
Norme internationale



4369

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

Measurement of liquid flow in open channels — Moving-boat method

Première édition — 1979-10-15

ITeH STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 4369:1979](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6b6a243c-6d93-4721-bbd3-c8fbb6ea7b12/iso-4369-1979)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6b6a243c-6d93-4721-bbd3-c8fbb6ea7b12/iso-4369-1979>

CDU 532.573

Réf. n° : ISO 4369-1979 (F)

Descripteurs : écoulement en canal découvert, écoulement de liquide, mesurage de débit, embarcation, spécification de matériel, mesurage de vitesse, calcul d'erreur.

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique correspondant. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO, participent également aux travaux.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO.

La Norme internationale ISO 4369 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 113, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts*, et a été soumise aux comités membres en mai 1977.

Les comités membres des pays suivants l'ont approuvée : [ISO 4369:1979](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6b6a243c-6d93-4721-bbd3-c8fbb6e7b12/iso-4369-1979)
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6b6a243c-6d93-4721-bbd3-c8fbb6e7b12/iso-4369-1979>

Allemagne, R.F.	France	Suisse
Australie	Inde	Tchécoslovaquie
Canada	Italie	Turquie
Égypte, Rép. arabe d'	Pays-Bas	URSS
Espagne	Roumanie	USA
Finlande	Royaume-Uni	Yougoslavie

Aucun comité membre ne l'a désapprouvée.

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 estuaires et rivières 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 4366, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Sondeurs à écho.*

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

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 grandes rivières 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 :

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

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 éléments de section 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 élément de section 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.

1) Actuellement au stade de projet.

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 qui est généralement 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 trajectoire prédéterminée, soit en mesurant la distance par rapport à un point fixe de la rive.

La mesure de vitesse relevée en chacun des points d'observation dans la section transversale (v_v dans la figure 2) est la vitesse de l'eau au niveau du moulinet résultant aussi bien de l'écoulement du cours d'eau que du mouvement du canot. C'est la somme vectorielle de la vitesse de l'eau par rapport au lit du cours d'eau (v) et de la vitesse du canot par rapport au lit du cours d'eau (v_b).

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 1 et méthode 2.

La méthode 1 consiste à mesurer l'angle α entre la trajectoire déterminée 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 2 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 de l'élément de section 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 , perpendiculairement à la trajectoire déterminée du canot.

La mesure relevée par l'indicateur de vitesse en nombre d'impulsions par seconde sert, en combinaison avec un tableau d'étalonnage, 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, si cela est praticable, enregistrer automatiquement et simultanément tous les paramètres requis.

6.1 Détermination de la vitesse du cours d'eau

La méthode 1 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 2 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 d'un élément de section.

6.2 Détermination de la distance entre les points d'observation

Du diagramme vectoriel (voir figure 2), on pourra constater que l'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 10.3.

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 1, l'équation (4) convient donc

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

où

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

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 $i^{\text{ème}}$ 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 :

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

Si l'on utilise la méthode 2, la largeur de l'intervalle compris entre les points d'observation est calculée comme la différence entre des mesures de distance successives à partir d'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, à moins que le capteur soit réglé pour indiquer la profondeur totale.

7 Limites

La méthode est normalement utilisée dans le cas des rivières de plus de 300 m de largeur et de plus de 2 m de profondeur.

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

Le nombre d'éléments de section doit être d'au moins 25.

La largeur de chaque élément de section dépend de la précision avec laquelle la vitesse peut être mesurée dans chaque élément de section. 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 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 l'on ne peut pas rapporter de façon satisfaisante la vitesse moyenne à la vitesse mesurée.

Le débit ne doit pas varier au point de 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 6).

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 1

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, de préférence, un élément du type à hélice avec une carrosserie spécialement conçue dans le cas de la méthode 1 pour s'adapter au bord d'attaque de la palette. Dans le cas de la méthode 2, 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 1, le compteur doit permettre un préréglage 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 2

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 un 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. Le sondeur à écho doit être conforme à l'ISO 4366.

