
**Hydrométrie — Mesure du débit
par la méthode du temps de transit
ultrasonique (temps de vol)**

*Hydrometry — Measurement of discharge by the ultrasonic transit
time (time of flight) method*

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai



Sample Document

get full document from standards.iteh.ai



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2017, Publié en Suisse

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Ch. de Blandonnet 8 • CP 401
CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland
Tel. +41 22 749 01 11
Fax +41 22 749 09 47
copyright@iso.org
www.iso.org

Sommaire

Page

Avant-propos	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Applications	1
4.1 Types d'applications	1
4.2 Avantages et inconvénients	2
5 Méthode de mesure	2
5.1 Débit	2
5.2 Calcul du débit par mesurage du temps de transit	3
6 Détermination de la vitesse d'écoulement par la méthode ultrasonique (temps de transit)	3
6.1 Principe	3
6.2 Propagation du son dans l'eau	6
6.2.1 Généralités	6
6.2.2 Vitesse du son dans l'eau	6
6.2.3 Pertes de propagation	7
6.2.4 Courbure de la corde	8
6.2.5 Réflexion	9
7 Configuration du système de mesure	10
7.1 Généralités	10
7.2 Systèmes à corde unique	10
7.3 Systèmes à cordes multiples	11
7.4 Systèmes à cordes croisées	11
7.5 Systèmes à cordes réfléchies	13
7.6 Systèmes à transpondeurs	14
7.7 Systèmes sans fil (en cas d'impossibilité de traversée par câbles)	15
7.8 Systèmes utilisant des sections de mesure divisées	16
7.9 Cordes inclinées	17
8 Détermination du débit	17
8.1 Systèmes à corde unique	17
8.2 Systèmes à cordes multiples	19
8.2.1 Généralités	19
8.2.2 Méthode de la section médiane	20
8.2.3 Méthode de la section moyenne	21
8.3 Systèmes avec transducteurs dans le canal	22
9 Vérification et étalonnage du système	23
10 Sélection du site	24
11 Étude du site — Avant la conception et la construction	25
11.1 Généralités	25
11.2 Étude visuelle	25
11.3 Étude de la section mouillée	25
11.4 Étude de la répartition de vitesse	25
11.5 Étude de la propagation du signal	26
12 Exigences relatives au mesurage opérationnel	26
12.1 Généralités	26
12.2 Principales composantes de la détermination du débit	26
12.3 Détermination de la vitesse de l'eau	26
12.4 Détermination de la hauteur ou profondeur d'eau	27
12.5 Détermination du niveau moyen du lit	27

12.6	Largeur du canal.....	28
13	Équipement de la station de jaugeage.....	29
13.1	Généralités.....	29
13.2	Conception et construction de l'équipement.....	29
13.2.1	Transducteurs.....	29
13.2.2	Câbles de transducteurs.....	30
13.3	Réflecteurs.....	31
13.4	Ouvrages de génie civil.....	33
13.5	Synchronisation et traitement des signaux.....	33
13.5.1	Généralités.....	33
13.5.2	Rapport signal/bruit.....	34
13.5.3	Maintien du signal (commande automatique de gain).....	34
13.5.4	Détection du signal.....	35
13.5.5	Filtrage post-détection.....	36
13.6	Contrôle automatique du système.....	36
13.7	Données spécifiques au site (ou paramètres du site).....	37
13.8	Horloge et calendrier.....	37
13.9	Critères de performance du système.....	37
13.9.1	Généralités.....	37
13.9.2	Environnement de fonctionnement.....	37
13.9.3	Environnement hydrique.....	38
13.9.4	Environnement mécanique.....	38
13.9.5	Conditions environnementales extrêmes.....	38
13.9.6	Alimentation électrique.....	38
13.9.7	Incertitude de mesure.....	38
13.10	Sortie du système.....	39
13.10.1	Affichage local.....	39
13.10.2	Enregistrement local.....	39
13.10.3	Enregistrement à distance.....	39
13.10.4	Informations de diagnostic.....	39
13.11	Installation.....	39
13.12	Mise en service.....	40
13.13	Manuel d'utilisation.....	41
13.14	Maintenance.....	41
14	Incertitudes de mesure.....	42
14.1	Généralités.....	42
14.2	Définition de l'incertitude.....	43
14.3	Incertitude relative au débit.....	43
14.3.1	Équation d'incertitude.....	43
14.3.2	Nombre de cordes effectives.....	44
14.3.3	Incertitude relative à la vitesse de ligne, U_{lv}	44
14.3.4	Incertitude d'estimation de la largeur du canal, U_w	45
14.3.5	Exemples d'estimation de l'incertitude.....	45
14.3.6	Estimation de l'incertitude à faible débit.....	47
14.3.7	Estimation de l'incertitude à débit élevé.....	48
Annexe A (informative) Principe de l'incertitude de mesure.....		50
Annexe B (informative) Guide de performance applicable à l'équipement hydrométrique utilisable dans les normes techniques.....		58
Bibliographie.....		61

