

---

# Norme internationale



# 6418

---

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

---

## Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Compteurs ultrasoniques (acoustiques) de vitesse

*Liquid flow measurement in open channels — Ultrasonic (acoustic) velocity meters*

Première édition — 1985-02-15

---

CDU 532.57 : 534-8

Réf. n° : ISO 6418-1985 (F)

Descripteurs : écoulement en canal découvert, écoulement de liquide, mesurage de débit, mesurage de vitesse, mesurage ultrasonique.

Prix basé sur 13 pages

## 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 créé à cet effet. 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. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 6418 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 113, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts*.

## Sommaire

	Page
1 Objet et domaine d'application .....	1
2 Références .....	1
3 Définitions .....	1
4 Unités de mesure .....	1
5 Généralités .....	1
6 Principe de fonctionnement .....	1
7 Caractéristiques du son dans l'eau .....	3
8 Critères de performance de l'appareil .....	4
9 Choix de l'emplacement .....	5
10 Installation de l'appareil .....	5
11 Manuel d'utilisation .....	5
12 Étalonnage .....	6
13 Erreurs limites et erreurs systématiques .....	6
14 Organigrammes .....	6
 <b>Annexes</b>	
A Distances libres minimales caractéristiques par rapport au lit et à la surface de l'eau pour diverses longueurs de trajectoire et fréquences de fonctionnement .....	8
B Erreurs systématiques encourues lorsque la direction supposée du courant n'est pas parallèle à l'axe du chenal, pour diverses longueurs de trajectoire et divers angles de trajectoire .....	9
C Organigrammes .....	10

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

ISO 6418:1985

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/07498738-3f0a-4bfd-bbe8-4b2aa2856396/iso-6418-1985>

# Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Compteurs ultrasoniques (acoustiques) de vitesse

## 1 Objet et domaine d'application

La présente Norme internationale traite de la conception générale, du fonctionnement, des performances et de la mise en œuvre des compteurs ultrasoniques (acoustiques) de vitesse pour la mesure du débit dans les canaux découverts.

Bien qu'on reconnaisse que, théoriquement, de tels compteurs peuvent fonctionner à n'importe quelle fréquence, les considérations pratiques ont tendance à limiter les applications à des fréquences au-dessus de la gamme acoustique c'est-à-dire supérieures à 15 kHz. Cependant, le terme «acoustique» est couramment utilisé dans plusieurs pays pour désigner des compteurs de ce genre indépendamment de la fréquence et c'est la raison pour laquelle ce terme est retenu dans la présente Norme internationale.

## 2 Références

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

ISO 6416, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique).*

## 3 Définitions

Dans le cadre de la présente Norme internationale, les définitions données dans l'ISO 772 sont applicables.

## 4 Unités de mesure

Les unités de mesure utilisées dans la présente Norme internationale sont les unités du Système International (SI). Les degrés ou radians sont utilisés pour la mesure d'angles plans.

## 5 Généralités

Le compteur ultrasonique (acoustique) de vitesse est un appareil qui emploie la transmission acoustique pour mesurer la vitesse moyenne le long d'une trajectoire entre un ou plusieurs jeux opposés de transducteurs. Cet appareil fournit des mesurages continus de la vitesse et est utile particulièrement dans les circonstances où les débits réglés, la navigation ou l'influence de la marée, par exemple, rendent les mesurages de la vitesse par des méthodes traditionnelles, soit difficiles, soit moins précis, soit impossibles.

## 6 Principe de fonctionnement

Plusieurs types de compteurs ultrasoniques (acoustiques) de vitesse ont été élaborés utilisant des variantes du même principe fondamental. Ce qui leur est commun est le mesurage de la vitesse de l'eau par détermination des temps de parcours des impulsions acoustiques se déplaçant le long d'une trajectoire oblique par rapport à l'écoulement. La vitesse de l'eau indiquée par l'appareil est la composante moyenne de la vitesse le long de la trajectoire du son (voir figure 1). Les méthodes principales utilisées sont la méthode de mesurage du temps total de parcours, la méthode de la sonnerie continue, la méthode de la différence des fréquences et la méthode de la différence des temps de parcours.

