
Norme internationale



6416

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

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Mesure de débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique)

Liquid flow measurement in open channels — Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method

Première édition — 1985-03-15

CDU 532.57 : 53.082.4

Réf. no : ISO 6416-1985 (F)

Descripteurs : écoulement en canal découvert, mesurage de débit, écoulement de liquide, essai par ultrasons.

Prix basé sur 20 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 6416 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 Principe de la méthode de mesurage	1
6 Choix de l'emplacement	1
7 Conception et construction	1
8 Étalonnage	3
9 Exploitation	4
10 Erreurs limites sur le mesurage	5
 Annexes	
A Fréquence et hauteur libre en fonction de la longueur de trajectoire	7
B Étalonnage	8
C Erreurs limites de mesure	9
D Contrôle de l'écoulement oblique au moyen de la technique des trajectoires croisées	19

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Mesure de débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique)

1 Objet et domaine d'application

La présente Norme internationale traite de l'établissement et de l'exploitation d'une station de jaugeage par ultrasons (par émission acoustique) sur une rivière, un fleuve ou un chenal pour le mesurage de débit. En ce qui concerne le fonctionnement et l'utilisation des instruments de mesure, il convient de se référer à l'ISO 6418.

2 Références

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

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

ISO 1100/2, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Partie 2: Détermination de la relation hauteur-débit.*

ISO 4373, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Appareils de mesure du niveau de l'eau.*

ISO 5168, *Mesure de débit des fluides — Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit.*

ISO 6418, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Compteurs ultrasoniques (acoustiques) de vitesse.*

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).

5 Principe de la méthode de mesurage

5.1 Le principe sur lequel se fonde la méthode ultrasonique (acoustique) consiste à mesurer la vitesse d'écoulement à une certaine élévation ou à certaines élévations dans le chenal en émettant des impulsions acoustiques dans l'eau dans les deux sens à partir de transducteurs situés dans les rives de chaque

côté du cours d'eau. Les transducteurs peuvent être conçus pour émettre et recevoir des impulsions. Ils ne sont pas situés directement face à face, mais ils sont décalés de telle sorte qu'il se produise une différence de temps de parcours entre les impulsions traversant vers l'aval et vers l'amont. L'angle entre la trajectoire d'émission et le sens d'écoulement devrait être normalement entre 30 et 60° (voir figures 2 et 3).

5.2 La différence des temps de parcours des impulsions acoustiques qui traversent le cours d'eau respectivement vers l'amont et vers l'aval est liée directement à la vitesse moyenne de l'eau au niveau des transducteurs. On peut alors établir une relation entre cette vitesse et la vitesse moyenne de l'écoulement dans toute la section. De plus, si on le désire, le système peut fournir une indication directe du débit si on introduit dans l'unité électronique de traitement un facteur tenant compte de l'aire de la section.

6 Choix de l'emplacement

6.1 L'emplacement choisi doit être tel qu'il soit possible de mesurer toute la gamme de débit et tous les types d'écoulement qui peuvent se produire ou dont le mesurage est exigé. Il convient de tenir compte des facteurs suivants:

- a) il faut disposer d'une source d'énergie électrique fiable;
- b) il doit y avoir un bon moyen d'accès à l'emplacement par tous les temps;
- c) le bief de mesurage doit être rectiligne et uniforme; il convient, dans la mesure du possible, d'éviter les courbes et les irrégularités prononcées du canal, mais celles-ci peuvent être acceptables si la condition d) est remplie ou lorsque les changements peuvent être utilement contrôlés par une trajectoire acoustique croisée. Il convient d'éviter les sections où des renvois de courant ou des remous se forment;
- d) en différentes sections du bief entre les transducteurs amont et aval, la répartition des vitesses doit être similaire;
- e) si le profil du lit change de manière appréciable avec le niveau, il convient de procéder à des relevés périodiques du lit à différents niveaux d'écoulement pour déterminer le changement de l'aire afin de calculer le débit;
- f) la section mouillée ne doit pas comporter de végétation car celle-ci produira une atténuation du signal acoustique;

g) l'installation doit prendre en considération la réflexion et les erreurs chronométriques ainsi que les problèmes causés par les interférences dues à des trajectoires multiples. La profondeur minimale requise de l'écoulement augmente avec la longueur de la trajectoire. Les erreurs chronométriques ne permettent pas d'employer les basses fréquences (voir annexe A);

