suffisant pendant toute la mesure. Des vitesses différentes d'écoulement se rencontrant dans la section de mesure, il doit pour garder cet alignement, se fier davantage aux corrections de cap qu'à l'accélération ou au freinage du canot. L'alignement se détermine par des visées sur la rive opposée. La majeure partie de la précision de mesure dépend de l'habileté de l'opérateur à conserver la route vraie du canot.

A.2.3 Observateur d'angle

Un deuxième homme aligne le cadran de l'indicateur de la palette sur son appareil de visée et, sur le signal audible du compteur d'impulsions, relève l'angle formé par la palette par rapport à la route vraie. Il indique l'angle au releveur qui l'enregistre. Si le canot s'est écarté de la trajectoire vraie, l'observateur d'angle doit effectuer ses visées parallèlement aux repères de section transversale plutôt que sur les repères eux-mêmes.

A.2.4 Releveur

Le releveur a plusieurs fonctions à remplir. Avant la mesure, il est de sa responsabilité de vérifier que le matériel comprenant l'indicateur de vitesse, le compteur et le sondeur sonique a été préparé de façon satisfaisante. Cette vérification porte non seulement sur le montage du matériel, mais aussi sur le choix des réglages adéquats des instruments.

C'est au releveur de manœuvrer les commandes de déclenchement et d'arrêt du compteur prévues sur le matériel. Il est important pour la bonne précision de la mesure que cet appareil commence à fonctionner et s'arrête au premier et au second flotteur respectivement.

TABLEAU 1 – Échantillon de notes de calcul pour la mesure par canot mobile – Méthode I

National River Nr. River city Vr Run No. : 4-1 Range (L) 22,256 Temps : D 7,52h
 Largeur mesurée : 481,402 m Largeur calculée : 471,036 m F 7,58h
 Coefficient de correction largeur/surface : 1,022 Nombre de secondes : 30

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Angle α	L_b m	Distance au point d'origine m	Largeur m	Profondeur m	Impulsions par seconde	V_v	Sin α	$V_v \sin \alpha$	Surface m ²	Débit m ³ /s	Remarques
IP		0									IP à LEW
LEW		8,54	5,95						0		8,54 m
20	11,89	20,43	10,99	2,74	250	1,372	0,342	0,470	30,1	14,1	
25	10,09	30,52	14,68	9,45	340	1,857	0,423	0,786	174,6	137,3	
30	19,27	49,79	19,36	11,59	370	2,018	0,500	1,009	223,9	226,0	
29	19,45	69,24	18,37	11,43	340	1,857	0,485	0,899	210,0	188,9	
39	17,29	86,53	17,16	11,28	340	1,857	0,629	1,168	193,2	225,7	
40	17,04	103,57	17,64	10,67	330	1,802	0,643	1,158	187,7	217,5	
35	18,23	121,80	17,64	10,82	330	1,802	0,574	1,034	190,4	196,8	
40	17,04	138,84	15,96	10,06	330	1,802	0,643	1,158	160,7	186,0	
48	14,88	153,72	14,88	9,91	350	1,912	0,743	1,42	147,7	209,8	
48	14,88	168,60	15,44	9,76	340	1,854	0,743	1,378	150,5	207,3	
44	16,01	184,61	15,32	9,60	340	1,857	0,695	1,290	146,8	189,2	
49	14,60	199,21	14,74	9,45	320	1,750	0,755	1,320	139,4	184,0	
48	14,88	214,09	15,96	9,14	330	1,802	0,743	1,338	145,8	195,1	
40	17,04	231,13	16,38	8,69	320	1,750	0,643	1,125	142,1	160,0	
45	15,73	246,86	16,00	8,08	300	1,640	0,707	1,158	129,1	149,5	
43	16,28	263,14	16,54	8,23	330	1,802	0,682	1,229	135,6	166,5	
41	16,80	279,94	15,40	8,23	350	1,912	0,656	1,253	126,4	158,3	
51	13,99	293,93	15,64	7,93	330	1,802	0,777	1,399	123,6	172,7	
39	17,29	311,22	16,78	7,62	320	1,750	0,629	1,101	128,2	141,0	
43	16,28	327,50	16,66	7,62	320	1,750	0,682	1,192	126,4	150,6	
40	17,04	344,54	17,52	7,62	330	1,802	0,643	1,158	133,8	154,9	
36	17,99	362,53	15,68	7,47	330	1,802	0,588	1,061	117,0	124,0	
53	13,38	375,91	14,70	7,16	320	1,750	0,799	1,399	105,0	147,0	
44	16,01	391,92	16,40	6,86	320	1,750	0,695	1,216	112,4	136,8	
41	16,80	408,72	17,94	6,86	330	1,802	0,656	1,030	125,5	145,0	
31	19,08	427,80	18,54	6,71	330	1,802	0,515	0,927	124,5	115,2	
36	17,99	445,79	16,89	6,86	320	1,750	0,588	1,030	116,1	119,5	
19	15,79	461,58	16,89	3,66	340	1,857	0,326	0,607	61,8	37,4	
REW	17,99	479,57	8,99	0							
FP		486,58									

471,036 m

470,945 m

Coefficient de correction largeur/surface : $\frac{481,402}{471,036} = 1,022$ 12 815,24 47 978,35 REW à FP
 x 1,022 x 1,022 (coefficient de correction largeur/surface) = 7,012 m

IP = Point d'origine = 13 109,75 = 49 033,84

FP = Point final

LEW = Bord gauche de la ligne d'eau

REW = Bord droit de la ligne d'eau

x 0,91 (coefficient de correction de la vitesse)

= 44 512,19