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 en général 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. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir <http://www.iso.org/directives>).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: www.iso.org/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 113, *Hydrométrie*, sous-comité SC 1, *Méthode d'exploration du champ des vitesses*.

Cette quatrième édition annule et remplace la troisième édition (ISO 6416:2004), qui a fait l'objet d'une révision technique. Les principales modifications apportées à la version précédente sont les suivantes:

- modification du titre;
- ajout d'un nouveau [paragraphe \(7.7\)](#) sur les systèmes sans fil;
- suppression des anciens paragraphes 9.2 et 11.6;
- révision de [l'Article 10](#) sur le choix du site;
- ajout de [l'Annexe A](#) (*Principe de l'incertitude de mesure*) et de [l'Annexe B](#) (*Guide de performance applicable à l'équipement hydrométrique utilisable dans les normes techniques*).

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

Hydrométrie — Mesure du débit par la méthode du temps de transit ultrasonique (temps de vol)

1 Domaine d'application

Le présent document décrit l'installation et le fonctionnement d'une station de jaugeage ultrasonique (temps de transit) conçue pour mesurer en continu le débit dans une rivière, un canal découvert ou une conduite fermée. Il décrit également les principes de base sur lesquels reposent la méthode, le fonctionnement et la performance des appareils associés et les modes opératoires de mise en service.

Il est limité à la technique du «temps de transit des impulsions ultrasonores» et n'est pas applicable aux systèmes basés sur les techniques utilisant «l'effet Doppler», «la corrélation d'échos» ou «les relations hauteur/débit».

Le présent document n'est pas applicable au mesurage en rivières en présence de glace.

NOTE Le présent document est axé sur le mesurage du débit dans les canaux découverts. L'IEC 60041 couvre l'utilisation de la technique de mesure du débit dans les conduites en charge.

2 Références normatives

Les documents suivants sont référencés dans le texte de sorte qu'une partie ou la totalité de leur contenu constitue les exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 772, *Hydrométrie — Vocabulaire et symboles*

ISO 4373, *Hydrométrie — Appareils de mesure du niveau de l'eau*

ISO/TS 25377, *Lignes directrices relatives à l'incertitude en hydrométrie (HUG)*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 772 s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online Browsing Platform (OBP): disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>

4 Applications

4.1 Types d'applications

- a) Canaux découverts
- b) Canaux multiples
- c) Conduites fermées

La présente méthode ne requiert aucun contrôle artificiel ou naturel car elle ne repose pas sur l'établissement d'une relation unique entre le niveau d'eau et le débit.

4.2 Avantages et inconvénients

Les avantages et les inconvénients suivants doivent être pris en compte lors du déploiement de ce système de mesure.

