

DOSSIER TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

l'expertise technique et scientifique de référence
r2265

Mesure de débit par ultrasons - Mesure en conduite pleine - Mesure en conduite pleine

Date de publication : 10/09/2004

Par :

Boris KADIR

Auteur technique (société LCP Communication technique), spécialisé en instrumentation industrielle, régulation, l'automatique et l'informatique industrielle

Ce dossier fait partie de la base documentaire
Métreologie relative aux fluides - Vitesses et débits
dans le thème **Mesures physiques**
et dans l'univers **Mesures - Analyses**

Document délivré le 24/02/2013

Pour le compte

7200051155 - epfl biliotheque // philippe RENAUD // 128.178.183.18

Pour toute question :

Service Relation Clientèle • Éditions Techniques de l'Ingénieur • 249, rue de Crimée
75019 Paris – France

par mail : infos.clients@teching.com ou au téléphone : 00 33 (0)1 53 35 20 20



Mesure de débit par ultrasons

Mesure en conduite pleine

par **Boris KADIR**

Auteur technique (société LCP Communication technique), spécialisé en instrumentation industrielle, régulation, l'automatique et l'informatique industrielle

1. Principales notions concernant les ondes ultrasonores.....	R 2 265 – 2
1.1 Définition et principales caractéristiques	— 2
1.2 Catégories d'ondes utilisées en débitmétrie ultrasonore	— 2
1.3 Célérité d'une onde élastique	— 2
1.4 Cas particulier de l'eau.....	— 3
1.5 Célérité d'une onde dans un fluide en mouvement	— 3
1.6 Longueur d'onde d'une onde ultrasonore.....	— 3
1.7 Impédance acoustique d'un milieu	— 4
1.8 Réflexion et réfraction	— 4
1.9 Facteurs d'absorption des ondes ultrasonores.....	— 5
2. Mesure de débit en conduite pleine	— 5
2.1 Fonctionnement de la mesure par différence de temps de transit.....	— 5
2.2 Mesure du débit par plans diamétraux.....	— 8
2.3 Mesure du débit par plans parallèles.....	— 13
2.4 Variantes existantes en conduite pleine	— 14
2.5 Spécificités de certaines mesures	— 18
2.6 Grandeurs d'influence.....	— 20
2.7 Mise en œuvre d'une mesure en conduite pleine	— 22
2.8 Avantages apportés par la technique DTT en mesure sur conduites pleines	— 26
Pour en savoir plus.....	Doc R 2 266

De par ses multiples avantages : installation facile, perte de charge nulle ou quasi nulle, précision souvent meilleure que 1 % pour une large gamme de débits et de fluides, possibilité de mesurer directement le débit dans les deux sens d'écoulement, possibilité de mesurer le débit dans des conduites de grand diamètre..., la technique de mesure de débit par différence de temps de transit est de plus en plus utilisée pour beaucoup de fluides (eau douce, eau de mer, eau lourde, acides, huiles, sodium liquide, produits pétroliers, gaz, air, vapeur...)

Cet article a été conçu pour permettre une compréhension de fond de cette technique de mesure de débit promise à un succès grandissant. Cette technique de mesure de débit dite « par différence de temps de transit » détermine la vitesse d'écoulement à partir de la différence de parcours d'une onde ultrasonore entre une sonde amont et une sonde aval, et inversement. La technique de mesure par effet Doppler est seulement présentée en tant que complément de la technique par différence de temps de transit.

1. Principales notions concernant les ondes ultrasonores

1.1 Définition et principales caractéristiques

Une onde ultrasonore est une vibration mécanique se propageant dans un milieu élastique (solide, liquide ou gaz) et dont la fréquence se trouve au-delà des fréquences audibles.

On considère comme ultrasonore une onde dont la fréquence se situe entre 20 kHz et 1 GHz.

Les fréquences utilisées en mesure de débit vont de 200 kHz à 4 MHz.

Les ondes ultrasonores présentent toutes les propriétés générales des ondes élastiques. Elles n'ont pas de propriété qui leur soit propre.

L'intérêt des ultrasons réside dans la petitesse de leur longueur d'onde qui est souvent du même ordre de grandeur que les dimensions caractéristiques des milieux qu'ils parcourent (diamètre des grains, hétérogénéités, défauts éventuels), ce qui leur permet de traverser facilement les matériaux solides et les fluides.

De plus, la petitesse de leur longueur d'onde leur confère une propagation assimilable à celle des ondes optiques, ce qui permet d'appliquer les lois relatives à l'optique physique (notamment lois de réflexion et réfraction).

Les ultrasons sont utilisés dans un nombre croissant d'applications industrielles : débitmétrie, mesure de niveau, mesure de densité, tests non destructifs, mesure d'épaisseur ou de diamètre interne de conduite...

1.2 Catégories d'ondes utilisées en débitmétrie ultrasonore

On distingue principalement six catégories d'ondes sonores se différenciant par leur mode et leur vitesse de propagation :

- ondes longitudinales ;
- ondes transversales ;
- ondes de surface de Rayleigh ;
- ondes de Lamb ;
- ondes de Love.

Parmi elles, deux catégories d'ondes interviennent en débitmétrie ultrasonore :

- les ondes longitudinales (appelées aussi ondes de compression) qui génèrent un déplacement des particules du milieu parallèlement à la direction de propagation ;
- les ondes transversales (appelées aussi ondes de cisaillement) qui produisent un déplacement des particules du milieu perpendiculairement à la direction de propagation.

Dans un solide, se propagent aussi bien les ondes longitudinales que les ondes transversales. Dans un fluide (gaz ou liquide), seules se propagent les ondes longitudinales.

Les ondes se propageant dans la paroi d'une conduite sont des ondes longitudinales lorsqu'elles se propagent perpendiculairement à la conduite, et sont des ondes transversales lorsqu'elles se propagent en biais.

1.3 Célérité d'une onde élastique

1.3.1 Célérité d'une onde dans un fluide

Dans un fluide la vitesse de propagation (appelée célérité) d'une onde élastique est égale à :

$$C = \sqrt{\frac{\rho}{\varepsilon}} \quad (1)$$

avec ε rapport entre l'augmentation de pression et l'augmentation relative de la masse volumique ou du volume :

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{\Delta \rho} = \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

Exemple : ε a les dimensions d'une pression et est exprimé dans les mêmes unités.

Pour les liquides, son ordre de grandeur est $15 - 45 \cdot 10^8 \text{ Pa}$.

Par exemple, le module d'élasticité volumique de l'eau douce est égal à $20,50 \cdot 10^8 \text{ Pa}$, ce qui signifie qu'il faut appliquer une augmentation de pression de 205 bars pour que la masse volumique augmente de 1 %.

Pour un liquide donné, ε augmente légèrement avec la température. (Par exemple, pour de l'eau douce à pression atmosphérique, la variation du ε avec la température est donnée dans le tableau 1.)

Par ailleurs, la valeur de ε croît approximativement de 2 % à chaque fois que la pression augmente de 70 bars.

Exemple : pour les gaz, la valeur de ε est pratiquement égale à la pression du gaz ($P < \varepsilon < 1,7P$), en fonction de la nature de la transformation :

- $\varepsilon = P$ pour une transformation isotherme ;
- $\varepsilon = \frac{C_P}{C_V} \cdot P$ pour une transformation adiabatique.

