

NORME  
INTERNATIONALE

ISO  
6416

Deuxième édition  
1992-09-15

---

---

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

iTeh STANDARD PREVIEW

*Measurement of liquid flow in open channels — Measurement of  
discharge by the ultrasonic (acoustic) method*

ISO 6416:1992

<https://standards.itih.ai/catalog/standards/sist/4c40ad6f-9e7b-45c0-a42c-1f34a03175e9/iso-6416-1992>



Numéro de référence  
ISO 6416:1992(F)

**Sommaire**

	Page
<b>Section 1 Généralités</b> .....	<b>1</b>
1.1 Domaine d'application .....	1
1.2 Références normatives .....	1
1.3 Définitions .....	1
1.4 Unités de mesure .....	1
<b>Section 2 Méthode de mesurage</b> .....	<b>2</b>
2.1 Principe .....	2
2.2 Caractéristiques de propagation du son dans l'eau .....	3
2.3 Application .....	4
2.4 Configuration du système de jaugeage .....	5
2.5 Choix de l'emplacement .....	8
2.6 Étude du site .....	10
2.7 Caractéristiques des mesurages opérationnels .....	11
2.8 Caractéristiques de calcul .....	12
2.9 Concept de redondance des mesurages .....	16
2.10 Étalonnage du système .....	16
2.11 Incertitudes de mesurage .....	17
<b>Section 3 Station de jaugeage</b> .....	<b>22</b>
3.1 Généralités .....	22
3.2 Conception et construction des matériels .....	22
3.3 Sortie du système .....	27
3.4 Installation .....	27
3.5 Mise en service .....	27
3.6 Manuel de fonctionnement .....	28
3.7 Entretien et maintenance .....	28

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO 6416:1992  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4c40ad66-9e7b-45c0-a42c-1f34a03175e9/iso-6416-1992>

**Annexe**

<b>A</b>	Détermination du sens de l'écoulement à partir des données découlant de trajectoires croisées .....	<b>30</b>
----------	--	-----------

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

ISO 6416:1992

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4c40ad6f-9e7b-45c0-a42c-1f34a03175e9/iso-6416-1992>

## 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 (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert 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*, sous-comité SC 1, *Méthodes d'exploration du champ des vitesses*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 6416:1985 et ISO 6418:1985), dont elle constitue une révision majeure, et une combinaison.

L'annexe A fait partie intégrante de la présente Norme internationale.

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

## Section 1: Généralités

### 1.1 Domaine d'application

La présente Norme internationale décrit comment est créée et exploitée une station de jaugeage par ultrasons (émission acoustique) pour mesurer le débit dans les rivières, les canaux découverts ou dans les conduites fermées à surface d'écoulement libre. Elle décrit également les principes de base de la méthode, le fonctionnement et les caractéristiques des appareils associés. Elle se limite à la technique dite du « temps de vol », c'est-à-dire du temps de passage des impulsions acoustiques, et ne s'applique pas aux systèmes faisant appel aux techniques de l'effet Doppler ou du niveau d'écoulement.

### 1.2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 748:1979, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Méthodes d'exploration du champ des vitesses.*

ISO 772:1988, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Vocabulaire et symboles.*

ISO 1100-2:1982, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Partie 2: Détermination de la relation hauteur-débit.*

ISO 4373:1979, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Appareils de mesure du niveau de l'eau.*

ISO 5168:1978, *Mesure de débit des fluides — Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit.*

### 1.3 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions données dans l'ISO 772 s'appliquent.

### 1.4 Unités de mesure

Les unités de mesure utilisées dans la présente Norme internationale sont les unités du Système International (SI).

## Section 2: Méthode de mesurage

### 2.1 Principe

**2.1.1** Une impulsion acoustique transmise dans de l'eau en mouvement, dans une direction autre que perpendiculaire au sens moyen du mouvement, aura un temps de parcours sur une distance donnée différent de celui qu'elle aurait dans une eau stationnaire à même température et à mêmes caractéristiques de salinité, de concentration en sédiments et de profondeur. Si l'impulsion acoustique est transmise dans le sens d'écoulement de l'eau, elle mettra moins de temps pour parcourir la distance en question qu'en eau stationnaire; si elle est transmise dans le sens contraire au sens d'écoulement de l'eau, le temps de parcours sera plus long.