h) la réfraction du signal acoustique peut résulter de gradients de température et le signal risque d'être perdu du fait uniquement de cette cause. Il convient donc de procéder à un relevé de la température de l'eau à l'emplacement proposé, notamment durant les périodes des températures extrêmes; la réfraction du signal acoustique peut aussi être occasionnée par des gradients de densité;

j) l'atténuation du signal acoustique peut être occasionnée par l'absorption, la réflexion et la dispersion de l'onde de pression propagée. Les pertes dues à l'atténuation ne permettent pas d'employer la haute fréquence sur une trajectoire extrêmement longue;

k) les solides en suspension peuvent affecter d'une manière significative l'atténuation du signal et les bulles d'air entraînées peuvent l'affecter d'une manière encore plus significative. Il convient de tenir compte de la fréquence d'utilisation et de la longueur de la trajectoire. La granulométrie et la concentration des particules en suspension et/ou la population de bulles d'air doivent être déterminées pour définir l'atténuation;

m) dans le cas des emplacements qui ne remplissent pas une ou plusieurs des conditions ci-dessus, il convient d'effectuer un essai préliminaire en utilisant un équipement acoustique portatif.

7 Conception et construction

7.1 La station de jaugeage doit consister en

- a) des transducteurs disposés comme suit:
 - 1) un ou plusieurs transducteurs installés de chaque côté du cours d'eau et fixés en place de manière permanente, ou
 - 2) un ou plusieurs transducteurs installés de part et d'autre du cours d'eau et pouvant être déplacés verticalement ou obliquement;
- b) une console contenant un système électronique de traitement des données, ainsi que les facilités nécessaires pour l'enregistrement et/ou la transmission des données;
- c) un limnigraphe relié au système de traitement des données lorsqu'il faut un relevé de copie en clair du niveau ou du débit ou les deux à la fois;
- d) un limnimètre de référence et un repère permanent de nivellement.

Tous les câbles d'interconnexion vers et en provenance des transducteurs doivent être blindés et/ou protégés contre les dégâts lors de l'installation et de l'exploitation.

7.2 Dans le cas de la méthode employant des transducteurs fixes [voir 7.1 a) 1)], l'on obtient une vitesse moyenne sur la tra-

jectoire ou un indice proportionnel à la vitesse que l'on combine au niveau et à l'aire de manière à calculer le débit. L'étalonnage doit être fait par moulinet, par transducteurs ou par extension de la théorie du profil de la vitesse.

7.2.1 Dans le cas de la méthode où les transducteurs sont conçus pour se déplacer sur un ensemble vertical ou incliné [voir 7.1 a) 2)], il est possible d'utiliser les transducteurs pour étalonner la station. On le fait en établissant des répartitions verticales des courbes de vitesse par déplacement des transducteurs sur diverses trajectoires de manière à obtenir une série de vitesses de trajectoire dans le plan vertical. Il convient d'effectuer cette opération pour différentes valeurs de niveau et d'analyser les courbes résultantes de manière à déterminer l'endroit optimal pour la fixation des transducteurs. Il convient, si possible, d'effectuer un contrôle indépendant au moyen d'un moulinet ou d'une autre méthode appropriée.

7.3 Dans le système à trajectoires multiples, là où l'on utilise plusieurs paires de transducteurs, il convient de déterminer les endroits optimaux où sont fixés ceux-ci en se basant sur un examen préliminaire des profils verticaux des vitesses obtenus au moyen d'un moulinet. À moins que l'on s'attende à des courbes de vitesse verticales exceptionnelles, l'on peut présumer la distribution parabolique (ou logarithmique) classique. Il convient alors de fixer les transducteurs comme dans 7.1 a) 1), ou de les installer sur un ensemble comme dans 7.1 a) 2). D'une manière générale l'on préfère la première solution.

7.4 La décision d'utiliser un système à trajectoire unique ou à trajectoires multiples dépendra de la précision voulue du système désiré, de la plage de niveaux à laquelle on s'attend, de la répartition verticale des vitesses à ces niveaux, et des limitations de l'atténuation et de la réfraction. Si l'on peut obtenir un étalonnage satisfaisant, quel que soit le niveau, à partir de l'indice de vitesse, on peut alors préférer un système à trajectoire unique au système à trajectoires multiples.