Tableau 1 – Variation de ε avec la température, pour de l'eau douce à pression atmosphérique

$\varepsilon (\text{Pa})$	$T (\text{°C})$
$20,50 \cdot 10^8$	10
$21,40 \cdot 10^8$	20
$21,70 \cdot 10^8$	40
$21,90 \cdot 10^8$	60

Pour les gaz, on utilise aussi l'expression approchée :

$$C = \sqrt{\frac{R}{C_P} \cdot \frac{P}{\rho \cdot z}}$$

avec R constante des gaz parfaits,
 C_P capacité thermique massique du gaz à pression constante,
 P pression de service,
 ρ masse volumique du gaz aux conditions de service,
 z facteur de compressibilité du gaz.

1.3.2 Célérité d'une onde dans un solide

Dans un solide, la célérité d'une onde longitudinale est égale à :

$$C = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (2)$$

avec Y module d'élasticité de Young du solide.

Lorsqu'une force de traction ou de compression F est appliquée aux deux extrémités d'un barreau homogène de section constante S , le module de Young d'un corps désigne, dans sa zone d'élasticité, le rapport

$$Y = \frac{F}{\frac{\Delta \ell}{\ell_0}}$$

avec $\Delta \ell / \ell_0$ accroissement relatif de longueur du barreau dû à la traction ou à la compression.

Les valeurs courantes de Y pour les matériaux relativement peu élastiques sont de l'ordre 10^{11} Pa, par exemple $2 \cdot 10^{11}$ Pa pour la fonte.

Remarque : dans les solides, les ondes longitudinales se propagent plus rapidement que les ondes transversales.

Par exemple, dans de la fonte à 25°C , $C = 4\,550$ m/s pour une onde longitudinale et $C = 2\,500$ m/s pour une onde transversale.

Les tableaux 2, 3 et 4 montrent quelques exemples de célérités en fonction de la nature du milieu, de la température et de la pression.

Tableau 2 – Exemples de célérités en fonction de la nature du milieu (à 25°C)

Milieu	C (m/s)
Acier	5 310 à 5 740 (vitesses longitudinales)
Eau	1 497
Air	345

Tableau 3 – Célérité en fonction de la température (eau et air)

Milieu	C (m/s)	T ($^\circ\text{C}$) / P (bar)
Eau	1 497	25/atmosphérique
	1 556	25/80
Air	335,6	7/1
	347,3	27/1

Tableau 4 – Célérité en fonction de la pression (eau)

Milieu	C (m/s)	T ($^\circ\text{C}$) / P (bar)
Eau	1 416	175/45
	1 427	175/80

Remarque : il existe des tables détaillées donnant les célérités dans un grand nombre de matériaux (par exemple, tables des célérités éditées par Panamétrics).

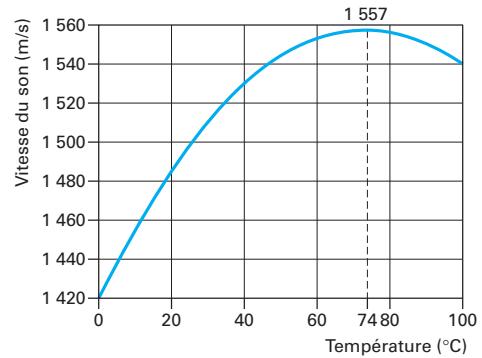


Figure 1 – Vitesse du son dans l'eau en fonction de la température (pour une pression de 1 bar)

1.4 Cas particulier de l'eau

L'eau présente des caractéristiques acoustiques particulières : la vitesse du son y est croissante jusqu'à 74°C , puis décroît au-delà (figure 1).

Remarque : l'expression suivante permet de calculer la valeur approchée de la vitesse du son dans l'eau en fonction de la température, à la pression de 1 bar.

$$C (t \text{ en } ^\circ\text{C}) = 1\,557 - 0,024\,5(74 - t)^2$$

1.5 Célérité d'une onde dans un fluide en mouvement

Dans les tables des valeurs, les vitesses du son dans les fluides sont données pour un fluide au repos.

Dans un fluide en mouvement, la vitesse est augmentée lorsque l'onde se propage dans le sens de l'écoulement ; inversement, elle est diminuée lorsque l'onde se propage à contre-courant.

La figure 2 illustre ces deux situations, dans le cas d'une onde se propageant obliquement par rapport à l'axe d'une conduite.

1.6 Longueur d'onde d'une onde ultrasonore

Dans un milieu donné, la longueur d'onde, la fréquence et la célérité d'une onde sont liées par la relation

$$C = \lambda \cdot f \quad (3)$$

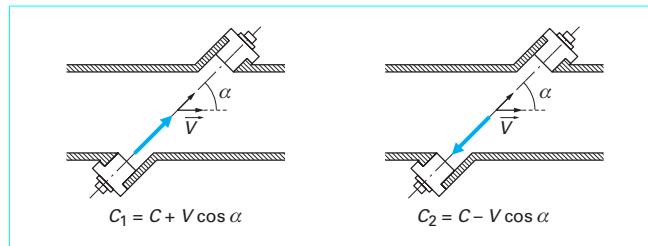


Figure 2 – Célérité d'une onde dans un fluide en mouvement

La vitesse du son dans un milieu donné étant constante (à température et pression constantes), la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence.

Exemple numérique :

- vitesse du son dans l'eau : 1 500 m/s ;
- pour une fréquence de 400 kHz, $\lambda = 3,75 \text{ mm}$;
- pour une fréquence de 2 MHz, $\lambda = 0,75 \text{ mm}$.

L'exemple numérique ci-dessus montre que la longueur d'onde d'une onde ultrasonore se propageant dans l'eau n'est pas très éloignée de la taille possible des particules qui s'y trouvent (dans le cas d'une eau chargée).

Or le rapport longueur d'onde/taille des particules détermine directement l'intensité de la réflexion de l'onde sur les particules : plus la longueur d'onde est faible par rapport à la taille des particules, plus l'onde est réfléchie.

De ce fait, pour qu'une onde puisse se propager dans un liquide contenant des particules en suspension, il faut diminuer la fréquence (et donc augmenter la longueur d'onde) si les particules en suspension sont de taille relativement importante.

1.7 Impédance acoustique d'un milieu

L'impédance acoustique d'un milieu est égale au produit de la masse volumique du milieu par la vitesse du son dans ce milieu :

$$Z_{\text{acoustique}} = \rho \cdot C \quad (4)$$

L'unité S.I. de l'impédance acoustique est $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. On utilise aussi le ray : $1 \text{ Mray} = 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Des exemples d'ordres de grandeur d'impédance acoustique sont donnés dans le tableau 5.

Tableau 5 – Exemples d'impédance acoustique

Milieu	Impédance acoustique	
	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	(Mray)
Acier	$7,8 \cdot 10^3 \times 5500 = 42,9 \cdot 10^6$	42,9
Eau	$1 \cdot 10^3 \times 1500 = 1,5 \cdot 10^6$	1,5
Air	$1,2 \times 350 = 4,2 \cdot 10^2$	$4,2 \cdot 10^{-4}$

Lors du passage d'un milieu à un autre, une onde ultrasonore sera d'autant plus réfléchie que l'impédance acoustique du second milieu est éloignée de celle du premier milieu.