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 l'on inscrit le résultat dans la partie principale du procès-verbal de mesure servant au calcul du débit. Si l'on utilise la méthode 1, 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 2, 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 1, un opérateur pour le canot, un observateur d'angle et un releveur; pour la méthode 2, 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 1) 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 2) 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 d'habitude 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 $i^{\text{ème}}$ élément de section;

d_i est la profondeur du $i^{\text{ème}}$ élément de section;

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

m est le nombre d'éléments de section.

Le débit dans le cours d'eau est donc 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 utilise le mode de calcul à mi-section du débit. Cette méthode suppose que la vitesse moyenne au milieu de chaque élément de section représente la vitesse moyenne dans l'élément de section. 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 à écho. La section transversale est définie par les profondeurs aux emplacements 1, 2, 3, . . . , n , marqués pendant la mesure sur le graphique du sondeur à écho.

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 1, soit par l'équation (2) dans le cas de la méthode 2. Pour de plus amples détails, voir les tableaux 1 et 2 où figure un calcul complet pour les méthodes 1 et 2 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

$l_3 = l_2 + \Delta l_{b_3}$

$l_4 = l_3 + \Delta l_{b_4}$

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

$l_n = l_{(n-1)} +$ 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 1.

Dans la méthode 2, les distances l_i au repère sont mesurées directement. Chacune des largeurs d'élément de section 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 de l'élément de section 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 à écho aux emplacements d'échantillonnage.

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

Les surfaces partielles des éléments de section sont obtenues en multipliant la largeur telle qu'elle est obtenue à partir de l'équation (10) par la profondeur au 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 (9), on obtient le débit (non corrigé) au niveau d'un élément de section 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 1.

10.3 Correction de largeur dans le cas d'un écoulement oblique — Méthode 1

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 1, la largeur des éléments de section 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 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 (voir figure 6).

Si l'on utilise la méthode 2, 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 1

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, qui se mesure directement, est utilisable pour 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 :

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

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 un 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 7); 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 entre les profondeurs de 0,1 et 0,9. 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.

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, 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 à la profondeur d'échantillonnage du canot mobile, 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 à la profondeur d'échantillonnage du canot mobile.

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. Le coefficient moyen est la valeur de la moyenne pondérée avec des poids en proportion avec le débit dans les éléments de section. 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 correction de la vitesse

La correction de la vitesse 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 la valeur mesurée du débit (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.

11 Précision de la mesure de débit

Les grandes lignes de la méthode d'évaluation de l'erreur limite sur une mesure de débit sont données ci-après.

11.1 Source d'erreur

Étant donnée la nature même des mesures physiques, il est impossible de mesurer une grandeur physique avec une certitude absolue.

Outre les erreurs dues aux opérateurs et au mauvais fonctionnement des instruments (erreurs aberrantes), il existe trois

types d'erreurs à considérer, à savoir : les erreurs aléatoires, les erreurs systématiques constantes et les erreurs systématiques variables. Voir les notes de bas de page pour les définitions.¹⁾

Les sources d'erreur peuvent être définies d'après une forme généralisée de l'équation de travail (8) :

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i d_i v_i$$

L'erreur limite globale sur le débit se compose des erreurs suivantes :

- erreurs limites sur la largeur;
- erreurs limites sur la profondeur, tant pour les sondages individuels que pour les mesures de niveau d'eau (voir ISO 748, paragraphe 6.2.3);
- erreurs limites sur la détermination de la vitesse sous la surface. Celles-ci dépendent de la précision de l'appareillage et des irrégularités de la répartition des vitesses dans le temps et dans l'espace;
- erreurs limites sur l'utilisation de la méthode du canot mobile, notamment quant au nombre d'éléments de section, à la détermination de la vitesse perpendiculairement à la section transversale et au coefficient de correction de la vitesse.