### 6.1 Méthode de mesurage du temps de parcours

La vitesse d'une impulsion acoustique dans l'eau en mouvement est la somme algébrique de la vitesse de propagation du son et de la composante de la vitesse de l'eau parallèle à la trajectoire du son (voir figure 1). Le temps de parcours d'une impulsion acoustique émise par un transducteur situé au point A et qui se déplace dans le sens opposé au courant d'eau le long de la trajectoire AB, peut être exprimé comme suit:

$$t_{AB} = \frac{L}{c - v_p} \quad \dots (1)$$

De la même manière, le temps de parcours d'une impulsion suivant le courant de B vers A est

$$t_{BA} = \frac{L}{c + v_p} \quad \dots (2)$$

Les équations (1) et (2) peuvent être combinées et résolues par rapport à  $v_p$ :

$$v_p = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_{BA}} - \frac{1}{t_{AB}} \right) \quad \dots (3)$$

Comme

$$v_p = v_L \cos \alpha \quad \dots (4)$$

alors

$$v_L = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left( \frac{1}{t_{BA}} - \frac{1}{t_{AB}} \right) \quad \dots (5)$$

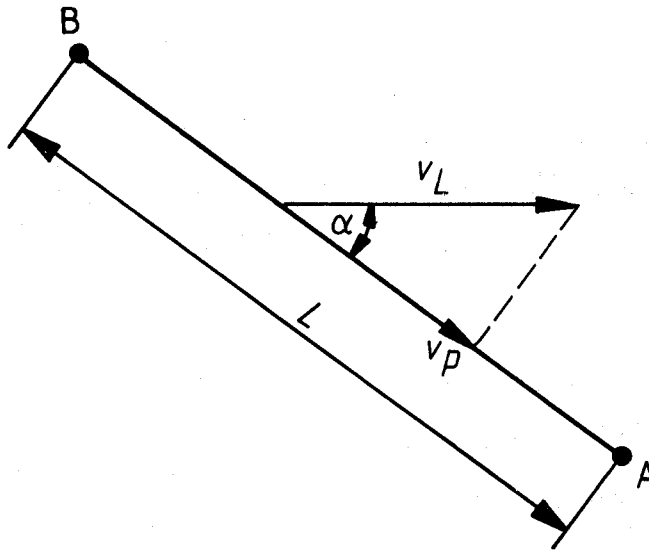


Figure 1 — Direction de la trajectoire acoustique par rapport à la vitesse de l'écoulement

où

- $c$  est la vitesse du son en eau calme;
- $L$  est la longueur de la trajectoire acoustique AB;
- $t_{AB}$  est le temps de parcours de A à B;
- $t_{BA}$  est le temps de parcours de B à A;
- $v_p$  est la composante de la vitesse moyenne de l'eau parallèle à la trajectoire acoustique;
- $v_L$  est la vitesse moyenne de l'eau parallèle à l'axe du canal et au niveau de la trajectoire acoustique;
- $\alpha$  est l'angle entre la direction moyenne de l'écoulement et la trajectoire acoustique.

Dans ce type de dispositifs, les corrections à apporter à la vitesse de propagation du son sont effectuées automatiquement lors du traitement des données.

Les temps de parcours sont mesurés successivement pour les impulsions ayant leur origine en A et progressant à contre-courant, et ensuite pour les impulsions dont l'origine est en B et progressant dans le sens du courant. La précision d'un système de ce type dépend de la précision avec laquelle peuvent être effectués les mesurages des temps de parcours individuels. Les erreurs dans le mesurage des vitesses sont fonction linéaire des erreurs dans le mesurage des temps de parcours dans l'une ou l'autre direction.

## 6.2 Méthode de la sonnerie continue

La méthode de la sonnerie continue appelée quelquefois système de fréquence de répétition des impulsions est utilisée par certains constructeurs. Les mesurages cumulés des temps de parcours sont effectués en utilisant l'impulsion reçue à

l'extrémité d'une trajectoire acoustique pour déclencher une deuxième impulsion émise par le transducteur d'origine. L'arrivée de la deuxième impulsion déclenche l'émission suivante, et le système peut continuer à fonctionner de cette manière répétitive. Le temps de parcours de l'onde sonore est obtenu soit en mesurant le temps total nécessaire à un nombre fixé de cycles, soit se réglant sur la fréquence de répétition continue des impulsions. Lorsqu'on n'utilise qu'un couple de transducteurs, ces systèmes mesurent habituellement les temps de parcours pendant une période donnée dans une direction le long de la trajectoire acoustique et ensuite dans l'autre direction. Quelquefois, on emploie deux couples de transducteurs, réglés sur des fréquences différentes et fonctionnant simultanément.