7.5 Lorsque les transducteurs doivent être fixés en place de manière permanente [voir 7.1 a) 1)], il convient de prévoir un montage rigide. Lorsqu'ils sont conçus pour coulisser sur un ensemble [voir 7.1 a) 2)], la construction des supports et des glissières doit être prévue pour supporter les dégâts résultant des débris flottants et de l'accumulation de limon qui peut se produire, etc. Il convient de fixer solidement les glissières au lit ou aux rives et de les enfoncer dans du béton de manière qu'elles ne risquent pas de s'enfoncer, de pencher ou d'être entraînées par le cours d'eau. Les ancrages doivent se prolonger en dessous de la surface du sol jusqu'à un niveau exempt des perturbations dues au gel.

Dans le cas des deux méthodes la construction doit être suffisamment rigide pour être capable de supporter les effets des inondations.

7.6 En vue d'augmenter la fiabilité et la précision du système, il convient de procéder à un relevé détaillé des niveaux du lit et des rives se prolongeant depuis une largeur de chenal en amont du support du transducteur amont jusqu'à au moins une largeur de chenal en aval du support du transducteur aval. Selon les résultats de ce relevé, il convient de considérer la possibilité d'améliorer le lit et les rives soit par nettoyage, soit par dragage, après quoi il conviendra de répéter le relevé.

7.7 Une fois les positions des supports des transducteurs déterminées, il convient de relever avec soin l'angle et la longueur des trajectoires entre les supports en vue d'introduire ultérieurement ces données dans le système de traitement. Il convient d'effectuer un relevé des niveaux du lit entre les supports des transducteurs tout le long de la trajectoire et de calculer également le niveau moyen du lit pour l'introduire dans le système de traitement lorsque le débit est calculé sur place. Ce relevé doit être répété périodiquement dans le cadre des opérations normales d'exploitation.

7.8 Les données provenant d'une station de jaugeage à ultrasons peuvent être enregistrées selon l'un ou l'autre des modes suivants:

- a) vitesse moyenne sur la trajectoire désignée par la suite par « vitesse en ligne » (ou un indice numériquement proportionnel à celle-ci);
- b) vitesse en ligne et niveau;
- c) débit et niveau;
- d) vitesse et débit;
- e) vitesse, débit et niveau.

Si le niveau n'est pas inclus dans le mode choisi, il convient de l'enregistrer séparément au moyen d'un limnigraphe en vue de traitement ultérieur en dehors de la station.

7.9 Lorsqu'on a choisi le mode d'exploitation basé sur le débit, il convient de prévoir un système manuel dans le processeur électronique pour effectuer la correction nécessaire le cas échéant en cas de changement du niveau du lit (voir 7.7).

7.10 Limnimètre de référence

Le limnimètre de référence doit être conforme aux spécifications de l'ISO 4373.

7.11 Repère de nivellement de la station

Un repère de nivellement de la station doit être établi conformément aux spécifications de l'ISO 4373.

7.12 Puits de mesurage

La conception et la construction du puits de mesurage, si employé, doivent être conformes aux spécifications de l'ISO 4373.

7.13 Limnigraphe

Le limnigraphe doit être conforme aux spécifications de l'ISO 4373.

8 Étalonnage

8.1 Généralités

L'étalonnage d'une station de jaugeage ultrasonique peut être effectué indépendamment à l'aide de moulinets ou bien à l'aide du compteur ultrasonique lui-même. Dans un cas comme dans

l'autre, si les caractéristiques du chenal changent avec le temps, il faudra réitérer l'étalonnage.

8.1.1 La méthode d'étalonnage de la vitesse en ligne (indice de vitesse) est employée lorsqu'on a une seule paire de transducteurs fixés en place (voir figure 2). Le système nécessite alors un étalonnage indépendant au moyen d'un moulinet ou d'une autre méthode appropriée (la figure 4 montre un exemple d'étalonnage de ce genre).

8.1.2 Il convient de noter que la mesure de l'angle de trajectoire, θ , ne saurait être déterminée exactement car ceci nécessiterait la mesure de θ en plusieurs points le long de la trajectoire acoustique et la pondération des résultats en fonction de la vitesse. De toute manière, θ varie généralement avec le débit. Toutefois, le coefficient K compense les inexacitudes à la fois de θ et de L , où K est le coefficient établissant un rapport entre la vitesse en ligne V_L et la vitesse moyenne \bar{V} , et L est la longueur de trajectoire (voir figure 3).