Avantages	
1.	Potentiel de haute exactitude
2.	Tolérance vis-à-vis des effets de remous
3.	Capacité de mesure dans des canaux multiples et de combinaison des résultats pour donner le débit total
4.	Capacité de détermination des vitesses moyennes à différentes hauteurs dans la colonne d'eau
5.	Faible impact visuel
6.	Sans danger pour les poissons
7.	Alimentation électrique sur secteur facultative
8.	Possibilité d'utiliser des systèmes à sécurité intrinsèque dans des atmosphères explosives
9.	Absence d'obstruction ou de perte de hauteur d'eau
10.	En adéquation avec une vaste gamme de largeurs et profondeurs de canaux
11.	Possibilité d'avoir un système de mesure redondant
12.	Coûts de fonctionnement relativement faibles

Inconvénients	
1.	Nécessité d'éviter tout site à section mouillée instable, si possible
2.	Exigence d'une profondeur d'eau minimale pour fonctionner
3.	Nécessité éventuelle de câbles reliant les deux côtés du canal
4.	Dysfonctionnement des capteurs lié à des détritits flottants
5.	Atténuation potentielle du signal sonore par
	les matières solides en suspension
	la végétation aquatique
	les bulles d'air
	les gradients de température
	les gradients de salinité

Le présent document donne des explications détaillées de ces avantages et inconvénients.

5 Méthode de mesure

5.1 Débit

5.1.1 Le débit, tel que défini dans l'ISO 772, est le volume de liquide traversant une section mouillée par unité de temps. Il est généralement désigné par le symbole Q et exprimé en mètres cubes par

seconde ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La définition du débit est le produit de la section mouillée et de la vitesse moyenne perpendiculaire à cette section.

Ainsi:

$$Q = \bar{v} \times A \quad (1)$$

où

Q est le débit, exprimé en mètres cubes par seconde ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

$\bar{v}$ est la vitesse moyenne, exprimée en mètres par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

A est la section mouillée, exprimée en mètres carrés (m^2).

La méthode du temps de transit est une méthode d'exploration du champ des vitesses utilisant les vitesses d'écoulement qui ont été déterminées par l'équipement et dont la moyenne est calculée sur une ou plusieurs lignes qui sont habituellement, mais pas nécessairement, horizontales.

5.2 Calcul du débit par mesurage du temps de transit

5.2.1 Le débit peut être calculé en utilisant la méthode d'exploration du champ des vitesses (voir en 5.1), à condition qu'une relation puisse être établie entre les vitesses déterminées par le système ultrasonique à temps de transit et la vitesse moyenne de la section mouillée. Si des trajectoires opérationnelles (cordes) assez nombreuses sont suffisamment réparties sur la verticale pour définir le profil de vitesse, une moyenne pondérée des vitesses d'écoulement échantillonnées obtenues peut être intégrée pour donner une estimation de la vitesse moyenne dans la section mouillée. En revanche, si les cordes ne sont pas assez nombreuses, une relation entre la vitesse mesurée (indice de vitesse) et la vitesse moyenne peut être établie à l'aide d'une technique de jaugeage point par point, par exemple avec un courantomètre hydrométrique à élément rotatif ou un profileur de courant acoustique à effet Doppler (ADCP).

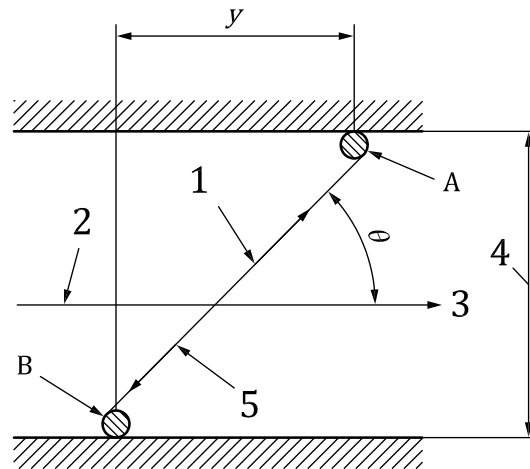
5.2.2 Il est également nécessaire de connaître l'aire de la section mouillée de l'eau pour calculer le débit. Un système ultrasonique à temps de transit sera donc normalement capable non seulement de mesurer la vitesse de façon échantillonnée mais également de déterminer (ou d'accepter un signal d'un autre dispositif de détermination) la profondeur d'eau ainsi que d'enregistrer les informations sur la relation entre la profondeur d'eau et l'aire de la section mouillée. Il sera également capable d'exécuter les fonctions mathématiques nécessaires pour calculer le débit à partir des données enregistrées et déterminées directement.