**2.1.2** Si l'on compare le temps mis par une impulsion acoustique pour parcourir une distance mesurée entre deux points de référence dans un sens donné, avec le temps mis pour parcourir la même distance dans le sens opposé, on peut constater que la différence observée est dans un rapport direct avec la vitesse moyenne de l'élément de courant dans la «trajectoire» délimitée par les deux points de référence. C'est ce qu'on appellera la «vitesse sur trajectoire».

**2.1.3** Ce principe, allié à une instrumentation appropriée, permet de mesurer avec exactitude la vitesse moyenne de l'élément du corps liquide constitué par le segment de droite reliant les deux points de référence. Cette méthode d'échantillonnage des vitesses d'écoulement donne davantage d'informations sur l'ensemble de l'écoulement qu'une mesure ponctuelle, mais elle est, toutefois, encore loin d'être entièrement représentative du débit total.

**2.1.4** Néanmoins, de même que l'intégration de plusieurs échantillons ponctuels des vitesses d'écoulement donne une estimation de la vitesse moyenne dans une section, une transformation mathématique des mesurages de vitesse sur trajectoire peut remplir le même objectif. Le rapport entre la vitesse de parcours sur trajectoire et la vitesse le long d'une ligne d'écoulement (appelée «vitesse en ligne») s'exprime par l'équation suivante:

$$v_{\text{ligne}} = \frac{v_{\text{trajectoire}}}{\cos \phi}$$

où  $\phi$  est l'angle entre la trajectoire et le sens d'écoulement (voir figure 1).

**2.1.5** Pour mesurer le débit dans un chenal découvert, il convient d'observer un certain nombre de considérations pratiques:

- les points de référence à chaque extrémité de la «trajectoire de vol» doivent être situés sur les berges opposées du cours d'eau;
- la droite qui joint ces points de référence doit couper la ligne représentant le sens moyen d'écoulement selon un angle connu, compris normalement entre 30° et 60°.

Lorsque l'angle d'intersection est supérieur à 60°, la différence des temps relevés pour des impulsions acoustiques voyageant en sens opposé devient excessivement petite et difficile à mesurer. Ce problème peut ne pas être grave quand les vitesses mesurées sont élevées, mais peut soulever des difficultés quand elles sont faibles (quand les différences de temps entre les impulsions aller et retour sont elles-mêmes faibles).

À 90°, il n'y a aucune différence entre le temps de parcours des impulsions aller et retour.

Un grand angle entraîne également une augmentation de l'erreur de calcul des vitesses, en raison des erreurs découlant du mesurage de cet angle lui-même. Ce phénomène est dû à la présence, dans l'équation rapportant la différence de temps à la vitesse, de la fonction cosinus (voir 2.8.1). Cet effet est décrit au tableau 1.

**Tableau 1 — Erreur systématique découlant du non-parallélisme du sens supposé de l'écoulement et de l'axe du canal**

Angle de trajectoire, $\phi$ degrés	Erreur sur la vitesse pour une différence de 1° entre le sens réel et le sens supposé de l'écoulement %
30	1
45	2
60	3

Lorsque l'angle d'intersection est inférieur à 30°, la longueur des «trajectoires de vol» résultantes peut devenir excessive et entraîner des problèmes d'intensité du signal ou de réflexion de celui-ci sur le lit du chenal ou la surface de l'eau. Cela peut aussi poser des problèmes de choix du site dans la mesure où la longueur de rivière ou de bief occupée par l'appareil peut devenir excessive et cesser d'être quasi uniforme.

**2.1.6** Pour pouvoir calculer le débit, il faut non seulement disposer d'une estimation de la vitesse moyenne de l'eau dans la section de jaugeage, mais encore connaître l'aire de la section mouillée. Un système de détermination du débit fondé sur le principe des ultrasons devra donc être capable non seulement de faire des mesurages de la vitesse, mais aussi de déterminer (ou de recevoir le signal d'un autre système capable de déterminer) la profondeur de l'eau et de mettre en mémoire les données correspondant à la profondeur et à l'aide de la section mouillée. Il devra également être capable de résoudre les fonctions mathématiques nécessaires pour calculer le débit à partir des données mises en mémoire ou déterminées en direct.