Les quotients  $1/t_{BA}$  et  $1/t_{AB}$  dans l'équation (5) représentent les fréquences de répétition des impulsions acoustiques émises dans chaque direction telles qu'elles ont été mesurées.

## 6.3 Méthode basée sur la fréquence différentielle

Une série d'impulsions ultrasoniques est émise alternativement par chaque transducteur. Les transducteurs sur les deux rives se comportent comme des récepteurs détectant les impulsions émises par les transducteurs opposés. Chaque transducteur récepteur contrôle la fréquence de l'oscillateur qui produit la série d'impulsions pour le transducteur émetteur opposé. La période de chacune des fréquences  $f_1$  et  $f_2$  est ajustée de façon à être fonction du temps de parcours de l'impulsion (voir figure 5). L'oscillateur contrôlé par les impulsions progressant dans le sens du courant aura une fréquence plus élevée que celui contrôlé par les impulsions progressant à contre-courant. Les deux fréquences sont ensuite comparées à l'aide de l'équipement de traitement de signaux et une différence fréquentielle est calculée pour une période spécifiée, cette période étant choisie en fonction de l'aire de section de l'écoulement. En choisissant judicieusement le temps de comptage, le dénombrement des impulsions est une lecture directe du débit en unités désirées.

#### 6.4 Méthode basée sur la différence des temps de parcours

La méthode basée sur la différence des temps de parcours diffère des autres méthodes étudiées d'abord en ce que la différence dans le temps d'arrivée des impulsions acoustiques déclenchées simultanément à chaque extrémité du parcours, est mesurée directement. Lorsque deux transducteurs émettent des signaux simultanément en direction l'un de l'autre, l'écoulement de l'eau le long du parcours augmentera la vitesse d'un signal et diminuera l'autre. Le signal transmis vers l'aval arrive le premier et il est utilisé pour mettre en marche une horloge; le signal transmis dans la direction opposée arrive plus tard dans le temps et est utilisé pour arrêter l'horloge. L'accroissement de temps enregistré est donc constitué par la différence entre les temps de parcours concernés, cette différence étant une fonction linéaire croissante de la vitesse de l'eau. Dans ce système, la mesure du temps de parcours total moyen dans chaque direction doit être également relevée pour compenser les variations de la vitesse du son dans l'eau.

NOTE — Dans les méthodes décrites ci-dessus, dans le cas d'un compteur fonctionnant dans le cadre du système à plusieurs trajectoires, chaque paire de transducteurs est mise en marche en série et l'on obtient ainsi les vitesses individuelles des trajectoires. Ceci est applicable à toutes les méthodes décrites en 6.1 à 6.4.

#### 6.5 Mesurage du temps

Un des points les plus importants dans n'importe quel système de compteur ultrasonique (acoustique) de vitesse, est le mesurage précis du temps. Quatre méthodes pour la détection du signal ont été utilisées par divers constructeurs. Ce sont

- la méthode de détection du bord d'attaque;
- une méthode qui utilise la différence de tension sur une série d'impulsions;
- une méthode qui reconnaît le premier passage au «zéro» après le premier pic supérieur à un niveau donné;
- une méthode comparant les rapports de phase des signaux reçus et des signaux émis.

### 7 Caractéristiques du son dans l'eau

L'utilité des ondes sonores, non seulement dans l'air mais également dans l'eau, provient du fait qu'elles constituent une forme d'énergie possédant des caractéristiques bien définies. Cette énergie peut être contrôlée avec une grande précision et transmise d'un endroit à un autre. À cause de ces deux propriétés, les ondes sonores peuvent être utilisées comme véhicule pour le transport d'information.