6 Détermination de la vitesse d'écoulement par la méthode ultrasonique (temps de transit)

6.1 Principe

6.1.1 Une impulsion ultrasonore se propage dans un écoulement d'eau plus rapidement dans une direction aval que dans une direction amont. La vitesse d'une impulsion sonore dirigée vers l'aval de l'écoulement en diagonale sera augmentée par la composante de la vitesse de l'eau. À l'inverse, la vitesse d'une impulsion sonore dans la direction opposée sera réduite. La différence de temps de transit dans les

deux directions peut être utilisée pour calculer la vitesse du son dans l'eau ainsi que la composante de la vitesse sur la corde suivie par les impulsions ultrasonores.



Légende

- 1 composante v_{corde} de la vitesse de l'eau sur la corde
- 2 composante v_{moyenne} de la vitesse de l'eau dans la direction de l'écoulement
- 3 direction d'écoulement
- 4 largeur du canal
- 5 longueur de corde (L)
- A, B transducteurs
- θ angle entre la corde et la direction d'écoulement
- y distance entre les transducteurs

Figure 1 — Illustration schématique du principe général

6.1.2 Pour la corde entre les transducteurs A et B à la [Figure 1](#), les temps de transit des impulsions ultrasonores sont:

$$t_{AB} = L / (c - v \cos \theta) \text{ et } t_{BA} = L / (c + v \cos \theta) \quad (2)$$

où

t_{AB} est le temps de transit entre les transducteurs A et B, en secondes;

t_{BA} est le temps de transit entre les transducteurs B et A, en secondes;

L est la longueur de corde (distance entre le transducteur A et le transducteur B), en mètres (m);

c est la vitesse du son dans l'eau, en mètres par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

θ est l'angle entre la corde et la direction d'écoulement.

Calcul de la vitesse moyenne:

$$v_{\text{moyenne}} = L \times (t_{AB} - t_{BA}) / (t_{AB} \times t_{BA} \times 2 \cos \theta) \quad (3)$$

où, v_{moyenne} est la vitesse moyenne de l'eau dans le canal dans la direction d'écoulement, en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6.1.3 Le calcul de la vitesse de l'eau est

- indépendant de la vitesse du son dans l'eau,
- proportionnel à la différence des temps de transit,
- inversement proportionnel au produit des temps de transit,
- fortement dépendant de l'angle entre la corde et la direction d'écoulement (voir le [Tableau 1](#)).

Tableau 1 — Erreurs systématiques obtenues si la direction d'écoulement présumée n'est pas parallèle à l'axe du canal

Angle de corde, θ	Erreur de vitesse pour 1° de différence entre les directions d'écoulement réelle et présumée
degrés	%
30	1,0
45	1,7
60	3,0

6.1.4 Lors du mesurage du débit dans les canaux découverts, les considérations d'ordre pratique prévoient normalement que:

- a) les transducteurs à chaque extrémité d'une corde sont situés sur les berges opposées du cours d'eau;
- b) afin de réduire au maximum les incertitudes, la ligne qui les réunit forme un angle par rapport à la direction moyenne d'écoulement compris entre 30° et 65°.

6.1.5 Les inconvénients suivants sont rencontrés lors du mesurage du débit dans les canaux découverts.

- a) Pour des angles d'intersection de plus de 65°, la différence de temps entre les impulsions sonores dans les directions opposées peut être faible et être donc sujette à une incertitude relativement élevée, notamment à de faibles vitesses.
- b) Pour un angle de 90°, il n'y aura pas de différence de temps entre les impulsions avant et arrière, et ainsi la vitesse ne peut pas être déterminée.
- c) Avec des angles larges, il y a également une augmentation de l'erreur de calcul de la vitesse due aux hypothèses formulées lors de l'évaluation de l'angle. Le [Tableau 1](#) démontre cet effet.
- d) Pour des angles d'intersection de moins de 30°, les problèmes suivants peuvent se produire.
 - 1) La longueur du canal occupée par le système de mesure peut devenir excessive et ne plus être quasi-uniforme.
 - 2) Il se peut que la direction d'écoulement par rapport à la corde ne soit pas constante.
 - 3) Il peut se produire des problèmes d'ordre pratique avec le choix du site, en raison de la longueur du canal qu'il est nécessaire de réserver pour le système de mesure du débit et de maintenir exempt de débris et de végétation aquatique.
 - 4) La longueur excessive des cordes peut engendrer des problèmes d'intensité du signal et/ou de réflexion du signal depuis le lit du canal ou la surface de l'eau, notamment en cas de gradients de température verticaux.