8.2 Transducteurs mobiles dans un système à trajectoire unique

8.2.1 Les méthodes suivantes supposent que la relation théorique liant la vitesse moyenne aux indications du compteur à ultrasons est fiable. Il est par conséquent recommandé de procéder à des contrôles indépendants de cette fiabilité soit en procédant à une série de tests électroniques pour vérifier que le compteur fonctionne de la manière prévue, soit en utilisant un appareil ultrasonique portable distinct. Dans la mesure du possible, il convient d'effectuer également des contrôles avec moulinet.

8.2.2 L'étalonnage de la station de jaugeage dans ce cas consiste à fixer les transducteurs à un niveau donnant la vitesse moyenne dans la section mouillée pour l'écoulement modal. Toutefois, lorsque le niveau change, les transducteurs n'indiqueront plus la vitesse moyenne. Ils la sous-estimeront dans le cas d'une augmentation de niveau et la surestimeront lorsque le niveau a baissé.

8.2.3 Si l'on connaît le niveau moyen (ou modal) et que la répartition verticale des vitesses soit logarithmique, dans ce cas, l'on trouvera la vitesse moyenne (ou le débit moyen) en plaçant les transducteurs à environ $0,6 D_m$ de la surface, D_m étant la profondeur moyenne de l'écoulement au-dessus du niveau moyen du lit. Celui-ci doit être déterminé le long de la section diagonale contenant les transducteurs et calculé par rapport au repère de référence de la station (voir 7.7). On trouvera la position réelle à partir de la répartition verticale des vitesses.

8.2.4 Si le niveau moyen (ou modal) n'est pas connu, l'on peut obtenir D_m d'après un histogramme des niveaux portant sur une période de temps appropriée (voir figure 6).

8.2.5 Le plus souvent, on ne connaît pas la répartition verticale des vitesses et on la trouve en utilisant le dispositif permettant de déplacer les transducteurs dans un plan vertical.

8.2.6 On obtient la répartition verticale de la vitesse en ligne en fixant les transducteurs aux niveaux choisis et en mesurant la vitesse en ligne à chaque niveau. On obtient ainsi cette répartition pour plusieurs niveaux de l'écoulement (voir tableau 2). L'exemple donné dans ce tableau comporte 15 répartitions de ce type, composées chacune de 7 vitesses en ligne. On en déduit les valeurs de $\frac{\bar{V}}{V_d}$ pour des valeurs de $\frac{d}{D}$ de 0,1 à 0,9, \bar{V} étant la vitesse moyenne pour chaque courbe, V_d la vitesse en ligne à une distance d de la surface et D la profondeur de l'écoulement (voir tableau 3).

8.2.7 On porte alors sur un graphique les valeurs moyennes de $\frac{\bar{V}}{V_d}$ en fonction de $\frac{d}{D}$ et on trace la courbe correspondante

(voir figure 5 et tableau 3, colonnes 1 et 17). $\frac{\bar{V}}{V_d}$ est le facteur de correction ou coefficient C_V indiquant l'écart positif ou négatif entre la vitesse ultrasonique à une distance d quelconque de la surface et la vitesse moyenne dans la section mouillée.

8.2.8 La courbe de la figure 5 fournit également la cote optimale des transducteurs à la valeur de $\frac{d}{D}$ pour laquelle $C_V = 1$ (voir annexe B). La courbe comportera une certaine dispersion dépendant de la similitude géométrique entre les répartitions verticales des vitesses et on devra calculer l'écart-type de cette dispersion pour chaque valeur de $\frac{d}{D}$, au niveau de confiance de 95 % (voir tableau 3, colonne 18).

Lorsque le niveau d'eau varie, la valeur appropriée de C_V peut être lue sur la courbe de la figure 5 en portant la nouvelle valeur de $\frac{d}{D}$.

8.2.9 En pratique, il est commode pour le traitement électronique des données de préparer une seconde courbe donnant C_V en fonction du niveau ou de la profondeur D en se basant sur la position choisie pour les transducteurs (voir tableau 4, figure 6 et annexe B). On trouvera toutefois que dans certaines stations il peut être avantageux de placer les transducteurs à une cote qui n'est pas nécessairement la cote optimale définie ci-dessus, mais la procédure est semblable.

8.2.10 Le système d'auto-étalonnage est principalement employé là où les vitesses sont trop faibles pour être mesurées au moyen du moulinet et où la plage des niveaux est réduite. On doit toutefois procéder à des contrôles ponctuels en utilisant un moulinet lorsque c'est possible. Le niveau du lit doit être vérifié régulièrement, notamment dans les stations où l'on suspecte le moindre changement et la nouvelle profondeur doit être introduite dans le système.