Les ondes sonores sont généralement réparties en trois gammes:

- la gamme des fréquences inférieures à 50 Hz, dénommée subsonique;
- la gamme audible située entre 50 et 15 000 Hz, dénommée sonore;

- la gamme des fréquences supérieures à 15 000 Hz, dénommée ultrasonique.

#### 7.1 Vitesse du son dans l'eau

La vitesse du son dépend de la masse volumique et de l'élasticité du milieu et elle est indépendante de la fréquence. La masse volumique est définie comme la masse par unité de volume. Elle s'écrit

$$\rho = m/V$$

où

- $\rho$  est la masse volumique;
- $m$  est la masse d'un volume donné;
- $V$  est le volume donné.

L'élasticité de l'eau, dans la mesure où elle affecte la propagation des ondes acoustiques est définie comme le rapport d'une variation donnée de la pression à la variation relative résultant du volume. Ainsi définie, elle est connue de manière spécifique en tant qu'élasticité volumique ou en tant que module de masse. Elle s'écrit

$$E = \frac{P_w - P_{w0}}{(V_0 - V)/V_0}$$

où

- $E$  est le module d'élasticité;
- $P_{w0}$  est la valeur initiale de la pression hydrostatique de l'eau;
- $P_w - P_{w0}$  est la variation de la pression hydrostatique;
- $V_0$  est le volume initial;
- $V_0 - V$  est la variation du volume.

La vitesse de propagation,  $c$ , est exprimée comme

$$c = \sqrt{E/\rho}$$

La masse volumique de l'eau croît avec la concentration en solides dissous et/ou en suspension, la pression ou la profondeur au-dessous de la surface, et avec la température, atteignant une valeur maximale à 4 °C. L'élasticité est affectée dans une proportion beaucoup plus grande que la masse volumique; en conséquence, lorsque les deux varient en raison d'une cause commune, la vitesse du son croît ou décroît à mesure que l'élasticité croît ou décroît.

La vitesse du son dans l'eau douce varie d'environ 1 400 m/s à légèrement plus de 1 500 m/s dans la gamme de la température ambiante, soit une variation totale d'environ 7 %.

#### 7.2 Transmission du son dans l'eau

Seule une partie de l'énergie acoustique transmise parvient au but; le reste est perdu pour diverses raisons. Cette atténuation

du signal associée à la transmission de l'énergie acoustique dans l'eau est appelée perte par propagation. Celle-ci comprend la perte par dispersion et la perte par atténuation.

### 7.2.1 Perte par dispersion

La perte par dispersion représente la diminution d'intensité acoustique due à un accroissement de la zone dans laquelle l'énergie acoustique est diffusée. La perte par dispersion est indépendante de la fréquence.

Dans la situation idéale, la dispersion se produit conformément à la loi de l'inverse du carré généralement applicable à toutes les formes d'énergie rayonnante. Les pertes par dispersion dépendent de la relation entre la longueur de la trajectoire et le diamètre du transducteur ultrasonique.

### 7.2.2 Perte par atténuation

La perte par atténuation représente la réduction de l'intensité acoustique due à la résistance du milieu à la transmission de l'énergie acoustique. Elle est analogue à la perte subie par l'énergie électrique transmise le long d'une ligne électrique, où il n'y a pas de perte par dispersion. La perte par atténuation varie en fonction directe du carré de la fréquence.

#### 7.2.2.1 Diffusion

La diffusion est la modification de la direction selon laquelle l'énergie acoustique se propage. Elle est produite par réflexion sur des corps étrangers innombrables qui se trouvent dans l'eau. Ces corps qui peuvent contenir des bulles d'air microscopiques et des particules en suspension ainsi que des bulles visibles et des matières en suspension provoquent des variations brusques d'impédance acoustique spécifique, réfléchissant et diffusant le signal.

#### 7.2.2.2 Absorption

L'absorption est le processus selon lequel l'énergie acoustique est transformée en chaleur par le frottement entre les molécules d'eau étant donné qu'une onde sonore subit dans l'eau des compressions et dilatations répétées du milieu.

## 7.3 Réverbération

La réverbération est l'énergie renvoyée par des réflecteurs autres que celui que l'on désire observer. La réverbération du son dans l'eau est analogue à l'effet optique bien connu qui réduit l'utilité des feux de route par une nuit de brouillard.