6.2 Propagation du son dans l'eau

6.2.1 Généralités

Le son est une perturbation mécanique du milieu dans lequel il se propage. Il englobe une vaste gamme de fréquences. La gamme audible s'étend d'environ 20 Hz à 20 000 Hz et est généralement appelée «sonore». Les fréquences inférieures à 50 Hz sont habituellement dites «sub-sonores» et celles supérieures à 15 000 Hz «ultrasonores». Les systèmes à temps de transit fonctionnent dans la gamme ultrasonore à des fréquences généralement comprises entre 100 kHz et 1,5 MHz.

La performance des systèmes à temps de transit dépend fortement des caractéristiques de propagation du son dans l'eau. Ces caractéristiques sont brièvement décrites ici.

6.2.2 Vitesse du son dans l'eau

La vitesse du son dans l'eau ne dépend pas de la fréquence mais de la température, de la salinité et de la pression de l'eau. Dans les canaux découverts, l'effet de la pression est négligeable. Sur la gamme de température ambiante normale, la vitesse du son dans l'eau douce varie entre environ 1 400 m·s⁻¹ et un peu plus de 1 500 m·s⁻¹ (voir le [Tableau 2](#)). Celle-ci variera en fonction des caractéristiques de l'eau. Cependant, ces chiffres sont donnés comme valeurs de référence d'après une étude de la littérature disponible.

Tableau 2 — Vitesse du son dans l'eau douce à différentes températures

Température °C	Vitesse du son (approximation) m·s ⁻¹
0	1 402
10	1 447
20	1 482
30	1 509
40	1 529
NOTE 1 Les chiffres ci-dessus s'appliquent à l'eau de la plupart des rivières naturelles et réseaux d'eaux usées.	
NOTE 2 Dans l'eau de mer, les vitesses correspondantes sont d'environ 50 m·s ⁻¹ de plus.	

La vitesse du son c dans l'eau est calculée d'après l'équation suivante:

$$c = 1\,402,4 + 5,01T - 0,055\,1\,T^2 + 0,000\,22\,T^3 + 1,33S + 0,000\,13S^2 - 0,013\,TS + 0,000\,1\,T^2S + 0,016d \quad (4)$$

où

c est la vitesse du son dans l'eau, en mètres par seconde (m·s⁻¹);

T est la température de l'eau, en degrés Celsius;

S est la salinité de l'eau, en grammes de sel par litre d'eau;

d est la profondeur d'eau, en mètres (m).

6.2.3 Pertes de propagation

6.2.3.1 Transmission du son dans l'eau

6.2.3.1.1 Seule une partie de l'énergie acoustique transmise atteint la cible. Le reste est perdu pour plusieurs raisons. La perte d'intensité du signal est appelée «perte de propagation», laquelle comprend la *perte de dispersion* (6.2.3.1.2) et la *perte d'atténuation* (6.2.3.1.3).

6.2.3.1.2 La *perte de dispersion* est la réduction d'intensité acoustique due à l'augmentation de la surface sur laquelle l'énergie acoustique donnée est répartie. Les pertes dues à cet effet dépendent des facteurs suivants:

- longueur de corde;
- diamètre du transducteur ultrasonique;
- fréquence caractéristique.

6.2.3.1.3 La *perte d'atténuation* est la réduction d'intensité acoustique causée par la résistance du milieu à la transmission d'énergie acoustique. Elle est similaire à la perte d'énergie électrique dans un fil électrique dans lequel il n'y a pas de perte de dispersion.

La perte d'atténuation est attribuable à la *diffusion* et à l'*absorption*.