8.3 Transducteurs mobiles dans un système à trajectoires multiples

8.3.1 Le système à trajectoires multiples comprend deux ou plusieurs trajectoires de transducteurs. Ceux-ci peuvent être fixés ou conçus pour se déplacer à la verticale ou selon un plan incliné mais, d'une manière générale, on préférera un système fixe.

8.3.2 Le système à trajectoires multiples est employé lorsque l'on considère que la plage des niveaux ne pourrait pas être couverte par un système à trajectoire unique ou lorsque le profil vertical des vitesses s'écarte de manière appréciable de la répartition logarithmique et où une vitesse de trajectoire simple ne serait pas susceptible d'une corrélation avec la vitesse moyenne dans la section mouillée.

8.3.3 Le nombre et la position des trajectoires de mesure dépendront de la répartition fréquentielle des niveaux, de l'importance relative accordée à la précision des mesures à niveau élevé ou bas et de la convention adoptée pour calculer la vitesse moyenne (ou le débit) par intégration.

8.3.4 Le but du système à trajectoires multiples est en principe de mesurer la vitesse le long de chaque trajectoire de manière simultanée et continue. Ceci n'étant pratiquement pas réalisable, la procédure consiste généralement à effectuer successivement une mesure le long de chaque trajectoire et à répéter ce cycle, par exemple à des intervalles d'une seconde.

8.3.5 Dans la méthode normale de mesure, on associe à chaque trajectoire un accroissement prédéterminé de la profondeur et on obtient la vitesse moyenne (ou le débit) en additionnant les contributions calculées pour chaque accroissement de la profondeur en utilisant une convention d'intégration appropriée. Cette valeur moyenne est alors affichée et enregistrée et la saisie des données recommence automatiquement.

8.3.6 Grâce à une série de niveaux d'eau de référence mémorisées, l'on utilise uniquement les trajectoires de mesure submergées à une profondeur supérieure à une valeur minimale donnée.

8.3.7 Un système utilisant une trajectoire croisée, même s'il est au même niveau que sa trajectoire de comparaison, doit être considéré comme un système à trajectoires multiples.

Un système à trajectoires multiples ainsi qu'un système à trajectoire unique constituent un système de mesurage direct si l'on connaît exactement les longueurs des trajectoires et les angles. Les systèmes à trajectoires multiples définissent la répartition verticale des vitesses et n'exigent que très peu ou aucun étalonnage. Les systèmes à trajectoire unique ont le plus souvent besoin d'être étalonnés par d'autres méthodes. Toutefois, même plusieurs systèmes à trajectoire unique peuvent nécessiter très peu ou aucun étalonnage. Tous les systèmes doivent faire l'objet de vérifications ponctuelles par d'autres méthodes.

9 Exploitation

9.1 Pour obtenir un relevé satisfaisant, il faut que la station reste constamment en parfait état de marche. Ceci nécessite l'entretien approprié de la station et de son équipement, et le contrôle de son étalonnage.

9.2 Il convient de suivre les instructions données dans le manuel du fabricant lorsqu'on procède au contrôle, de contrôler les témoins de défaut et de signaler le moindre indice de fonctionnement incorrect. Du fait que le système comporte un matériel électronique sophistiqué, il est recommandé que l'opérateur qui doit en être chargé suive un cours de formation spéciale, celui-ci étant généralement assuré par le fabricant. L'opérateur pourra alors s'occuper des défauts peu importants tandis que dans d'autres cas il sera inévitable de faire appel au fabricant.

9.3 Il faut une source sûre d'énergie électrique pour assurer le fonctionnement du système.

9.4 Il faut veiller soigneusement à ce que toute donnée erronée entraînant un dépouillement soit notée lors des visites sur place.

9.5 Tout l'équipement de la station doit être prévu pour le redémarrage automatique en cas de panne d'électricité ou de baisse de tension.

9.6 Du fait que le système enregistre également les écoulements inverses, il faut, si cela se produit, saisir toute occasion d'effectuer un étalonnage de contrôle.

9.7 Lorsqu'on sait que le niveau du lit varie avec le temps, il convient de faire le nécessaire pour que les levés du lit soient effectués périodiquement selon les besoins et d'apporter les corrections aux coefficients de la section et de la vitesse moyenne.