## 8 Critères de performance de l'appareil

La performance d'un compteur ultrasonique (acoustique) de vitesse dépend non seulement des parties électroniques et des parties de l'appareil placées sous l'eau, mais également du choix de la fréquence de fonctionnement appropriée, de la puissance et de la sensibilité du système nécessaires pour l'adaptation aux conditions du site.

## 8.1 Partie de l'appareil située sous l'eau

L'installation et l'entretien des éléments de l'appareil placés sous l'eau sont généralement coûteux et difficiles, et les éléments sont même, par moments, inaccessibles.

### 8.1.1 Transducteurs et câblage

Les transducteurs doivent être suffisamment robustes pour pouvoir supporter les manipulations et les effets de l'environnement. Ils doivent être construits en matériaux fortement résistants à la corrosion et traités par un inhibiteur contre la croissance organique.

Tous les câbles d'interconnexion arrivant aux transducteurs et en partant doivent être blindés et/ou protégés contre les détériorations pendant l'installation et le fonctionnement (voir chapitre 10).

Des dispositions doivent être prises en vue du simple remplacement des transducteurs et/ou d'un câble en cas de défaillance ou de détérioration.

### 8.1.2 Carter

Un carter doit être prévu pour assurer le montage rigide des transducteurs acoustiques (voir chapitre 10) et des dispositions doivent être prises pour assurer les déplacements dans le plan vertical.

Des dispositions doivent être prévues pour assurer l'alignement précis des transducteurs.

## 8.2 Équipement électronique

L'équipement électronique peut être considéré comme étant composé de quatre éléments: le transmetteur, le récepteur, le compteur de temps et le dispositif permettant le traitement des données.

### 8.2.1 Transmetteur

Généralement la fréquence de fonctionnement employée pour une application particulière dépend de la longueur de la trajectoire acoustique, du dégagement minimal entre la trajectoire acoustique et les réflecteurs acoustiques environnants (par exemple, la surface et le fond), de la charge de sédiments en suspension et/ou de la quantité d'air entraîné que l'on peut prévoir. Théoriquement, on devrait utiliser la fréquence la plus haute possible et la puissance la plus grande du transmetteur qui soient compatibles avec la sécurité du fonctionnement, car ceci accroît la précision du réglage du système et permet également d'obtenir une distance plus faible entre la trajectoire acoustique et la surface ou le fond du canal. Cependant, l'atténuation du son par l'eau et la dispersion due aux particules et à l'air entraîné croissent avec la fréquence. Bien que l'augmentation de la puissance du transmetteur présente quelques avantages, il y a une limite supérieure que l'on ne peut pas dépasser. Ainsi il faut donc parvenir à un compromis qui garantisse une précision suffisante tout en assurant un fonctionnement sûr dans des conditions défavorables d'absorption/dispersion. L'annexe A présente des gammes approximatives de fréquences et de longueurs de trajectoires utilisées normalement dans les systèmes acoustiques de mesurage de la vitesse.



Un facteur important régissant les pertes par dispersion est la capacité de l'impulsion acoustique de conserver son amplitude sur toute sa trajectoire. Ceci dépend essentiellement de la relation entre la forme et les dimensions du transducteur et la longueur de la trajectoire acoustique:

$$L_o = \frac{D^2 - \lambda^2}{4 \lambda} ; \sin \gamma = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

où

$L_o$  est la distance sur laquelle le faisceau a une forme presque cylindrique;

$D$  est le diamètre de l'émetteur;

$\lambda$  est la longueur d'onde;

$\gamma$  est l'angle entre les points de mi-puissance.

### 8.2.2 Récepteur

On doit utiliser un récepteur ayant le gain le plus élevé possible compte tenu des contraintes liées aux conditions ambiantes électriques et acoustiques.

Le rapport entre le signal et le bruit doit être aussi élevé que possible dans les conditions d'environnement de propagation.

La méthode utilisée pour la reconnaissance du signal doit permettre d'identifier de façon suffisamment fiable un point particulier reproductible de l'impulsion pour fournir la précision nécessaire du temps de parcours.

Le récepteur doit être construit de telle sorte qu'un signal qui n'est pas assez fort pour satisfaire aux conditions spécifiées de précision de mesurage ne soit pas utilisé pour le calcul de la vitesse.