On voit donc d'après les exemples ci-dessus que le passage de l'acier à l'air génère une réflexion importante de l'onde ultrasonore

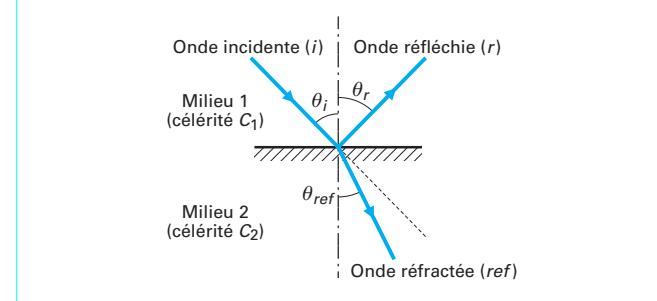


Figure 3 – Réflexion et réfraction d'une onde incidente

dans l'acier. (C'est la raison pour laquelle on ne peut théoriquement utiliser des sondes externes — c'est-à-dire placées sur la conduite, à l'extérieur de celle-ci — pour mesurer un débit d'air ou de gaz : l'onde émise par une sonde serait presque intégralement réfléchie dans la paroi de la conduite.)

On voit aussi que le passage de l'eau dans l'air génère une réflexion importante dans l'eau.

Des bulles d'air véhiculées par l'eau représentent donc un obstacle important à la bonne propagation d'une onde ultrasonore dans l'eau, *a fortiori* si la taille des bulles d'air est importante par rapport à la longueur d'onde.

1.8 Réflexion et réfraction

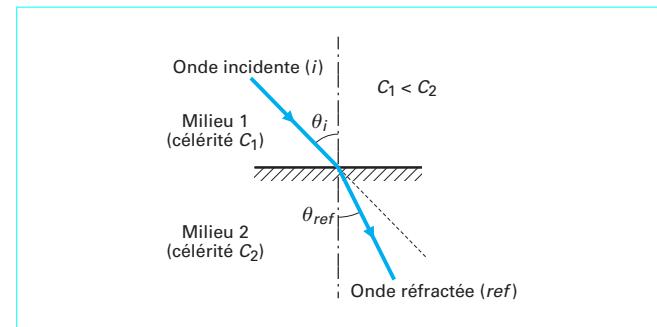
Soient deux milieux distincts (caractérisés notamment par leur masse volumique et les célerités longitudinale et transversale) séparés par une interface plane.

Lorsqu'une onde incidente se propageant dans le milieu 1 rencontre la surface de séparation, une partie de l'onde est réfléchie, l'autre est transmise, déviée, dans le milieu 2 (figure 3).

Les angles θ_i et θ_{ref} sont liés par la relation de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin \theta_i}{C_1} = \frac{\sin \theta_{\text{ref}}}{C_2}$$

Il y a rapprochement de l'onde réfractée vers la normale lorsque la célerité dans le milieu 2 est inférieure à celle dans le milieu 1 (figure 4).

Figure 4 – Rapprochement de l'onde réfractée quand $C_2 < C_1$

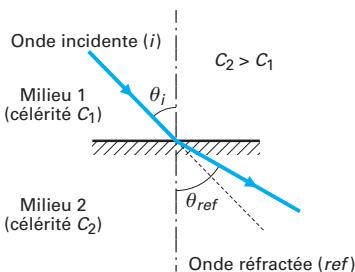


Figure 5 – Écartement de l'onde réfractée quand $C_2 > C_1$

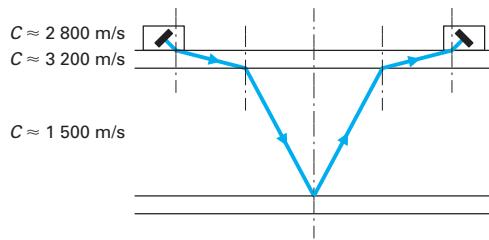


Figure 6 – Parcours de l'onde ultrasonore dans le cas de deux sondes externes montées sur la même génératrice

Il y a écartement de l'onde réfractée lorsque la célérité dans le milieu 2 est supérieure à celle dans le milieu 1 (figure 5).

Remarque : comme en optique, il existe un angle d'incidence limite pour lequel aucune énergie n'est transmise dans le second milieu ($\theta_{\text{ref}} = 90^\circ$).

La figure 6 illustre ces règles de réflexion et de réfraction appliquées au parcours d'une onde entre deux sondes ultrasonores externes montées sur la même génératrice de la conduite, une sonde étant émettrice, l'autre réceptrice, la mesure étant effectuée dans un liquide.

1.9 Facteurs d'absorption des ondes ultrasonores

Une onde ultrasonore se propageant dans un milieu subit une atténuation qui peut être due à plusieurs facteurs.

- **Fréquence** – L'absorption est proportionnelle au carré de la fréquence. On utilisera donc une fréquence réduite si l'onde doit parcourir un trajet important dans le milieu mesuré (notamment, en cas de conduite de grand diamètre) ou si le fluide mesuré est fortement absorbant.

- **Viscosité** – Si l'onde se propage dans un liquide, l'absorption est à peu près proportionnelle à la viscosité.

- **Poches d'air, même petites, et bulles** – Les ultrasons sont fortement atténués lors de la traversée de poches d'air ou de bulles (même non visibles à l'œil nu).

- **Particules** – Une onde se propageant dans un liquide chargé de particules solides est réfléchie par celles-ci.

(Rappel : la réflexion est d'autant plus importante que la taille des particules est grande par rapport à la longueur d'onde.)

2. Mesure de débit en conduite pleine

2.1 Fonctionnement de la mesure par différence de temps de transit

2.1.1 Principe général d'une corde de mesure

Une corde de mesure est constituée de deux sondes opposées dirigées l'une vers l'autre, la première placée en amont (sonde A), la seconde en aval (sonde B).

Selon sa conception, le débitmètre émet sur l'une des deux sondes, soit un train d'ondes d'une dizaine d'alternances, soit (technique le plus souvent utilisée) une impulsion excitatrice d'amplitude de 100-400 V et de durée 0,25 – 3 µs (figure 7). (L'émission d'une impulsion correspond à un tir.)

Ce signal, converti en signal ultrasonore, est reçu par l'autre sonde qui le retransmet au débitmètre sous forme d'un signal électrique. Le débitmètre peut ainsi déterminer le temps entre l'émission de l'impulsion et la réception du signal d'écho.

Le débitmètre effectue ensuite la même opération en sens inverse : tir, réception de l'écho, détermination du temps de transit.

Ces deux tirs permettent de connaître les temps T_{AB} (temps de transmission de la sonde amont vers la sonde aval) et T_{BA} (temps de transmission de la sonde aval vers la sonde amont), ainsi que la différence ΔT entre les deux temps de transmission.

La connaissance des ces trois variables permet alors de calculer le débit volumique (cf. l'expression (9) du débit pour une mesure monocorde).

Remarques

1. Deux tirs successifs permettant de connaître ces trois variables correspondent à une mesure élémentaire ;

2. En fait, le débitmètre effectue plusieurs dizaines ou plusieurs centaines de mesures élémentaires avant de calculer le débit, les variables T_{AB} , T_{BA} et ΔT étant déterminées par moyennage. (Plus le nombre de mesures élémentaires est élevé, plus la mesure de débit présente une meilleure résolution temporelle et donc une meilleure précision.)

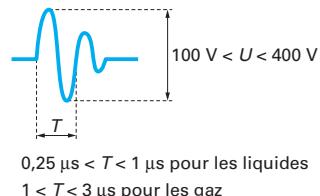


Figure 7 – Allure d'une impulsion excitatrice

2.1.2 Élément constitutif des sondes ultrasonores

Les sondes ultrasonores sont réalisées à l'aide de matériaux piézo-électriques.