- La *diffusion* est la redirection dans toutes les directions de l'énergie de l'onde acoustique incidente par les matières en suspension dans l'eau, par exemple les bulles d'air et les matières solides en suspension. L'effet est plus important lorsque les fréquences du transducteur sont élevées.
- L'*absorption* est le processus par lequel l'énergie acoustique est convertie en énergie thermique par le frottement dans l'eau, lorsqu'elle est soumise à des compressions et des dilatations répétées par une onde sonore qui passe. Cet effet dépend également de la fréquence.

Les pertes dues à l'absorption et à la diffusion augmentent de manière exponentielle à mesure que la longueur de corde s'accroît. Cela signifie que, si les matières solides en suspension dans les eaux usées provoquaient une perte de moitié de l'énergie du signal lors de la propagation du signal dans un mètre d'eau, alors ce signal serait à nouveau réduit de moitié après avoir traversé un mètre d'eau supplémentaire. Pour une longueur de corde de 20 m, le signal serait réduit à un millionième de la valeur prévue pour l'eau propre.

Pour une longueur de corde de 5 m dans un réseau d'eaux usées, une réduction du signal d'un facteur 30 (un facteur d'environ 5,5 pour une tension électrique) serait acceptable. Pour une longueur de corde de 20 m, il serait peu probable d'observer un quelconque signal.

Pour ces raisons, des transducteurs de fréquence peu élevée sont utilisés pour les cordes plus longues. La gamme de valeurs de fréquence, f , des transducteurs pour une longueur de corde, L , donnée est illustrée à la [Figure 2](#).

6.2.3.2 Réverbération

La réverbération est l'énergie renvoyée par des réflecteurs autres que les transducteurs. Cet effet est similaire à l'effet qui réduit l'efficacité des phares de voitures la nuit par temps de brouillard.

6.2.3.3 Réfraction

Il s'agit de la courbure de la corde d'impulsion acoustique si la température ou la densité de l'eau varie significativement. Par exemple dans les rivières à faible courant et à mélange vertical insuffisant, l'effet du soleil sur la surface peut produire un gradient de température vertical.

6.2.3.4 Réflexion

Le son peut être réfléchi depuis la surface de l'eau et/ou le lit de la rivière, ce qui peut provoquer des erreurs de synchronisation du signal.

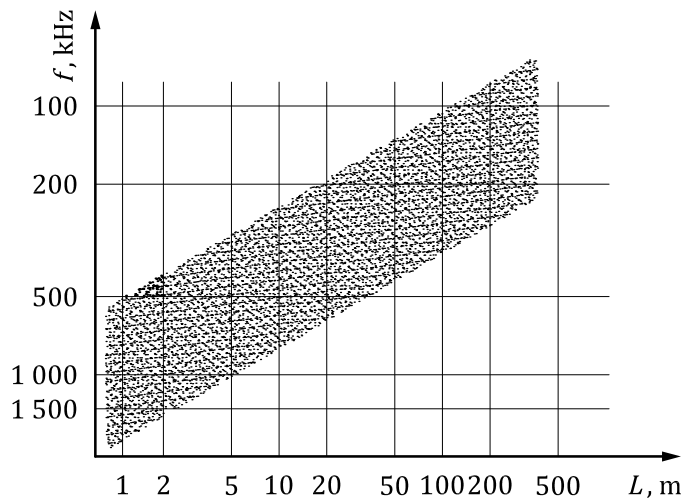


Figure 2 — Fréquences de transducteur couramment utilisées pour différentes longueurs de corde

6.2.4 Courbure de la corde

6.2.4.1 La trajectoire suivie par une impulsion acoustique est courbe (réfraction) si la température ou la salinité de l'eau à travers laquelle il se propage varie significativement. Dans les rivières à faible courant et à mélange vertical insuffisant, l'effet du soleil sur la surface produit un vecteur de gradient de température dirigé vers le haut. Cela fait que la vitesse du son est plus grande près de la surface et, par conséquent, le chemin acoustique est alors courbe en direction du lit de la rivière.