11.2 Détermination des diverses composantes de l'erreur

11.2.1 Erreur limite sur la largeur, X_{b_1}

Si l'on utilise la méthode 1, suivant l'équation (5), on a :

$$\Delta l_b = \cos \alpha \int v_v dt$$

L'erreur limite sur la mesure de largeur dépend des erreurs aléatoires et systématiques sur la mesure du temps, de la vitesse et de l'angle qui sont les variables de base d'où se dérive la largeur. La vitesse est également une variable dépendante, fonction de la mesure des impulsions et du temps. Si l'on considère la mesure du temps associée à la mesure de la vitesse, l'erreur instrumentale est dans la plupart des cas bien inférieure à toutes les autres et l'on peut supprimer cette erreur sur une variable indépendante.

Le pourcentage d'erreur limite sur la mesure de largeur, X_{b_1} , est donné par :

$$X_{b_1} = \left[X_{v_v}^2 + (-\alpha \tan \alpha)^2 X_{\alpha}^2 + X_t^2 \right]^{1/2}$$

où α est en radians.

Dans l'équation ci-dessus les coefficients de sensibilité des composantes v_v et t sont égaux à 1. Le coefficient de sensibilité de l'angle est $\alpha \tan \alpha$, ce qui est à peu près égal à 1 lorsque $\alpha \approx 50^\circ$ (0,87 rad).

1) Pour les définitions et les formules, voir ISO 5168.

Si l'on utilise la méthode 2, l'erreur limite sur la mesure de largeur est principalement une erreur instrumentale, fonction de l'instrument employé et de la gamme de largeur. Pour les instruments optiques, voir ISO 748, annexe E. Pour les instruments électroniques, l'erreur limite se compose principalement d'une partie constante et d'une partie variable dépendant de la largeur mesurée telle qu'elle est spécifiée par le fabricant.

La plupart des erreurs possibles sont de nature aléatoire et, si l'on procède avec précaution, elles n'introduisent aucun biais dans les résultats de mesure. Quelques-unes sont de nature systématique et l'on doit veiller à les réduire au minimum.

Les sources d'erreur et les précautions recommandées sont les suivantes :

- a) Un mauvais étalonnage du moulinet donne une erreur systématique variable sur les mesures de largeur.
- b) L'erreur possible de lecture sur l'angle est de $\pm 1^\circ$. L'observateur doit s'exercer pour conserver cette précision et éviter de fausser les résultats par sa faute.
- c) L'obliquité de l'écoulement par rapport à la section de mesure est cause d'erreur dans les mesures de largeur. Il est recommandé de choisir l'emplacement de mesure avec soin pour éviter ce phénomène. Pour compenser les effets d'un écoulement oblique et l'écartement important du canot par rapport à la trajectoire choisie, il est recommandé d'effectuer un nombre égal de mesures dans chaque sens le long de la section transversale. Ce procédé est particulièrement souhaitable dans les sections non symétriques et lorsque le profil du lit est irrégulier.
- d) Une correction de largeur totale doit être effectuée (voir 10.3.2) pour minimiser les erreurs systématiques.

11.2.2 Erreurs limites sur la profondeur, X_{d_i}

Le fonctionnement d'un sondeur à écho est fondé sur le principe d'une mesure de temps entre la transmission et la réception des ondes sonores (en fonction de la vitesse du son dans l'eau). Les écarts de température et de masse volumique provoquent un dérèglement de l'étalonnage du sondeur à écho qui donne une erreur systématique sur les mesures de profondeur. Il est recommandé de procéder à l'étalonnage in situ en suspendant une plaque de métal à une distance connue en dessous du capteur.

On veillera avec un soin extrême à la lecture du graphique du sondeur de manière à ne pas introduire d'erreur systématique de lecture. À noter que la lecture du graphique peut également introduire une erreur aléatoire par suite d'un effet de parallaxe.

Les soubresauts du canot (et donc du capteur du sondeur) dus aux clapotis introduisent une erreur aléatoire dans la mesure de profondeur. Cette erreur peut être réduite par le choix d'un canot plus stable dans des conditions agitées.

Une autre erreur limite aléatoire est introduite par l'irrégularité du profil du lit, les rugosités réfléchissant le son.