Ces matériaux subissent une déformation dans une direction déterminée lorsqu'une tension électrique est appliquée sur certaines de leurs faces.

Inversement, ils se chargent électriquement sur certaines de leurs faces lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique exercée dans une direction déterminée.

Cette double propriété est en particulier utilisée pour réaliser des émetteurs-récepteurs d'ondes ultrasonores.

Le quartz, matériau piézo-électrique le plus connu, n'est pratiquement plus utilisé pour les émetteurs-récepteurs ultrasonores. On lui préfère des matériaux obtenus à partir de différents oxydes de plomb, de titane ou de zirconium, et soumis à un champ électrique intense qui les rend anisotropes et donc piézo-électriques. (Ces matériaux sont désignés par le terme générique de céramique.)

2.1.3 Caractéristiques principales de sondes ultrasonores

Les principaux paramètres qui caractérisent une sonde sont :

- la fréquence de travail ;
- le type d'onde générée ;
- la température d'utilisation continue.

Fréquence de travail

Elle est déterminée en premier lieu par la dimension de la conduite : fréquence plus faible pour des diamètres importants, fréquence élevée pour des petits diamètres.

En règle générale, on cherchera à compenser des facteurs d'atténuation — diamètre de la conduite, viscosité du fluide, présence de particules, rugosité de la paroi... — en abaissant la fréquence de travail.

Remarque : la fréquence de travail désigne la fréquence de l'onde porteuse des impulsions et non la fréquence d'émission des impulsions, beaucoup plus faible (quelques dizaines ou quelques centaines de Hz).

Type d'onde générée

L'onde émise par les sondes externes, accolées à la conduite, peut être longitudinale ou transversale.

Les sondes externes à onde longitudinale (onde émise perpendiculaire à la conduite) sont principalement utilisées pour mesurer l'épaisseur des conduites ou pour mesurer la composante radiale de vitesse (cf. § 2.4.2).

Les sondes externes à onde transversale sont utilisées pour la mesure de débit.

Température d'utilisation continue

Les caractéristiques piézo-électriques d'un matériau donné sont conservées jusqu'à une température spécifique, de l'ordre de 200 °C, appelée température de Curie.

La température d'utilisation continue est donc fixée par cette température intrinsèque ainsi que par les caractéristiques thermiques du corps de la sonde.

Les constructeurs proposent des sondes supportant une utilisation permanente autour de 200 °C.

Remarque : d'autres caractéristiques définissent une sonde :

- dimensions de l'élément piézo-électrique ;
- angle d'incidence de l'onde ultrasonore ;
- cône d'émission ;
- mode d'excitation ;
- fréquence des tirs...

2.1.4 Principales catégories de sondes

Deux grandes familles de sondes sont utilisées en débitmétrie ultrasonore :

- les sondes externes, accolées à la conduite et donc sans contact avec le fluide ;
- les sondes intrusives (appelées aussi sondes mouillées) en contact avec le fluide et nécessitant donc le percement de la conduite.

Les sondes intrusives peuvent elles-mêmes être divisées en quatre catégories :

- sondes intégrées dans une manchette,
- sondes fixes,
- sondes intrusives à insertion,
- sondes internes.

Remarque : chaque constructeur dispose d'un catalogue de sondes plus ou moins étoffé.

Une sonde étant conçue pour un besoin particulier, les sondes ne sont pas toujours interchangeables, même si elles sont de même type.

Il est donc conseillé de s'en remettre au constructeur pour choisir la référence la mieux adaptée à l'application.

Sondes externes

D'installation aisée, les sondes externes (appelées aussi sondes accrochables ou sondes *clamp-on*) sont particulièrement adaptées aux mesures ponctuelles, par exemple au cours de campagnes d'essai. (De par la sécurité qu'elles procurent, elles conviennent également pour des mesures permanentes.)

Elles nécessitent l'utilisation d'un couplant acoustique permettant de compenser la présence de petites poches d'air entre la sonde et la paroi de la conduite (cf. § 2.7.4).

Elles sont fixées sur la conduite à l'aide de dispositifs tels que sangles, chaînes, sabots magnétiques ou pinces spécifiques (figure 8 a et b).

Remarque : les sondes externes ne conviennent pas pour des conduites présentant un épais dépôt interne (dû par exemple à un important entartrage), ou pour des conduites en béton (mais peuvent être utilisées pour des conduites en ciment ou en fibrociment).

Manchette avec sondes intégrées

Une manchette (figure 9) permet une bonne précision de mesure et une bonne stabilité, le matériau de la conduite (acier inoxydable) ne s'abîmant pas.

De plus, les manchettes sont généralement étalonnées en usine.

Toutefois, le poids et le prix peuvent devenir importants pour des gros diamètres : par exemple, plus de 4 tonnes pour une conduite DN 3000.

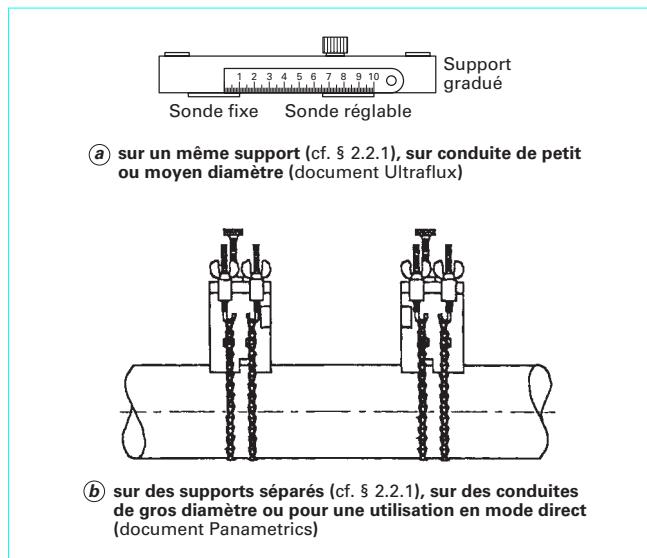


Figure 8 – Deux sondes montées pour une utilisation en mode reflex

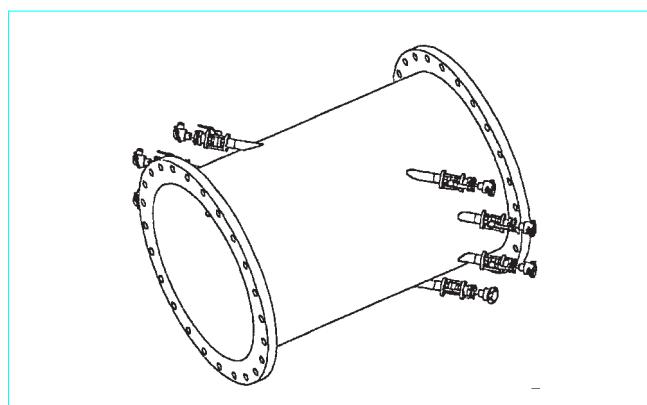


Figure 9 – Exemple de manchette multicorde (document Ultraflux)

Sondes intrusives fixes

Ces sondes doivent être utilisées lorsque la conduite est dégradée, ou lorsque le matériau de la conduite est peu perméable aux ultrasons (béton, fibrociment) et lorsque le processus peut être arrêté sans trop de difficultés. (Ces sondes sont aussi principalement utilisées pour la mesure de débit de gaz.)