## 2.2 Caractéristiques de propagation du son dans l'eau

### 2.2.1 Généralités

Le spectre acoustique englobe une large gamme de fréquences. La gamme des fréquences audibles se situe entre 50 Hz et 15 000 Hz environ; c'est ce qu'on appelle les «sons». Les fréquences inférieures à 50 Hz sont généralement qualifiées de «subsoniques»; quant aux fréquences supérieures à 15 000 Hz, elles constituent normalement les «ultrasons».

### 2.2.2 Vitesse du son dans l'eau

La vitesse du son dans l'eau douce varie d'environ 1 400 m/s à un peu plus de 1 500 m/s dans la plage des températures normales ambiantes, soit une variation d'environ 7 % (voir tableau 2). La vitesse du son est fonction de la masse volumique et de l'élasticité du milieu, mais est indépendante de la fréquence.

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

Température °C	Vitesse approximative du son m/s
0	1 400
10	1 450
20	1 485
30	1 510
40	1 530

NOTE — Ces vitesses sont supérieures dans l'eau contenant des sels dissous.

## 2.2.3 Transmission du son dans l'eau

### 2.2.3.1 Généralités

Seule une partie de l'énergie acoustique transmise parvient à la cible. Le reste se perd pour diverses raisons. Cette perte d'intensité du signal est appelée perte par propagation et se compose d'une perte par diffusion et d'une perte par atténuation.

### 2.2.3.2 Perte par diffusion

La perte par diffusion est la diminution de l'intensité acoustique due à l'élargissement de l'aire sur laquelle se répartit une énergie acoustique donnée. Les pertes correspondantes dépendent de la relation entre la longueur de la trajectoire, le diamètre du transducteur à ultrasons et sa fréquence caractéristique. La diffusion respecte la loi des carrés inverses qui s'applique en général à toutes les formes d'énergie rayonnante. Si, toutefois, les signaux sont mesurés sous forme de tensions, l'énergie étant alors proportionnelle au carré de la tension, la perte par diffusion suivra une loi inverse. Cet effet n'est observable que sur de faibles trajectoires. Au-delà de 20 m, d'autres phénomènes prédominent.

### 2.2.3.3 Perte par atténuation

La perte par atténuation est la diminution de l'intensité acoustique due à la résistance du milieu à la transmission de l'énergie acoustique. Ce phénomène est analogue aux pertes d'énergie électrique dans un fil électrique où ne se produit pas de diffusion. La perte par atténuation est directement proportionnelle au carré de la fréquence.

#### 2.2.3.3.1 Dispersion

La dispersion est la modification de la direction dans laquelle se propage l'énergie acoustique provoquée par les réflexions sur les innombrables hétérogénéités se trouvant dans l'eau, notamment les bulles d'air microscopiques et les particules de matière en suspension. Ces hétérogénéités provoquent des variations soudaines de l'impédance acoustique spécifique et donc une réflexion et une dispersion du signal. L'effet provoqué augmente avec la fréquence du transducteur.

#### 2.2.3.3.2 Absorption

L'absorption est un processus de transformation de l'énergie acoustique en chaleur par frottement des molécules de l'eau, cependant que l'onde sonore subit des compressions et des dilatations répétées du milieu. En général, cette perte est fonction du carré de la fréquence.



## 2.2.4 Réverbération

La réverbération est l'énergie renvoyée par des réflecteurs autres que ceux de la cible. La réverbération du son dans l'eau est un phénomène analogue à l'effet d'optique familier qui affecte l'efficacité des phares d'automobile par une nuit de brouillard.

## 2.2.5 Réfraction

La trajectoire suivie par une impulsion acoustique est déviée par une variation significative de température ou de masse volumique de l'eau dans laquelle l'impulsion se propage. Dans les rivières à cours lent et à faible mélange vertical, l'effet du soleil sur la surface peut engendrer un gradient de température vertical qui dévient la trajectoire acoustique vers le lit. Avec un gradient de température de 0,5 °C par mètre de profondeur sur une trajectoire de 50 m, la déflexion verticale sera d'environ 2 m. À l'inverse, les gradients verticaux de masse volumique (qui peuvent être causés par la pénétration d'eau salée dans le bief de jaugeage) auront pour effet de dévier la trajectoire vers la surface. Des effets similaires peuvent résulter des gradients horizontaux de température ou de masse volumique associés, par exemple, à une ombre partielle projetée sur une eau ensoleillée ou à l'apport d'eaux provenant d'affluents de caractéristiques très différentes.