11.2.3 Erreurs limites sur la détermination de la vitesse en dessous de la surface, X_{v_v}

La vitesse en tout point de la section transversale fluctue en continu et de façon aléatoire dans le temps. Il faut donc faire plusieurs mesures pour minimiser l'influence d'un temps de mesure limité. La grandeur de l'erreur d'impulsion dépend également de la position relative sur la «verticale». L'erreur relative et l'erreur absolue sur les impulsions sont moindres dans la partie haute de la verticale de répartition des vitesses. Pour moins ressentir les erreurs d'impulsion les plus faibles, il faut que le moulinet relève les vitesses sous la surface comme indiqué précédemment.

11.2.4 Erreurs limites aléatoires et systématiques dues au moulinet, X_c

Lorsque des moulinets sont étalonnés plusieurs fois dans les mêmes conditions, ils montrent de petites variations aléatoires aux mêmes points de la courbe d'étalonnage. Le même effet s'observe, mais inversé, lorsqu'un moulinet mesure une vitesse. Il existe donc une erreur instrumentale aléatoire sur la détermination de la vitesse d'écoulement. L'erreur aléatoire initiale sur la détermination de la courbe d'étalonnage devient cependant une erreur systématique variable chaque fois que l'on prend le même point pour déterminer la vitesse de l'écoulement et le débit. Cette erreur systématique variable est rendue aléatoire si l'on se sert de la courbe d'étalonnage qui donne un plus grand nombre de points d'étalonnage du moulinet et une dispersion de la courbe sur différentes vitesses.

Un mauvais étalonnage du moulinet donne une erreur systématique constante sur les mesures de vitesse.

Le moulinet doit être réétalonné chaque fois qu'un doute se fait jour.

Tout écart de la position du moulinet par rapport à un plan horizontal parallèle à la surface de l'eau donne une mesure trop basse de la vitesse. Si l'on utilise la méthode 1, on veillera à monter la palette de manière à ce qu'elle soit perpendiculaire à l'eau pendant la mesure.

Si la vitesse est mesurée à l'aide d'un indicateur de vitesse, on veillera à éviter les erreurs de parallaxe ou toute autre erreur due à l'observateur.

11.2.5 Erreurs limites sur la vitesse d'écoulement, X_f (Méthode 1)

D'après l'équation (1),

$$v = v_v \sin \alpha$$

on peut voir que les erreurs limites sur la vitesse d'écoulement, c'est-à-dire la vitesse perpendiculaire à la section transversale, dépendent des variables que sont la vitesse totale v_v et l'angle α . Comme indiqué en 11.2.6, on néglige l'erreur limite sur la mesure du temps et des impulsions, grandeurs de base servant à déterminer la vitesse v_v .

Suivant l'équation (13), le pourcentage d'erreur limite sur la vitesse d'écoulement, X_f , peut se calculer d'après la formule

$$X_f = [X_{v_v}^2 + (\alpha \cot \alpha)^2 X_\alpha^2]^{1/2} \quad \dots (14)$$

Si l'on utilise la méthode 1, on peut compter sur les erreurs limites suivantes :

a) La valeur de l'angle doit être lue à $\pm 1^\circ$ près. (L'opérateur doit s'exercer à obtenir cette précision pour ne pas fausser les mesures par sa faute.)

b) La vitesse doit être indiquée à ± 5 impulsions par seconde près.

11.2.6 Erreurs limites sur la vitesse d'écoulement, X_f (Méthode 2)

D'après l'équation (2)

$$v = \sqrt{v_v^2 - v_b^2}$$

on peut voir que les erreurs limites sur la vitesse d'écoulement déterminée selon la méthode 2 proviennent initialement d'erreurs limites sur la vitesse totale v_v et sur la vitesse mesurée du canot v_b . Les coefficients sans dimensions de sensibilité de v_v et v_b sont :

$$\frac{v_v^2}{v_v^2 - v_b^2}$$

et

$$\frac{-v_b^2}{v_v^2 - v_b^2}$$

respectivement (voir ISO 5168).