Remarque : une variante des sondes intrusives fixes consiste à les placer dans des doigts de gant préalablement installés sur la conduite. La sonde peut alors être extraite et remplacée en charge.

Sondes intrusives à insertion

Ces sondes peuvent être installées en charge, même à forte pression, à l'aide d'une machine de perçage spéciale (par exemple, machine « Drillup » de chez Bayard, ou machines à percer de chez T.D. Williamson-Brunham). Elles sont équipées d'une vanne intégrée permettant d'isoler la sonde du fluide mesuré.

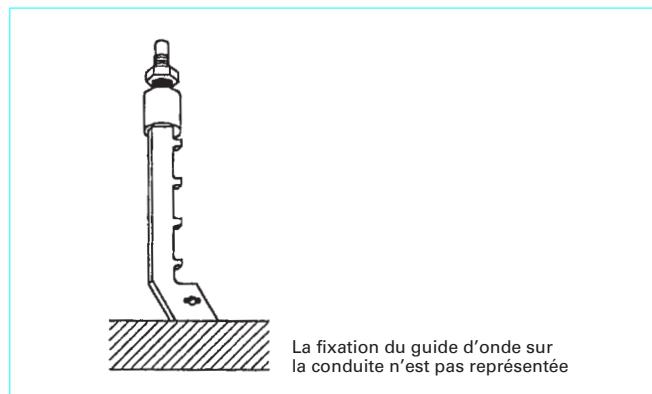


Figure 10 – Exemple de guide d'onde (document Panametrics)

Les sondes à insertion sont généralement placées perpendiculairement à la conduite (piquage droit, les sondes étant biseautées), ce qui facilite sensiblement le perçage de la conduite.

Elles peuvent aussi être placées en piquage oblique, mais leur installation est alors plus délicate.

Elles sont conseillées lorsque la conduite est dégradée ou lorsque le matériau est peu perméable aux ultrasons (béton, fibrociment) et lorsque le processus peut difficilement être arrêté. (Elles peuvent aussi être utilisées pour la mesure de débit de gaz mais, cette utilisation est relativement rare.)

Remarque : dans le cas de sondes à insertion en piquage droit, il est nécessaire de préciser à la commande le mode, direct ou inverse (cf. § 2.2.1), dans lequel les sondes seront utilisées car la géométrie des sondes peut être différente selon le mode employé.

Sondes internes

Ces sondes, appelées aussi sondes *clamp-in*, sont placées à l'intérieur de la conduite (lorsque ses dimensions permettent une intervention interne), un presse-étoupe assurant le passage des câbles.

Les sondes internes peuvent être utilisées pour des conduites de (très) gros diamètre.

Elles sont aussi utilisées lorsque la conduite est très dégradée et qu'on veut éviter de l'affaiblir par des perçages trop importants.

Utilisation de guides d'onde

Pour les températures élevées (au-delà de 200-250 °C), il est possible d'utiliser un guide d'onde (figure 10). Il s'agit d'un barreau, cylindrique ou plat, généralement en acier inoxydable, et éventuellement pourvu d'ailes de refroidissement. La température de fonctionnement de la sonde peut ainsi être ramenée à moins de 100 °C.

La sonde et le guide d'onde peuvent être d'un seul tenant ou être installés séparément (en particulier dans le cas d'un guide d'onde installé à demeure).

2.1.5 Principales approches de mesure

Les sondes peuvent être montées selon deux approches principales :

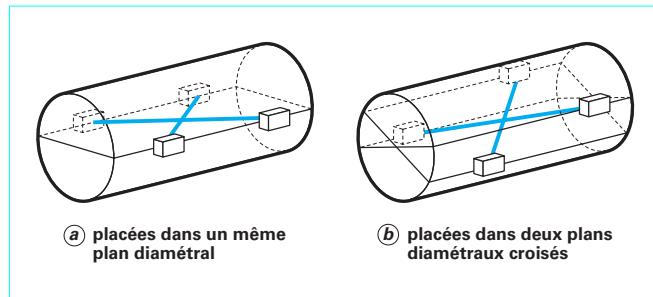


Figure 11 – Cordes placées dans des plans diamétraux

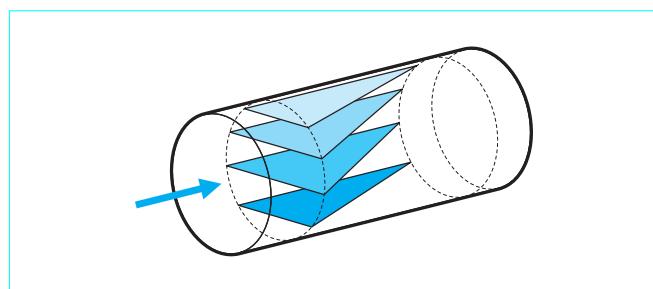


Figure 12 – Quatre cordes placées dans quatre plans parallèles

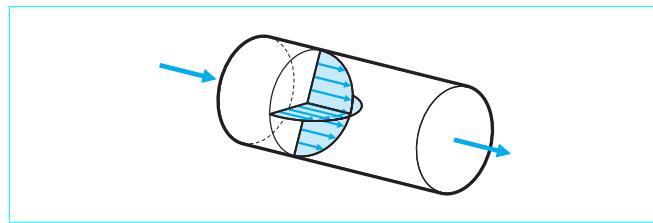


Figure 13 – Illustration d'un profil développé

– cordes placées dans un ou plusieurs plans diamétraux (figure 11) ;

Remarque : une mesure monocorde est toujours effectuée dans un plan diamétral.

– cordes placées dans plusieurs plans parallèles (figure 12).

Les montages utilisant des plans diamétraux supposent un écoulement pleinement développé.

Un profil est dit « **pleinement développé** » (figure 13) si l'écoulement ne subit aucune perturbation due à la proximité, en amont ou en aval, d'un coude, d'un élargissement de conduite (divergent), d'un resserrement de conduite (convergent), d'une vanne, d'une pompe... ce qui nécessite de grandes longueurs de conduite rectiligne (appelées « longueurs droites ») et exprimées généralement en nombre de fois le diamètre de la conduite).

Le profil de vitesses est alors stable, présente une symétrie de révolution — on dit alors que le profil est axisymétrique — et peut être traduit par des équations mathématiques connues.

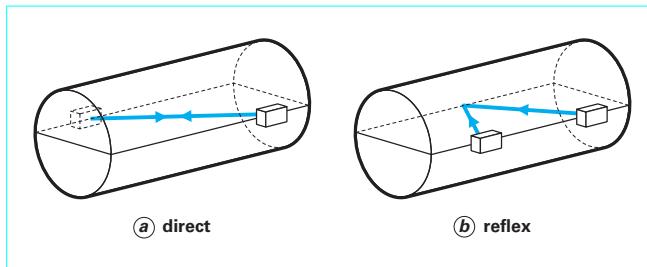


Figure 14 – Sondes – mode de travail

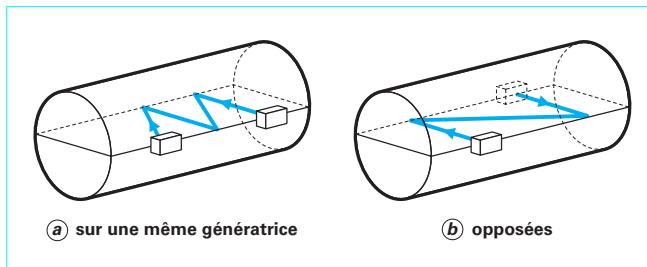


Figure 15 – Sondes travaillant en mode double reflex

Les montages à plans parallèles ne nécessitent pas d'hypothèses sur la géométrie du profil de vitesses et sont donc préconisés lorsque l'écoulement présente des profils de vitesses irréguliers (par exemple, lorsqu'on ne peut disposer de longueurs droites suffisantes pour obtenir un écoulement développé).