9.8 Dans un système à trajectoires multiples, la défaillance de certaines trajectoires ne devrait pas mettre le système hors service. Si une telle défaillance se produit, le système électronique devrait comporter des arrangements permettant soit, si on doit calculer le débit, d'utiliser les trajectoires adjacentes, soit d'enregistrer indépendamment les vitesses des trajectoires qui fonctionnent.

10 Erreurs limites sur le mesurage

10.1 Les principes prescrits pour l'estimation de l'erreur limite sur une mesure isolée de débit sont donnés dans l'ISO 5168.

10.2 L'erreur limite sur le mesurage de la vitesse en ligne peut être obtenue comme suit, en supposant que $t_1 = t_{AB}$ et $t_2 = t_{BA}$ (voir figure 3):

$$V_L = \frac{L}{2 \cos \theta} \left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)$$

$$\text{Si } \cos \theta = \frac{S}{L}$$

où S est la distance séparant les deux transducteurs, mesurée le long de l'axe de l'écoulement, alors

$$V_L = \frac{L^2}{2S} \left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right) \quad \dots (1)$$

Le pourcentage d'erreur limite, X_{V_L} , de la vitesse en ligne est obtenu en déterminant la différentielle totale de l'équation (1) et en la divisant par la vitesse en ligne V_L :

$$X_{V_L} = \frac{\delta V_L}{V_L} = 2 \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta S}{S} + \left(\frac{t_1 \times t_2}{t_1 - t_2} \times \frac{\delta t_1}{t_1^2} \right) - \left(\frac{t_1 \times t_2}{t_1 - t_2} \times \frac{\delta t_2}{t_2^2} \right) \quad \dots (2)$$

Du fait que l'erreur limite individuelle peut être positive ou négative avec la même probabilité, les carrés des composants de l'erreur limite totale sont ajoutés pour obtenir

$$X_{V_L}^2 = 4 X_L^2 + X_S^2 + \left(\frac{t_1 \times t_2}{t_1 - t_2} \right)^2 \left(\frac{X_{t_1}^2}{t_1^2} + \frac{X_{t_2}^2}{t_2^2} \right) \quad \dots (3)$$

où

X_{V_L} est l'erreur limite aléatoire, en pourcentage, sur la vitesse ultrasonique en ligne;

X_L et X_S sont les erreurs limites aléatoires, en pourcentage, sur la mesure des distances L et S ;

X_{t_1} et X_{t_2} sont les erreurs limites aléatoires, en pourcentage, sur la mesure des temps de transit t_1 et t_2 .

Toutes les erreurs limites sont évaluées au niveau de probabilité de 95 %.

10.3 L'erreur limite dans le calcul de la vitesse moyenne à partir de la vitesse en ligne mesurée (vitesse sur une trajectoire) dépend de la méthode d'étalonnage employée. L'erreur limite sur le débit calculé à partir de cette vitesse dépend de l'erreur précédente et de l'erreur limite sur la mesure de l'aire de la section droite.

10.3.1 Méthode de la vitesse en ligne

L'estimation de l'erreur limite sur la vitesse moyenne et donc sur le débit dans le cas de la méthode de mesurage d'après la vitesse en ligne implique une analyse par régression et peut être effectuée selon l'ISO 1100/2 (voir aussi figure 4).

10.3.2 Méthode dite d'auto-étalonnage

L'estimation de l'erreur limite, X_Q , sur la vitesse moyenne et donc sur le débit dans le cas de la méthode dite d'auto-étalonnage implique l'estimation des erreurs limites intervenant dans X_{V_L} comme exposé ci-dessus, X_d étant l'erreur limite sur la profondeur de l'écoulement, X_b l'erreur limite sur la largeur et X_p l'erreur limite due au nombre limité de trajectoires de vitesse employées (voir annexe C, exemple 4).

Alors

$$X_Q = \pm (X_{V_L}^2 + X_d^2 + X_b^2 + X_p^2)^{1/2} \quad \dots \quad (4)$$

10.4 Les seules erreurs limites systématiques que l'on ait besoin de considérer sont les erreurs limites des instruments de mesure sur la profondeur, sur la largeur et sur θ . Si l'on peut veiller à ce que celles-ci soient à moins de 0,1 % chacune, l'on peut les ignorer du fait qu'elles sont faibles si on les compare aux erreurs limites aléatoires. Autrement, il convient d'apporter des corrections (voir aussi 10.7).