### 8.2.3 Compteur de temps

La fréquence de la base de temps du compteur doit être suffisamment élevée pour permettre une discrimination de signaux nécessaires à l'obtention de la précision spécifiée.

La précision et la stabilité de la base de temps doivent être telles qu'elles puissent assurer les mesurages des temps de parcours avec l'exactitude exigée.

### 8.2.4 Appareil de traitement des données

Un dispositif automatique intérieur doit être prévu pour le contrôle en continu de la précision des mesurages du temps et de la précision des calculs. Des dispositions doivent être prévues pour éviter des lectures erronées pendant les interruptions acoustiques dues au trafic sur la rivière, à la vie aquatique ou à la dégradation progressive des composants de l'appareil. L'appareil peut déterminer si une donnée est valable ou non et afficher ce signal sur le pupitre de commande de l'instrument.

Des dispositions doivent également être prévues pour tester la bande de sortie du transmetteur et la sensibilité du récepteur en cours de fonctionnement du système. L'appareil doit également fournir une bande de sortie analogique ou numérique en vue de faciliter l'enregistrement sur place des données, leur transmission à distance ou les deux en même temps.

## 9 Choix de l'emplacement

Lorsque cela est possible, les emplacements pour le mesurage de la vitesse ultrasonique doivent être choisis dans une section du canal relativement droite sur une distance équivalente à plusieurs fois la largeur du canal en amont et en aval, afin de s'assurer que la direction du courant peut être déterminée avec précision. S'il n'est pas possible de déterminer la direction du courant avec précision, il peut être nécessaire d'utiliser deux trajectoires acoustiques se coupant habituellement à 90° afin d'obtenir la composante de la vitesse vers l'aval.

Les emplacements présentant de grandes quantités d'air entraîné, tels que l'aval immédiat des usines hydro-électriques, ne doivent jamais être choisis. De même les emplacements présentant de grandes concentrations de sédiments en suspension sont à éviter.

En l'absence de techniques spéciales permettant de placer une trajectoire acoustique plus près qu'indiqué à l'annexe A, la distance entre la trajectoire acoustique et les réflecteurs acoustiques avoisinants (la surface et le lit) ne doit pas être inférieure au minimum spécifié.

Les emplacements présentant des gradients thermiques ou de densité doivent être évités autant que possible. Ces gradients peuvent produire une déviation du parcours acoustique par rapport à la ligne droite théorique. Bien que ceci ait un effet négligeable sur la longueur de la trajectoire, cela signifie que la mauvaise trajectoire peut être mesurée; et dans le cas extrême, le signal acoustique peut être perdu.

Pour déterminer la direction moyenne d'un courant, il est possible de déplacer l'un des transducteurs le long de la rive jusqu'à ce qu'il soit situé en face de l'autre transducteur, la vitesse mesurée étant alors égale à zéro. La trajectoire acoustique sera alors perpendiculaire à l'écoulement.

## 10 Installation de l'appareil

Les transducteurs acoustiques doivent être montés de manière rigide (voir 8.1.2).

Les câbles liés aux transducteurs doivent être protégés contre les détériorations dues aux débris flottants ou à la glace (voir 8.1.1).

La longueur et le niveau de la trajectoire acoustique doivent être déterminés avec précision.

Les transducteurs doivent être alignés les uns par rapport aux autres de sorte que l'on reçoive le signal maximal.

L'angle de la trajectoire acoustique par rapport au courant doit être déterminé avec précision.

L'équipement électronique doit être installé conformément aux instructions du constructeur.

## 11 Manuel d'utilisation

Un manuel d'utilisation et d'entretien très détaillé, donnant des directives complètes et si nécessaire des illustrations, doit être fourni avec chaque appareil. Le manuel doit contenir toutes les

informations souhaitables relatives à l'entretien et au dépannage. Une liste de pièces de rechange recommandées doit également être fournie.

## 12 Étalonnage

L'étalonnage consiste à introduire dans le calculateur les longueurs des trajectoires mesurées lors de l'installation telles qu'elles sont construites ainsi que les angles des trajectoires afin d'obtenir en sortie une vitesse correctement étalonnée. Il est également possible de vérifier le compteur de vitesse par le moyen d'autres dispositifs tels que les moulinets hydrométriques à élément rotatif. Cependant, du fait même que la précision de l'instrument est extrêmement grande pour le mesurage de la vitesse, l'étalonnage constitue généralement un contrôle de l'appareil plutôt qu'un véritable étalonnage.