2.2 Mesure du débit par plans diamétraux

2.2.1 Différents modes de travail des sondes

Pour les montages à **plans diamétraux**, les sondes d'une même corde peuvent être montées selon plusieurs techniques.

■ **Mode direct** : sondes opposées et orientées l'une vers l'autre (figure 14 a).

Cette méthode est principalement utilisée lorsque l'état de la conduite ne permet pas l'emploi du mode reflex (cf. ci-dessous).

■ **Mode reflex simple** (appelé aussi **mode V**) : sondes placées du même côté de la conduite, sur une même génératrice, l'onde ultrasonore étant réfléchie une fois (figure 14 b).

Ce mode est préconisé dans la plupart des cas, la précision de mesure étant améliorée lorsqu'on augmente le trajet de l'onde.

■ **Mode double reflex** avec **sondes du même côté** (appelé aussi **mode W**) : sondes placées sur une même génératrice (figure 15 a), l'onde ultrasonore étant réfléchie trois fois.

■ **Mode double reflex avec sondes opposées** (figure 15 b) (appelé aussi **mode Z** ou **N**) : sondes de part et d'autre de la conduite, l'onde ultrasonore étant réfléchie deux fois.

Remarque : les modes multi-reflex sont utilisables uniquement pour des conduites de faible diamètre (de l'ordre de 15 mm) et uniquement avec des sondes externes.

2.2.2 Montages recommandés en mesure par plans diamétraux

Dans la plupart des cas, il est conseillé d'utiliser des sondes externes travaillant en mode reflex V.

D'autres configurations sont à utiliser dans les cas suivants (tableau 6).

Tableau 6 – Montages recommandés en mesure par plans diamétraux (document Ultraflux)

Situation	Configuration à utiliser
Surface interne de la conduite abîmée	Sondes externes travaillant en mode direct
Conduite très dégradée, les sondes externes, même en mode direct, ne donnant pas de résultat exploitable	Sondes intrusives en mode direct
Conduite en béton (Les cailloux représentent des obstacles à la transmission des ondes ultrasonores)	Sondes intrusives travaillant en mode V ou en mode direct, suivant l'état interne de la conduite
Liquide chargé	Sondes externes travaillant en mode direct
Volonté de pouvoir procéder à un échange standard des sondes par du personnel non qualifié, sans utilisation d'un oscilloscope	Sondes intrusives ou sondes externes avec support fixe, en mode V ou en mode direct
Conduite de diamètre inférieur à 20 mm, débit très faible, bon état intérieur de la conduite	Sondes externes travaillant en mode W ou N
Changements importants de la vitesse du son au cours du temps (conduite traversée par des fluides différents, changements importants de la température ou de la pression du liquide)	Sondes intrusives travaillant en mode direct

2.2.3 Vitesse moyenne le long d'une corde

Soient deux sondes (externes ou intrusives) montées en mode direct (figure 16).

Le temps de parcours de l'onde dans le fluide, de la sonde amont à la sonde aval, est égal à :

$$T_{AB} = \frac{L}{C + V \cos \alpha}$$

avec C vitesse du son dans le fluide au repos,
 V vitesse d'écoulement du fluide,
 L longueur de parcours de l'onde **dans la conduite**.

Le temps de parcours de la sonde aval à la sonde amont est égal à :

$$T_{BA} = \frac{L}{C - V \cos \alpha}$$

De ces deux expressions on déduit :

$$\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} = \frac{2V \cos \alpha}{L} = \frac{2VD}{L^2}$$

d'où

$$V = \frac{L^2}{2D} \left(\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} \right)$$

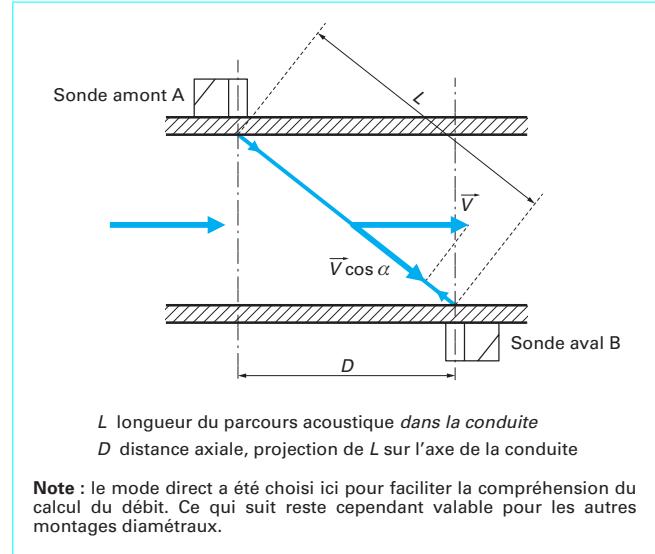


Figure 16 – Mode direct vu de dessus

La vitesse moyenne d'écoulement le long de la trajectoire définie par les deux sondes a donc pour expression :

$$V_{us} = \frac{L^2}{2D} \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_{AB} \cdot T_{BA}} \right) \quad (5)$$

où $\Delta T = T_{BA} - T_{AB}$

Cette expression montre que :

— la mesure de la vitesse d'écoulement est indépendante de la vitesse du son ;

— la précision ne dépend que de la précision de mesure des paramètres géométriques L et D , et de la précision de mesure des temps T_{AB} et T_{BA} . (Les appareils les plus récents atteignent des résolutions de mesure des temps de transit inférieures à $+/- 0,1$ ns.)

Remarques

1. Les temps de transit T_{AB} et T_{BA} dépendent étroitement des conditions de mesure. (Schématiquement, plus le diamètre de la conduite est réduit, plus les temps de transit — et donc la différence entre ces temps — sont faibles.)

2. La vitesse du son dans le fluide n'est pas directement utilisée pour la détermination de V_{us} . Elle est cependant calculée à partir des expressions de T_{AB} et T_{BA} :

$$C + V \cos \alpha = \frac{L}{T_{AB}} \quad \text{et} \quad C - V \cos \alpha = \frac{L}{T_{BA}}$$

$$\text{d'où} \quad C = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{T_{AB}} + \frac{1}{T_{BA}} \right)$$

Le calcul de C permet de vérifier la cohérence des mesures, la vitesse du son calculée devant correspondre à la vitesse du son prévue.

(Si ce n'est pas le cas, il est nécessaire de vérifier la configuration de l'appareil, en particulier le diamètre intérieur et l'épaisseur de la conduite, la longueur du trajet acoustique dans la conduite (L) et le type de fluide.)

2.2.4 Coefficient hydraulique

Du fait de la non-uniformité des vitesses d'écoulement dans la section de la conduite, la vitesse moyenne du fluide le long de la trajectoire (V_{us}) est différente de la vitesse moyenne par rapport à la section (\bar{V}).