## 2.2.6 Réflexion

Le son se réfléchit sur la surface de l'eau et, dans une moindre mesure, sur le lit du chenal (voir 2.5.2.3). Le lit peut même constituer un absorbeur net du son. L'onde acoustique se propageant en travers de la rivière (en général sous la forme d'un cône de 5° d'angle de sommet), va venir couper la surface de l'eau, se réfléchir et se déphaser de 180° au cours du processus. L'onde traversera la rivière et arrivera sur la berge opposée. Son arrivée sera captée par le transducteur cible après celle de l'onde directe et la différence entre les temps d'arrivée sera fonction de la différence des longueurs respectives des trajectoires directe et indirecte.

Des erreurs de temps d'enregistrement des signaux se produiront si le signal secondaire interfère avec le premier cycle du signal direct. Pour éviter cet effet, il faut que la différence des deux trajectoires soit supérieure à une longueur d'onde acoustique (vitesse du son/fréquence). Tel sera le cas si la hauteur d'eau au-dessous de la trajectoire acoustique est supérieure à la valeur donnée par l'équation suivante:

$$D_{\min} = 27 \sqrt{\frac{L}{f}}$$

où

$D_{\min}$  est la hauteur minimale, en mètres;

$L$  est la longueur de trajectoire, en mètres;

$f$  est la fréquence du transducteur, en hertz.

Une restriction similaire est applicable au lit du chenal, notamment s'il est lisse et réfléchit plutôt qu'il n'absorbe le signal acoustique.

## 2.3 Application

### 2.3.1 Généralités

Comme toutes les variantes de la méthode fondamentale d'exploration du champ des vitesses, la méthode ne convient que dans certains cas. Les inconvénients et les limites d'emploi de cette méthode sont indiqués en 2.5. Le présent article met l'accent sur les points positifs.

### 2.3.2 Chenaux découverts

**2.3.2.1** La méthode est bien adaptée à l'emploi pour les mesures générales de l'écoulement fluvial, son principal avantage par rapport à d'autres techniques étant la liberté du choix du site. Cette méthode ne demande pas en particulier l'existence d'une section de contrôle naturelle ou artificielle au niveau de la station de jaugeage puisqu'il n'y a pas besoin d'établir une relation univoque entre le débit d'eau et son niveau.

**2.3.2.2** Cette méthode donne une exactitude élevée dans la détermination du débit sur une large plage des régimes d'écoulement rencontrés dans une section de jaugeage définie. Les détails relatifs à l'incertitude de mesurage sont donnés en 2.11. Une détermination du débit avec une exactitude prévisible peut être obtenue dès la première mise en service.

**2.3.2.3** L'emploi de cette méthode ne crée aucune gêne pour la navigation ou pour le libre passage des poissons. Elle ne crée ni risque significatif ni perte de jouissance pour les riverains ou autres exploitants de la rivière. S'il est conçu avec soin, l'appareil de jaugeage ne doit causer aucune obstruction.

### 2.3.3 Effets de reflux

La méthode tolère généralement les reflux dus aux marées ou au débit des affluents, les variations du niveau d'eau dans les réservoirs ou les biefs, l'obstruction périodique du chenal ou la croissance de végétation à l'aval.



### 2.3.4 Chenaux multiples

Aux endroits où l'écoulement total se divise en deux ou plusieurs chenaux physiquement distincts, la technique permet d'utiliser des instruments déterminant le débit séparément dans chaque chenal puis de combiner ces données pour obtenir une détermination unique globale.

### 2.3.5 Mesurage du débit en plaine d'inondation

**2.3.5.1** Lorsque l'écoulement n'est pas facile à contenir dans une seule section bien définie et qu'en particulier, une partie significative contourne la section principale de jaugeage pour s'étaler en une plaine d'inondation, il est possible, par de petits travaux de génie civil très modestes, de subdiviser la plaine d'inondation, en une série de «chenaux» dont on peut mesurer séparément le débit.

**2.3.5.2** Le concepteur de la station peut choisir soit de mesurer de cette manière le débit de la plaine d'inondation, soit de procéder à un échantillonnage des débits ou des vitesses. Dans ce dernier cas, les sections de jaugeage construites dans la plaine d'inondation ne donneront pas une mesure totale mais constitueront des points de mesurage dont les relevés de débit serviront aux examens et analyses futurs.