Pour vérifier si l'équipement électronique fonctionne bien du point de vue de la linéarité des résultats, il suffit d'inverser les connexions aux transducteurs et de vérifier que la valeur mesurée reste la même bien que son signe soit inversé.

## 13 Erreurs limites et erreurs systématiques

La précision est influencée par divers facteurs qui sont indiqués séparément ci-dessous.

### 13.1 Précision de la mesure du temps

La précision de la mesure du temps dépend du rapport signal-bruit, de la fréquence de fonctionnement, de la précision de la base de temps, de la fréquence de la base de temps, et de la netteté de la reconnaissance du signal.

Généralement, le rapport signal-bruit ainsi que la fréquence de fonctionnement sont prévus aussi élevés que possible, pour être compatibles avec les conditions de propagation dans l'environnement.

Le mesurage de l'intervalle de temps est normalement effectué au moyen d'un compteur numérique et d'un oscillateur à quartz. Etant donné que la précision à long terme des oscillateurs à quartz est située dans une gamme de 10 à 50 ppm (parties par million), les erreurs limites provenant de cette source sont négligeables. La stabilité à court terme est située dans la gamme de 1 ppm et est également négligeable en ce qui concerne sa contribution aux erreurs limites dans le mesurage de  $\Delta T$ .

L'instabilité de la synchronisation provoquée par la période du compteur constitue une source d'erreurs limites aléatoires, comme c'est le cas du bruit pour le signal reçu. Cependant, les deux sont des erreurs limites aléatoires et sont réduites suivant les besoins par une période moyenne convenable. Même avec

une longueur de trajectoire acoustique de 300 m, un mesurage unique peut être effectué en moins de 500 ms, de sorte que l'on peut obtenir la moyenne de nombreux mesurages individuels dans un court espace de temps.

### 13.2 Variations de la vitesse du son

Les variations de la vitesse du son ne constituent pas une source significative d'erreurs limites si l'on suppose des variations de vitesse de moins de 1 % sur la trajectoire acoustique, et si la vitesse de l'eau est inférieure à 15 m/s. L'erreur limite provenant de cette source est inférieure à 0,1 %.

### 13.3 Erreurs dues aux courants obliques

La source potentielle d'erreurs systématiques la plus importante pour le mesurage de la vitesse sur une trajectoire simple est constituée par la détermination de l'angle de la trajectoire acoustique par rapport au courant (voir figure 2). Etant donné que la composante de la vitesse le long de la trajectoire acoustique est proportionnelle au cosinus de l'angle formé par la direction supposée du courant et la trajectoire acoustique, une erreur systématique,  $\beta$ , de  $1^\circ$  (0,017 5 rad) dans la direction supposée du courant ou dans le mesurage d'un angle de  $45^\circ$  (0,785 4 rad) entraînera une erreur de 1,76 % dans le mesurage de la vitesse sur la ligne (voir annexe B). Cette erreur croît à mesure que l'angle de la trajectoire augmente. Théoriquement, si l'on utilise deux trajectoires croisées de  $45^\circ$  (0,785 4 rad) et si l'on effectue la moyenne des résultats, cette erreur est ramenée à 0,03 % pour une erreur de  $1^\circ$  (0,017 5 rad). En raison des difficultés pratiques, l'ordre de grandeur de cette erreur peut être de dix fois plus élevé.

### 13.4 Turbulence

La turbulence introduit des variations aléatoires d'importance moyenne dans les lectures de vitesse. Cependant, il est possible d'intégrer les variations sur une période appropriée, laquelle est longue si on la compare à la période de la turbulence.

## 14 Organigrammes

Les organigrammes illustrant les circuits à mettre en œuvre pour

- a) la méthode du temps de parcours total;
- b) la méthode de la sonnerie continue;
- c) la méthode de la différence des fréquences;
- d) la méthode de la différence des temps de parcours;

sont donnés à l'annexe C, figures 3 à 6.