L'onde acoustique se propage le long du canal sous la forme d'un cône. Si le gradient de température est vertical, comme décrit ci-dessus, seul le rayon qui démarre dans une certaine direction vers le haut atteindra l'autre extrémité de la corde. Avec un gradient de température de 0,5 °C par mètre de profondeur, sur une longueur de trajet horizontale de 50 m, l'écart vertical D_r (tel que défini à la [Figure 3](#)) sera d'environ 0,5 m. En revanche, les gradients de densité verticaux (qui peuvent être associés à l'entrée d'eau de mer dans le tronçon jaugé) ont pour effet de créer une vitesse de son plus élevée près du fond et donc de courber la corde vers la surface.

Des effets similaires peuvent être produits par des gradients de température ou de densité horizontaux, comme c'est le cas avec l'ombrage partiel de la surface de l'eau, ou ce qui peut être observé à la confluence de tributaires ayant des caractéristiques contrastées.

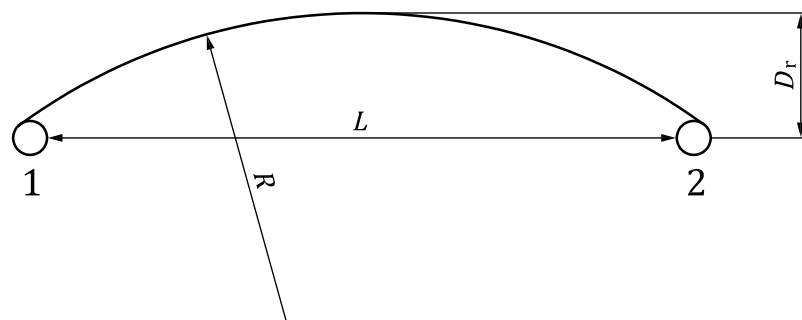
6.2.4.2 Le degré approximatif de courbure de la corde est donné par:

$$R = c_1 (d_2 - d_1) / (c_1 - c_2) \quad (5)$$

où

R est le rayon de courbure de la corde des impulsions ultrasonores, en mètres (m) (voir la [Figure 3](#));

c_1, c_2 sont les vitesses du son aux profondeurs d_1 et d_2 respectivement, en mètres par seconde ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). [Ces vitesses peuvent être calculées d'après la [Formule \(4\)](#).]



Légende

- 1 transducteur
- 2 transducteur
- D_r écart du chemin acoustique
- L longueur de corde
- R rayon de courbure de la trajectoire des impulsions ultrasonores

Figure 3 — Courbure du signal résultant d'un gradient de température vertical

L'écart, D_r , du chemin acoustique par rapport à une ligne droite est donné par:

$$D_r = R - \sqrt{R^2 - 0,25L^2} \quad (6)$$

où L est la longueur de corde, en mètres.

6.2.5 Réflexion

6.2.5.1 Le son est dispersé de la surface de l'eau et, dans une moindre mesure, par le lit du canal. Ceci est dû au fait que le contraste de l'impédance acoustique est beaucoup plus élevé entre l'eau et l'air qu'entre l'eau et le fond (sable, roche, boue).

Des erreurs de synchronisation du signal se produiront si le signal secondaire interfère avec le premier cycle du signal direct. Pour éviter cet effet, la différence entre les deux cordes doit dépasser une longueur d'onde acoustique (vitesse du son/fréquence). Celle-ci sera atteinte si la profondeur de l'eau au-dessus de la corde dépasse celle donnée par la [Formule \(7\)](#):

$$d_{\min} = 27 \sqrt{\frac{L}{f}} \quad (7)$$

où

$d_{\min}$ est la hauteur d'eau minimale requise entre la corde de vitesse et la surface de l'eau, et également la hauteur minimale entre le lit et la corde, en mètres;

L est la longueur de corde, en mètres;

f est la fréquence du transducteur, en Hz.

6.2.5.2 La hauteur d'eau minimale requise au-dessus et en dessous de la corde pour les différentes fréquences de transducteur et longueurs de corde est donnée dans le [Tableau 3](#) (colonne 3).

La profondeur d'eau totale minimale est donnée dans le [Tableau 3](#) (colonne 4). La valeur de $d_{\min}$ est le double de la hauteur minimale pour le capteur en dessous de la surface de l'eau libre.