### 2.3.6 Mesurage de débit dans les conduites fermées

La méthode ultrasonique est aussi utilisée pour le mesurage du débit dans les conduites fermées, y compris d'eaux pluviales ou d'égouts, en régime d'écoulement libre ou en charge. Il convient d'apporter un soin particulier à la conception des fixations des transducteurs qui ne doivent pas être souillés, mais qu'il soit inutile d'introduire un obstacle au libre écoulement dans l'égout peut présenter un avantage notable.

## 2.4 Configuration du système de jaugeage

### 2.4.1 Généralités

La méthode ultrasonique n'est que l'une des nombreuses méthodes permettant de mesurer la vitesse d'un cours d'eau, et donc de définir une mesure de base à partir de laquelle on peut calculer le débit. La technique d'échantillonnage de la vitesse peut combiner diverses stratégies permettant de s'adapter

— aux configurations locales au niveau du site,

- aux besoins de l'utilisateur en matière de précision ou de fiabilité, ou
- aux ressources dont dispose l'utilisateur pour maintenir les appareils en état opérationnel.

### 2.4.2 Systèmes à trajectoire unique

**2.4.2.1** Sous sa forme la plus élémentaire, le système de jaugeage peut fonctionner de façon tout à fait satisfaisante avec une seule paire de transducteurs donnant donc une détermination unique de la vitesse «en ligne». Dans la mesure où l'on peut définir une relation entre l'échantillon et la vitesse moyenne dans la section, on peut alors calculer le débit aussi facilement par ce moyen simple que par n'importe quelle méthode plus compliquée.

**2.4.2.2** La fixation des transducteurs doit permettre de les déplacer dans le plan vertical. Le système permet de déterminer le profil des vitesses verticales en utilisant le système de jaugeage d'une manière analogue à un mesurage à l'aide d'un moulinet à élément tournant. Dès qu'ils sont opérationnels, les transducteurs sont placés à une hauteur donnant une estimation aussi fidèle que possible de la vitesse moyenne dans la section. On peut alors calculer le débit simplement et adopter une forme relativement simple de conception de l'instrumentation.

**2.4.2.3** Le réglage des transducteurs peut aussi, en variante, être changé à chaque saison, pour tenir compte des différences de régime, mais il peut y avoir des limites pratiques à la fréquence des changements et donc des limites à l'utilité générale de cette configuration.

**2.4.2.4** Pour le système de jaugeage à trajectoire unique avec des transducteurs mobiles, il faut que le niveau de l'eau varie normalement peu à la station de jaugeage, ou pour le moins que les variations de niveau se fassent lentement. Des variations assez importantes peuvent être parfois absorbées si le phénomène est saisonnier, du type remontée d'eaux souterraines, quand le débit ne varie que lentement d'un jour à l'autre et que l'on peut observer deux régimes très différents: été et hiver. La lenteur de ces variations permet parfois de reprendre le réglage des transducteurs sur une base saisonnière.

**2.4.2.5** Le système de jaugeage à trajectoire unique repose également sur l'hypothèse d'un profil des vitesses relativement stable, très peu affecté par les modifications de la relation niveau d'eau/débit. Elle peut n'être pas appropriée aux emplacements soumis à des reflux importants.

**2.4.2.6** Le système de jaugeage à trajectoire unique est enfin très sensible à la détérioration physique ou aux dysfonctionnements des transducteurs. Elle ne comporte aucune capacité interne de redondance instrumentale (voir 2.9).

**2.4.3 Systèmes à trajectoires multiples**

**2.4.3.1** Dans les sites

- où l'on observe des variations fréquentes et importantes de niveau d'eau ou de débit,
- la répartition des vitesses dans le plan vertical s'écarte sensiblement de celle dans le plan théorique, ou
- où les risques de reflux sont élevés dans un environnement hauteur/débit par ailleurs stable, et
- où la technique par ultrasons est néanmoins la plus appropriée d'emploi,

il sera normalement nécessaire de prévoir deux trajectoires, ou plus, pour obtenir une évaluation de la vitesse moyenne dans la section, plus précise que ne le permet la trajectoire unique.

**2.4.3.2** Le nombre de trajectoires possibles n'est limité que par la conception de l'instrumentation de mesurage choisie en fonction des contraintes de précision, de fiabilité et de prix de revient. Le but recherché est d'arriver à une représentation acceptable du profil des vitesses verticales dans la section jaugée, à tous les niveaux et débits, du plus élevé au plus bas possible.