On peut donc calculer le pourcentage d'erreur limite sur la vitesse d'écoulement par l'équation suivante :

$$X_f = \left[\left(\frac{v_v^2}{v_v^2 - v_b^2} \right)^2 X_{v_v}^2 + \left(\frac{-v_b^2}{v_v^2 - v_b^2} \right)^2 X_{v_b}^2 \right]^{1/2} \quad \dots (15)$$

Les grandeurs de base servant à déterminer v_v sont les impulsions du moulinet et le temps mesuré. Selon l'appareillage utilisé, les erreurs sur ces variables de base peuvent être insignifiantes.

La vitesse du canot v_b est déterminée à partir d'une mesure de distance et d'une mesure du temps mis pour parcourir la distance entre les points d'observation donnés par :

$$b_i = l_i - l_{(i-1)}$$

Puisque $v_b = \frac{b}{t}$, l'erreur limite sur v_b se compose des erreurs limites sur les variables b et t .

Le pourcentage d'erreur limite sur la valeur mesurée v_b est donc :

$$X_{v_b} = (X_b^2 + X_t^2)^{1/2} \quad \dots (16)$$

et le pourcentage d'erreur limite sur la vitesse d'écoulement devient

$$X_f = \left[\left(\frac{v_v^2}{v_v^2 - v_b^2} \right)^2 X_{v_v}^2 + \left(\frac{-v_b^2}{v_v^2 - v_b^2} \right)^2 (X_{v_b}^2 + X_t^2) \right]^{1/2} \quad \dots (17)$$

11.2.7 Erreur limite aléatoire totale sur la vitesse d'écoulement, $X_{\bar{v}_i}$

Méthode 1

Suivant l'équation (14) et en fonction de la discussion précédente sur les erreurs limites sur la mesure de la vitesse, le pourcentage d'erreur limite aléatoire totale sur la vitesse d'écoulement peut se calculer comme suit :

$$X_{\bar{v}_i} = [X_{v_v}^2 + (\alpha \cot \alpha)^2 X_\alpha^2 + X_c^2]^{1/2} \quad \dots (18)$$

où

α est en radians, et

X_c est l'erreur limite aléatoire sur l'étalonnage du moulinet.

Méthode 2

La méthode ci-dessus reste applicable pour l'erreur limite aléatoire totale sur la vitesse d'écoulement mesurée par la méthode 2. L'erreur totale sur la vitesse de l'écoulement se compose de ce qui suit :

$$X_{\bar{v}_i} = \left[\left(\frac{v_v^2}{v_v^2 - v_b^2} \right)^2 (X_{v_v}^2 + X_c^2) + \left(\frac{-v_b^2}{v_v^2 - v_b^2} \right)^2 (X_b^2 + X_t^2) \right]^{1/2} \quad \dots (19)$$

11.2.8 Erreurs limites dues à l'utilisation de la méthode du canot mobile

Ces erreurs limites concernent en particulier le nombre d'éléments de section et les rapports entre la vitesse moyenne sur une verticale et la vitesse sous la surface.

Bien qu'on procède en continu au sondage de la profondeur, on n'utilise qu'un nombre limité de valeurs de profondeur pour déterminer la surface de l'élément de section.

Avec la méthode de la mi-section, on interpole linéairement les profondeurs entre les verticales. D'où une erreur limite aléatoire X_{d_m} qui diminue lorsque le nombre d'éléments de section augmente.

Le profil horizontal des vitesses dans la section est un profil de vitesses continu intégré dans le temps et les erreurs limites aléatoires ne sont donc dues qu'aux fluctuations de la vitesse mentionnées en 11.2.3.

Comme indiqué en 10.4.2, il faut un coefficient des vitesses sur une verticale pour corriger le débit total mesuré. Les écarts par rapport à ce coefficient déterminé pour un certain niveau conduisent à une erreur systématique variable qui peut être rendue aléatoire pour un certain nombre de mesures de débit au même niveau.