10.5 Dans le cas d'un système à trajectoire unique, il faut tenir compte, en plus des erreurs limites énumérées ci-dessus sur X_Q , de l'erreur limite occasionnée par la variation du niveau (voir figure 6) et corriger le débit en conséquence (source d'erreur systématique) avant d'effectuer le calcul de l'erreur limite.

10.6 La valeur de C_V lue sur la courbe de la figure 6 aura également une erreur limite aléatoire que l'utilisateur doit évaluer pour chaque station. Cette évaluation peut s'effectuer en calculant l'écart type des valeurs de C_V pour les valeurs correspondantes de $\frac{d}{D}$ du tableau 3 (voir 8.2.8).

10.7 Le principe du système ultrasonique suppose que la vitesse d'écoulement est parallèle aux rives, c'est-à-dire perpendiculaire à la section droite. Comme il a été dit au chapitre 8, il existe toujours des variations intermittentes de faible importance autour de la valeur admise pour l'angle θ (angle formé par la trajectoire acoustique et la vitesse en ligne, V_L), mais il en est tenu compte lors de l'étalonnage. Toutefois, lorsqu'il se produit un écoulement oblique systématique et que θ varie de $\pm 1^\circ$ ou plus, il convient d'apporter une correction (erreur systématique) à la vitesse ou au débit tels qu'enregistrés par le système. Sur la figure 7, ϕ est l'écart angulaire résultant de l'obliquité de l'écoulement et le tableau 5 donne les facteurs de correction pour différentes valeurs de θ et ϕ . L'angle correct entre le sens de l'écoulement et la trajectoire est $\theta + \phi$. Le tableau 5 montre que lorsque ϕ est positif (comme indiqué sur la figure 7), la vitesse ultrasonique enregistrée (ou le débit) est trop faible et de même, lorsque ϕ est négatif, la vitesse ultrasonique enregistrée (ou le débit) est trop élevée (on trouvera dans l'annexe C des exemples d'évaluation des erreurs limites). Il convient de

noter que le terme « écoulement oblique », dans le présent contexte, vise un écoulement transversal au niveau de la ou des trajectoires de transducteurs de sorte que le système ultrasonique enregistre une vitesse qui est, soit trop élevée soit trop faible selon le sens de l'écoulement transversal. Un écoulement oblique dans une section horizontale quelconque du plan vertical peut être compensé par un écoulement oblique égal et opposé au niveau d'une autre section horizontale. Si l'on suspecte un écoulement oblique dans un système à trajectoire unique, on recommande pour commencer d'étudier l'angle θ . On peut le faire en établissant un système ultrasonique portable dans lequel les transducteurs sont placés à l'opposé l'un de l'autre de chaque côté de la rivière de sorte qu'il est possible d'obtenir une indication de vitesse nulle. L'angle véritable θ est alors l'angle formé par une perpendiculaire à cette ligne de zéro et la trajectoire de travail du transducteur. On peut aussi utiliser une méthode de trajectoires croisées pour estimer l'obliquité ϕ de l'écoulement. Pour cela, on prend une deuxième trajectoire transversalement à la trajectoire existante, dans une section différente mais à la même profondeur que celle-ci (voir figure 8). Si les aires des deux sections droites de l'écoulement sont égales, on peut alors déterminer l'angle ϕ d'après la différence éventuelle des vitesses mesurées le long des deux trajectoires. Si les aires des deux sections ne sont pas égales, il faut d'abord pondérer ces vitesses par un facteur d'aire avant de les comparer (voir annexe D). Lorsque les écoulements obliques varient avec le niveau et/ou le débit, il convient alors de fixer en permanence une trajectoire croisée et de tenir compte des données de cette trajectoire dans le calcul de la vitesse moyenne.

Il est préférable de ne pas installer de station ultrasonique là où se produisent des courants traversiers gênants. Toutefois, si l'on ne peut éviter d'installer une telle station, il faut utiliser un système à trajectoires multiples afin que les courants secondaires aux différents niveaux puissent être pris en compte.

10.8 D'une manière générale, l'erreur limite sur une seule détermination du débit lorsqu'on utilise la méthode ultrasonique avec trajectoire unique devrait être de l'ordre de $\pm 5\%$ à $\pm 10\%$. L'erreur limite sur une seule détermination de débit avec le système à trajectoires multiples devrait d'une manière générale être meilleure que $\pm 5\%$. Toutefois, les erreurs limites afférentes à la méthode ultrasonique, comme d'ailleurs aux autres méthodes, dépendent des caractéristiques de l'emplacement et l'erreur limite finale, pour une station donnée, peut être supérieure ou inférieure aux valeurs citées ci-dessus. On trouvera dans l'annexe C des exemples de calcul des erreurs limites lorsqu'on utilise la méthode ultrasonique.