Lorsque la corde est placée dans un plan diamétral et que le profil de vitesses est pleinement développé, le passage de V_{us} à \bar{V} est réalisé à l'aide d'un coefficient K_H appelé coefficient hydraulique et défini par la relation :

$$K_H = \frac{V_{us}}{\bar{V}} \quad (6)$$

On trouve dans la littérature américaine la définition inverse de K_H :

$$K_H = \frac{\bar{V}}{V_{us}}$$

Calcul de K_H dans le cas d'un écoulement laminaire

Dans le cas d'un écoulement laminaire (voir encadré ci-dessous), on démontre que la vitesse d'écoulement à une distance r de l'axe de la conduite est égale à :

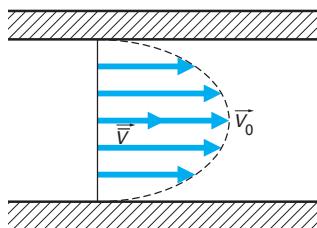
$$V(r) = V_0 \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)$$

avec V_0 vitesse d'écoulement au centre de la conduite,
 R rayon de la conduite.

Un **écoulement laminaire** est un écoulement pleinement développé (loin donc de toute source de perturbation) dans lequel chaque veine fluide se déplace parallèlement à la conduite, les veines ne se mêlant pas.

L'allure du profil de vitesses est celle d'un paraboloïde de révolution (figure 17).

Ce type d'écoulement se rencontre principalement pour des fluides visqueux tels que les huiles ou certains gaz. Il est rarement rencontré pour l'eau.



V_0 vitesse maximale d'écoulement au centre de la conduite
 \bar{V} vitesse moyenne par rapport à la section

Les flèches représentées dans la figure correspondent aux vitesses des veines fluides glissant les unes par rapport aux autres.

Figure 17 – Profil de vitesses d'un écoulement laminaire

La vitesse moyenne sur un diamètre est égale à :

$$V_{us} = \frac{1}{2R} \int_{-R}^R V_0 \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) dr = \frac{2}{3} V_0$$

La vitesse moyenne par rapport à la section de la conduite est égale à :

$$\bar{V} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r V_0 \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) dr = \frac{1}{2} V_0$$

De ces deux expressions, on déduit la valeur du coefficient hydraulique :

$$K_H = \frac{\frac{2}{3} V_0}{\frac{1}{2} V_0} = 1,333 \quad (7)$$

ou ($K_H = 0,75$ selon la définition américaine).

Calcul de K_H dans le cas d'un écoulement turbulent

Dans le cas d'un écoulement turbulent (voir encadré), le coefficient K_H dépend, pour un diamètre de conduite donné, du nombre de Reynolds (voir encadré) et de la rugosité relative de la conduite (voir encadré).

Un **écoulement turbulent** est un écoulement pleinement développé (loin donc de toute source de perturbation) dans lequel chaque particule, outre la vitesse dans le sens de l'écoulement, est soumise à des mouvements transversaux aléatoires, les veines fluides se mêlant entre elles dans des tourbillons plus ou moins prononcés.

Cependant, lorsque l'écoulement est stabilisé (permanent), il est possible de définir des valeurs statistiques moyennes. En un point de l'écoulement, le mouvement des particules se répète avec une certaine régularité dans le temps. De même, à un moment donné, une structure de l'écoulement se répète de façon régulière dans l'espace (figure 18).

Le profil de vitesses (loin de toute source de perturbation) a l'allure figure 19. (Lorsque le débit augmente, l'allure du profil de vitesses s'allonge et s'aplatis) (figure 20). Dans l'industrie, les écoulements sont presque toujours turbulents.

Le **nombre de Reynolds** (Re) définit le caractère laminaire ou turbulent dans une conduite parcourue par un écoulement pleinement développé.

$$Re = \frac{V \cdot \mathcal{O}_{int}}{\nu}$$

avec V vitesse moyenne du fluide,
 \mathcal{O}_{int} diamètre intérieur de la conduite,
 ν viscosité cinétique du fluide à la température considérée égale à la viscosité dynamique divisée par la masse volumique.

(La viscosité cinétique traduit la contrainte tangentielle, ramenée à la masse volumique, existante entre deux veines fluides glissant l'une par rapport à l'autre. Son unité habituelle est le centistoke (cSt) : $1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.)

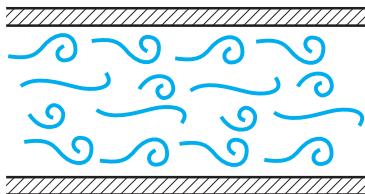
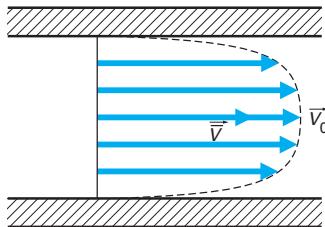


Figure 18 – Périodicité d'un écoulement turbulent



V_0 vitesse maximale d'écoulement au centre de la conduite
 \bar{V} vitesse moyenne par rapport à la section

Les flèches correspondent ici à des vitesses moyennes. On démontre que ces vitesses moyennes sont parallèles à l'axe de la conduite.

Figure 19 – Profil de vitesses d'un écoulement turbulent

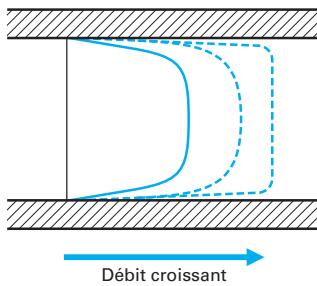


Figure 20 – Allongement et aplatissement du profil de vitesses d'un écoulement turbulent quand le débit augmente

Remarque : on peut aussi exprimer Re en fonction du débit volumique Q_v ($Q_v = S \cdot V$), du diamètre intérieur de la conduite et de la viscosité, ce qui permet de mieux appréhender l'influence des deux paramètres de base que sont le débit et le diamètre.

$$Re = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_v}{v \cdot \mathcal{D}_{int}}$$

En théorie et pour des longueurs droites importantes, en dessous de 2 300, l'écoulement est laminaire. Au-dessus de 3 000, l'écoulement est turbulent. (L'écoulement est d'autant plus turbulent que le nombre de Reynolds est élevé.)

Entre ces deux valeurs, l'écoulement est intermédiaire. Il reste laminaire mais des turbulences régulières se forment. (On désigne ce type d'écoulement « écoulement transitoire ».)

Cette séparation entre écoulement turbulent et laminaire doit être nuancée :

– si à partir d'un écoulement laminaire on ouvre lentement la vanne d'alimentation, l'écoulement pourra rester laminaire jusqu'à environ 4 000.

– inversement, si à partir d'un écoulement turbulent on ferme lentement la vanne d'alimentation, l'écoulement pourra rester turbulent jusqu'à environ 1 500.

L'ordre de grandeur du nombre de Reynolds peut varier dans des proportions importantes, de 10^3 à 10^7 , voire 10^8 . (À titre d'exemple pour de l'eau à 80 °C, à pression atmosphérique (v est alors égal à 0,37 cSt), circulant dans une conduite de 0,75 m avec une vitesse de 5 m/s : $Re = 1,01 \cdot 10^7$.)

La rugosité relative désigne le rapport de la rugosité — valeur moyenne des aspérités internes de la conduite — au diamètre. Une rugosité relative au-delà de 0,3 % ne peut plus être considérée comme négligeable. (La rugosité peut varier de 1,5 µm pour des tuyaux étirés sans soudure, en laiton, en cuivre ou en plomb, jusqu'à plus de 5 mm pour des tuyaux en mauvais état.)