11.3 Erreur limite globale sur la mesure de débit

L'erreur limite totale sur la mesure de débit est la résultante d'un certain nombre d'erreurs limites partielles qui peuvent elles-mêmes être des erreurs limites composites (par exemple l'erreur limite sur la détermination de la largeur ou de la vitesse d'écoulement) et qui tendent donc à avoir une distribution gaussienne.

11.3.1 Erreur limite aléatoire globale, X'_{Q}

Soit X'_{b_i} , X'_{d_i} et X'_{v_i} , les pourcentages d'erreur limite aléatoire sur b_i , d_i et v_i pour chacun des m éléments de section, et X'_{Q} le pourcentage d'erreur limite aléatoire sur le débit Q , on a :

$$X'_{Q} = \pm \sqrt{X'^2_{d_m} + \frac{\sum (b_i d_i v_i)^2 (X'^2_{b_i} + X'^2_{d_i} + X'^2_{v_i})}{\sum (b_i d_i v_i)^2}} \quad \dots (20)$$

où X'_{d_m} est défini en 11.2.8.

L'équation (20) peut être simplifiée si l'on suppose que les valeurs de X'_{b_i} , X'_{d_i} et X'_{v_i} sont relevées sur toutes les verticales et que le débit est presque égal dans tous les éléments de section. Dans ces conditions, l'équation (20) devient :

$$X'_{Q} = \pm \sqrt{X'^2_{d_m} + \frac{1}{m} (X'^2_{b_i} + X'^2_{d_i} + X'^2_{v_i})} \quad \dots (21)$$

Ces calculs d'erreurs se rapportent à des erreurs limites estimées relatives à une mesure dans la section transversale. Si l'on admet que les résultats de mesures séparées sont indépendants les uns des autres, l'erreur limite décroît suivant l'équation :

$$X'_{Q_r} = \pm \frac{X'_{Q}}{\sqrt{r}}$$

où r est le nombre de mesures.

L'erreur limite de six mesures est par exemple presque 2,5 fois inférieure.

11.3.2 Erreur limite systématique globale, X''_{Q}

Les erreurs limites systématiques (constantes aussi bien que variables), qui se comportent comme des erreurs limites aléatoires, doivent être évaluées séparément et peuvent être combinées comme suit :

$$X''_{Q} = \pm \sqrt{X''^2_{b_i} + X''^2_{d_i} + X''^2_{v_i}} \quad \dots (22)$$

où X''_{b_i} , X''_{d_i} et X''_{v_i} sont les pourcentages d'erreurs limites systématiques sur b_i , d_i , et v_i .

11.4 Présentation de l'erreur limite due aux erreurs limites aléatoires et systématiques

Il n'existe aucune méthode universellement reconnue pour combiner les erreurs limites aléatoires et les erreurs limites systématiques et la présentation de ces deux composantes séparément garantit qu'il ne peut y avoir aucun doute sur la nature des erreurs limites en question.

En dépit du fait qu'il est préférable d'indiquer les erreurs limites aléatoires et systématiques séparément, il est certain que cette présentation peut induire en erreur les lecteurs des procès-verbaux de mesure. Aussi est-il permis de combiner les erreurs en utilisant la méthode du carré de la somme des racines après avoir calculé d'abord séparément les erreurs limites aléatoires et systématiques. Dans ce cas, aucune limite de confiance ne peut être donnée à l'erreur limite globale, mais on peut indiquer les limites de confiance de la composante aléatoire de l'erreur.

L'erreur limite globale sur le débit est alors :

$$X_{Q_m} = \pm \sqrt{X'^2_{Q_r} + X''^2_{Q_r}} \quad \dots (23)$$

On peut indiquer sous l'une des formes suivantes :

- a) Débit = Q
 $(X'_{Q})_{95} = \pm \dots \%$
 $X''_{Q} = \pm \dots \%$
- b) Débit $Q \pm X_{Q_m} \dots \%$
 $(X'_{Q})_{95} = \pm \dots \%$

NOTE — $(X'_{Q})_{95}$ ci-dessus indique le pourcentage d'erreur limite aléatoire au niveau de confiance de 95 %.