Annexe A

Fréquence et hauteur libre en fonction de la longueur de trajectoire

Tableau 1 – Valeurs de la longueur de trajectoire, de la hauteur libre minimale et de la fréquence de fonctionnement

Longueur de trajectoire minimale typique, L	Hauteur libre minimale typique, h	Fréquence de fonctionnement pour une erreur limite de $\pm 0,015$ m/s
m	m	kHz
300	3 à 5	50 à 100
150	2 à 3	100 à 200
80	1	200 à 300
30	0,3	300 à 500
10	0,15	500 à 1 000
3	0,1	1 000 à 2 000

NOTES

- 1 La valeur minimale de la hauteur libre h (distance verticale entre la trajectoire et le fond ou la surface) provient de ce qu'un signal ayant subi plusieurs réflexions doit parvenir au transducteur avec un retard d'au moins une longueur d'onde par rapport au signal direct.
- 2 Si le système de détection est conçu pour des signaux réfléchis arrivant avec un retard d'une demi longueur d'onde par rapport au signal direct, il est possible de réduire quelque peu les hauteurs libres minimales indiquées ci-dessus.

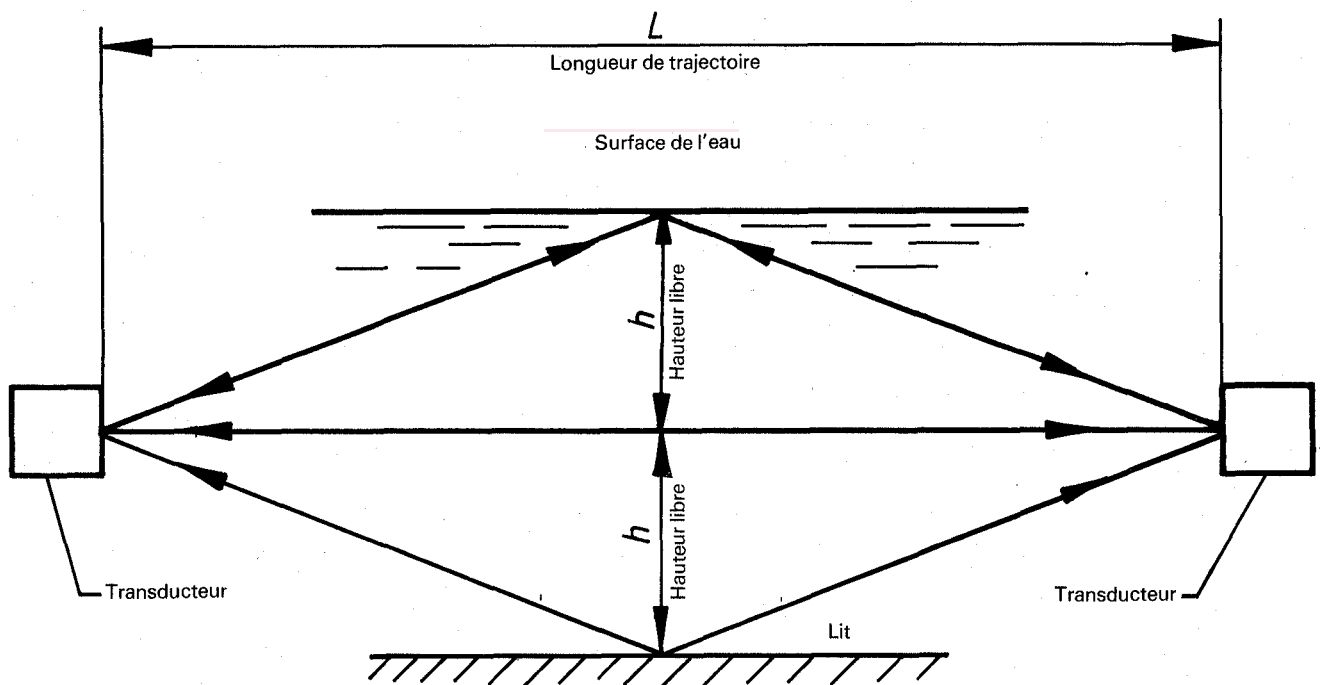


Figure 1 – Interférence des signaux à partir de la surface et du lit