**2.4.3.3** Si le système doit également faire montre d'un niveau élevé de sécurité de fonctionnement (par exemple ne pas s'interrompre ou se dégrader), il peut s'avérer nécessaire de prévoir un certain nombre de trajectoires «redondantes» minimisant l'effet de la détérioration physique ou du mauvais fonctionnement d'une ou de plusieurs trajectoires sur l'exactitude globale de mesurage.

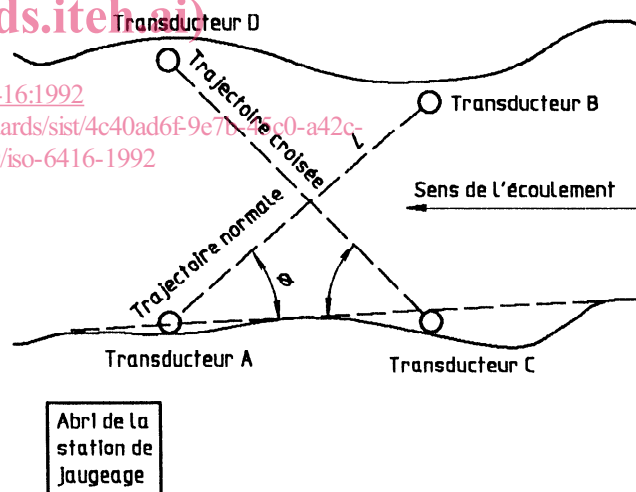
**2.4.3.4** La configuration à trajectoires multiples permet également de faire face aux situations où la section transversale du cours d'eau est de géométrie complexe.

**2.4.4 Systèmes à trajectoires croisées**

**2.4.4.1** L'un des principes fondamentaux de la technique par ultrasons est que l'angle d'intersection de chaque «trajectoire de vol» d'un système avec la droite représentant la direction moyenne de l'écoulement à la hauteur correspondante doit être connu avec précision. Les erreurs sur cet angle du système sont en effet amplifiées par la méthode de calcul du débit (voir tableau 1).

**2.4.4.2** Il peut s'avérer difficile, dans la pratique, de déterminer avec précision la direction moyenne de l'écoulement en un site donné. L'hypothèse normale, à savoir qu'elle est parallèle aux rives, n'est pas toujours vérifiée. Ce peut être vrai dans certaines parties de la plage de débit ou de niveau, mais faux dans d'autres. Le site de jaugeage lui-même peut ne pas être idéal et il peut y avoir des effets directionnels associés à une géométrie du canal ou à des conditions d'approche qui ne sont pas idéales. À de faibles débits en particulier, les effets d'une géométrie complexe du lit peuvent prendre le pas sur ce que, de la rive, on considère normalement comme étant la direction moyenne.

**2.4.4.3** Si l'on a des raisons de penser que l'écoulement ne sera pas parallèle aux rives du canal, et si l'on pense que l'erreur qui en résultera probablement sur le calcul du débit pourra être significative, il est possible d'introduire un élément d'autocorrection: pour ce faire, on dispose les transducteurs de façon à obtenir deux ou plusieurs séries de «trajectoires de vol» groupées par paires à la même hauteur, mais en forme de croix symétrique (voir figure 1).



**Figure 1 — Plan d'une station de jaugeage à trajectoires croisées**

**2.4.4.4** Avec ce genre de configuration, à chaque trajectoire orientée, par exemple, vers l'amont à partir de la rive gauche, doit correspondre une trajectoire équivalente, à même hauteur, mais orientée vers l'aval de cette même rive, et dirigée vers un point de la rive droite directement opposé au transducteur aval de la rive gauche. Les deux trajectoires jumelles doivent normalement se couper au milieu du cours d'eau et former ainsi les côtés égaux de triangles isocèles opposés par le sommet. Il convient d'éviter les différences grossières de lon-

gueur de trajectoire, car il est fort probable que la géométrie des sections amènera, elle, de grandes différences.

**2.4.4.5** L'instrumentation du système doit calculer séparément la vitesse en ligne sur chaque trajectoire d'une paire de trajectoires croisées. Si les deux vitesses calculées sont identiques (aux erreurs de calcul et de mesurage près), l'angle d'intersection pris en hypothèse pourra être considéré comme correct. Si elles sont très différentes, c'est que l'angle choisi est erroné. Dans ce cas, ni l'une ni l'autre des vitesses calculées en lignes n'est correcte, l'une est trop élevée, l'autre trop faible. L'incertitude fondamentale de mesurage inhérente à ce procédé est traitée en 2.11 qui en indique les limites de faisabilité et, par suite, de signification (voir annexe A).

**2.4.4.6** Si la direction moyenne vraie de l'écoulement ne change pas de manière significative dans le bief de mesure, il suffira de faire la moyenne des paires de vitesses en ligne obtenues pour obtenir une valeur très proche de la vitesse moyenne vraie à la hauteur considérée, les erreurs inhérentes s'annulant l'une l'autre. Le risque d'erreur restant dû à un changement de direction de l'écoulement dans le bief de jaugeage, peut être réduit par le choix d'un bief aussi court que possible.

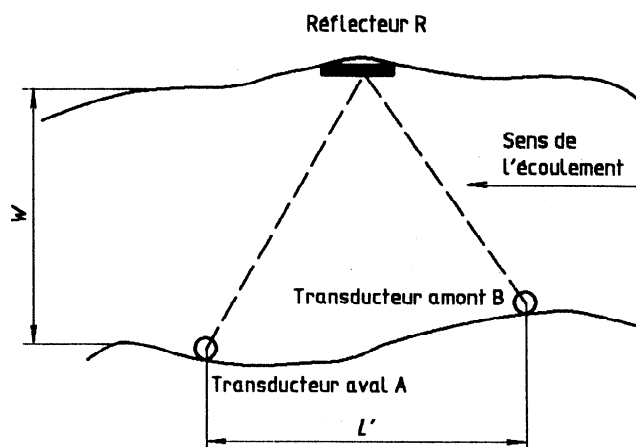
**2.4.4.7** Aux endroits où l'on exige une grande fiabilité de jaugeage, le principe de la redondance peut être combiné à l'usage de trajectoires croisées pour réduire le risque de détérioration physique du système, les transducteurs étant physiquement séparés les uns des autres sur la rive de la rivière.

## 2.4.5 Systèmes à trajectoires réfléchies

**2.4.5.1** Le système de mesurage de base par ultrasons demande normalement que des transducteurs soient montés des deux côtés du chenal. Il faut donc que les câbles de transmission des signaux et de l'énergie traversent le chenal, qu'ils soient suspendus au-dessus du lit, posés sur celui-ci ou enterrés.

**2.4.5.2** Il existe cependant des cas où il n'est pas possible d'installer des transducteurs sur les deux rives. L'une des rives peut en effet être inaccessible et rendre l'entretien du système difficile.

**2.4.5.3** Dans ces cas, on peut avoir recours à un système de transducteurs émetteurs et récepteurs placés sur la même rive et d'un réflecteur passif situé sur la rive opposée (voir figure 2). La conception du réflecteur est indiquée en 3.2.1.2.



Longueur totale de trajectoire  $L = AR + RB$

Figure 2 — Plan d'une station de jaugeage à trajectoire réfléchie

**2.4.5.4** Ce système permet également d'avoir des «trajectoires de vol» plus longues lorsqu'on veut améliorer l'exactitude de mesure aux faibles vitesses mais qu'on ne peut pas réaliser un angle nominal d'intersection plus aigu.

**2.4.5.5** Un autre avantage de ce système vient du fait qu'il n'est pas nécessaire de tenir compte de l'angle des trajectoires dans l'équation du calcul de la vitesse en ligne (voir 2.8.1.2) et qu'on élimine donc une source importante d'incertitude potentielle.

## 2.4.6 Systèmes subdivisant la section

**2.4.6.1** La technologie instrumentale moderne permet d'adopter des configurations de trajectoires extrêmement complexes tout en conservant des possibilités de contrôle et des modes de calcul relativement aisés.

**2.4.6.2** Si la géométrie du site est complexe (chenal principal avec plaine d'inondation par exemple) et si le mesurage doit donc se faire sur une très grande étendue, ou si le chenal principal est lui-même extrêmement large, il est possible d'opérer en divisant la section en un certain nombre de chenaux séparés, chaque chenal étant traité comme une entité de jaugeage relativement simple et de faire la somme des divers résultats obtenus (voir 2.3.5.1).

## 2.5 Choix de l'emplacement

### 2.5.1 Contraintes d'ordre pratique

#### 2.5.1.1 Accès

Le site où doit être mise en œuvre la technique par ultrasons doit être d'accès facile. Son installation peut nécessiter un certain nombre de travaux de génie civil et l'apport d'équipements de construction lourds. La technique repose sur l'emploi de technologies électroniques et la première mise en service ainsi que l'entretien des matériels demandent l'utilisation d'un équipement électronique spécialisé. Il convient d'éviter le transport de ces matériels à dos d'homme.

#### 2.5.1.2 Alimentation en énergie

L'alimentation à courte durée (48 h) des modèles sophistiqués et l'alimentation à longue durée (3 à 6 mois) des modèles simples, qui ont un taux d'échantillonnage faible, sont possibles. Les enregistreurs de données et les appareils de télémétrie peuvent aussi fonctionner sur des batteries d'alimentation à longue durée (pendant de longues années). Cependant, pour un fonctionnement sûr et prolongé d'un débitmètre à trajectoires multiples, la technique demande une source continue d'énergie électrique. Aussi faut-il pouvoir faire les raccordements à un coût acceptable, au secteur ou à des moyens locaux.

#### 2.5.1.3 Étalonnage et mesurage de vérification

La technique permet de déterminer une valeur absolue de la vitesse mais les systèmes conçus pour un petit nombre de trajectoires séparées peuvent nécessiter des étalonnages périodiques d'étalonnage visant à établir la relation entre la vitesse indiquée (et donc le débit calculé) et une détermination de la vitesse dans la section par une autre méthode. Quant aux systèmes à trajectoires multiples où l'échantillonnage des vitesses dans la section est par conception convenable, ils font souvent l'objet de vérifications par une autre méthode pour «rassurer» les utilisateurs des données. Il est donc prudent, quand on choisit un site de jaugeage de penser aux autres méthodes utilisables.

### 2.5.2 Contraintes d'ordre physique au niveau du site

#### 2.5.2.1 Géométrie de la section

Le chenal à jauger doit être rectiligne et ses berges doivent être parallèles. Le profil du lit, de berge à

berge, doit être aussi horizontal que possible. La variation de la géométrie ou de la forme de la section entre les extrémités amont et aval du tronçon jaugé doit être minimale.

#### 2.5.2.2 Stabilité de la section

Les appareils calculant le débit exigent de connaître la relation entre la profondeur d'eau et l'aire de la section. Cette relation doit rester stable dans le temps. Il convient donc d'éviter les endroits pouvant connaître des instabilités significatives du niveau ou du profil du lit.

#### 2.5.2.3 Rapport d'aspect du chenal

Les impulsions sonores générées par l'appareil à ultrasons se propagent dans l'eau sous forme de cônes de projection. Si le chenal est plus large que profond, le cône de projection d'un ou de plusieurs des transducteurs émetteurs pourra rencontrer le lit ou la surface de l'eau avant d'atteindre le transducteur récepteur correspondant, d'où une réflexion du signal (voir 2.2.6). À moins que le système ne soit conçu de façon très soignée, ce phénomène engendrera des difficultés insurmontables d'interprétation des signaux et des résultats parasites.

Les systèmes par ultrasons sont impropres à l'usage dans les chenaux larges et peu profonds (pour les particularités concernant le mesurage du débit en plaine d'inondation, voir 2.3.5). Les restrictions s'appliquant à un site particulier dépendent du nombre de trajectoires prévues et du nombre de trajectoires restant opérationnelles en régime de basses eaux. Il est facile de calculer les rapports limites largeur/profondeur et de proposer une stratégie de rechange.

Les sons à basse fréquence subissent une atténuation moindre avec la distance que les sons à haute fréquence (voir 2.2 pour ces détails). Lorsque la trajectoire est de faible longueur, l'utilisation d'appareils à basse fréquence pourra donner une erreur inacceptable sur le mesurage du temps de vol (voir tableau 3).

La hauteur minimale  $D_{\min}$  est déterminée par l'équation donnée en 2.2.6.

L'incertitude découle de l'hypothèse d'une erreur de  $\pm 1/50$  (2 %) de la période de la longueur d'onde et de  $\pm 20$  ns sur le chronométrage moyen du signal acoustique. Dans le cas des systèmes conçus pour de petits chenaux (d'une largeur de moins de 5 m), une différence de temps de  $\pm 3$  ns peut être atteinte (voir 3.2.3.6).