Dans le cas d'un écoulement turbulent, on démontre que la vitesse d'écoulement à une distance r de l'axe de la conduite est égale à :

$$V(r) = V_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}}$$

avec $\frac{1}{n} = 0,25 - 0,023 \log Re$ (expression souvent admise).

La vitesse moyenne sur un diamètre est :

$$V_{us} = \frac{1}{2R} \int_{-R}^{R} V_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} dr = \frac{n}{n+1} V_0$$

En intégrant par parties, l'expression de la vitesse moyenne par rapport à la section est :

$$\bar{V} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r V_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} dr = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} V_0$$

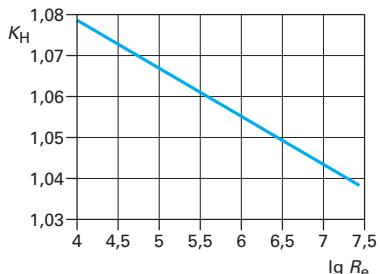
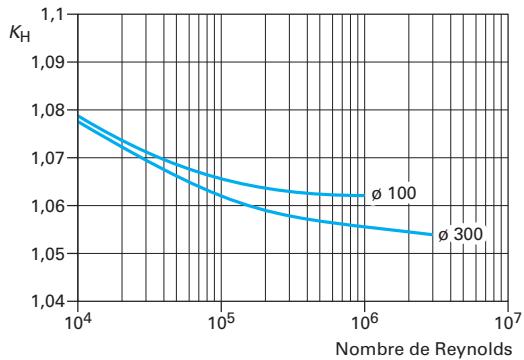
L'expression donnant le coefficient hydraulique est donc :

$$K_H = \frac{\frac{n}{n+1} V_0}{\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} V_0} = \frac{2n+1}{2n} \quad (8)$$

Cette expression, connue sous le nom de « modèle de Prandtl », laisse supposer que K_H tend vers 1 lorsque le nombre de Reynolds devient très important (figure 21).

En réalité, les études réalisées dans les années 30-50 par différents physiciens : Nikuradze, Prandtl, Von Karman, Colebrook... montrent que la présence d'une **sous-couche turbulente** (voir encadré ci-après) rugueuse entraîne un aplatissement de la courbe vers une limite qui dépend du diamètre de la conduite, ou plus exactement de sa rugosité relative.

Le modèle de Prandtl a donc été complété par un modèle qui tient compte de l'effet de la rugosité.

Figure 21 – Allure de K_H en fonction de Re selon le modèle de PrandtlFigure 22 – Aplatissement de la courbe $K_H(Re)$ dû à la présence d'une sous-couche turbulente rugueuse (document Ultraflux)

La figure 22 montre deux exemples de courbe K_H en fonction de Re pour deux valeurs de diamètre (courbes établies pour une rugosité de 0,1 mm).

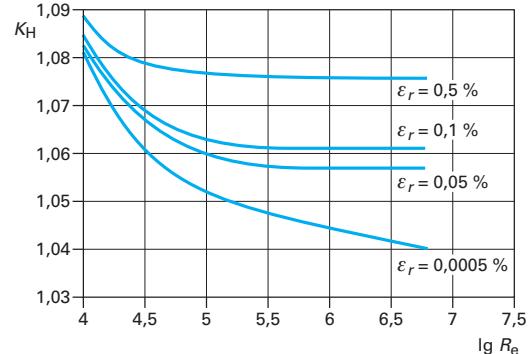
Remarque : la figure 23 montre l'influence de la rugosité relative sur K_H .

On peut voir sur cette figure qu'une dégradation de la conduite d'un facteur 10 (rugosité relative passant de 0,1 % à 1 %) entraîne pour $Re = 10^5$ une variation de K_H , et donc de la mesure, de l'ordre de 1,4 %.

En régime turbulent, il existe à proximité immédiate de la paroi une couche dans laquelle l'écoulement est laminaire et dont l'épaisseur varie (en général, quelques dixièmes de millimètre) en sens inverse du nombre de Reynolds.

Cette couche peut elle-même devenir turbulente si la rugosité de la conduite est plus importante que l'épaisseur de la couche. L'écoulement est alors désigné par écoulement turbulent rugueux. (L'écoulement est dit turbulent lisse si la rugosité est inférieure à l'épaisseur de la couche laminaire qui n'est alors pas perturbée par la rugosité.)

Important : le calcul de K_H ne peut s'effectuer de façon précise que si les conditions d'écoulement sont proches du modèle théorique. D'où la nécessité de respecter scrupuleusement les longueurs droites amont et aval préconisées (les recommandations couram-

Figure 23 – Influence de la rugosité relative sur K_H

ment admises sont de se placer à 10-15D d'une singularité située en amont et à 5D d'une singularité située en aval.).

2.2.5 Expression complète du débit volumique en mesure monocorde

Le débit volumique étant égal au produit $S \cdot \bar{V}$

avec S section interne de la conduite,
l'expression complète du débit volumique dans une conduite circulaire est :

$$Q = \frac{\pi \mathcal{O}_{int}^2}{4} \cdot \frac{L^2}{2D} \cdot \frac{\Delta T}{T_{AB} - T_{BA}} \cdot \frac{1}{K_H} \quad (9)$$

Remarques

1. Le débit calculé est positif si le fluide s'écoule de la sonde désignée comme sonde amont à la sonde désignée comme sonde aval. Il est négatif si le fluide s'écoule en sens inverse.

2. L'expression ci-dessus montre l'importance des paramètres géométriques \mathcal{O}_{int} , L et D du point de vue de la précision : 1 % d'erreur sur \mathcal{O}_{int} ou L entraîne 2 % d'erreur sur Q ; 1 % d'erreur sur D entraîne une erreur de 1 % sur Q .

3. La détermination du diamètre intérieur se fait habituellement à partir de la circonférence et de l'épaisseur de la conduite.

Si l'épaisseur n'est pas parfaitement connue (indication portée sur la conduite, mesure au pied à coulisse à l'occasion d'un démontage de la conduite), il faut utiliser un appareil de mesure d'épaisseur à ultrasons ou, éventuellement, la fonction de mesure d'épaisseur qu'on trouve dans certains débitmètres portables (par exemple, Digisonic ou Minisonic P d'Ultraflux, PT868 de Panametrics, 1010 DP de Controlotron).

Lorsque le constructeur du débitmètre utilisé propose dans sa gamme un débitmètre portable possédant cette fonction, il est recommandé d'utiliser ce dernier pour mesurer l'épaisseur de la conduite, plutôt qu'un mesureur d'épaisseur d'un autre fabricant.

En effet, le débitmètre avec mesure d'épaisseur du fabricant possède normalement les mêmes tables de vitesses du son que le débitmètre utilisé, ce qui garantit *in fine* la meilleure précision sur la mesure de débit. (Il peut y avoir des différences notables d'une nuance à l'autre d'un même métal, et les tables du mesureur d'épaisseur peuvent ne pas correspondre à celles du débitmètre utilisé.)

4. Pour les sondes intrusives, le paramètre D réel est mesuré sur l'installation, L étant calculé à partir de \mathcal{O}_{int} et de D .

Pour les sondes externes, la distance D à appliquer ainsi que la longueur L est le plus souvent calculé par l'appareil en fonction notamment des dimensions de la conduite et des caractéristiques des sondes utilisées.

Plusieurs méthodes mathématiques permettent de résoudre ce problème (Newton, Tchebytchev, Gauss-Jacobi, Gauss), les méthodes d'intégration de Gauss-Jacobi et la méthode de Gauss, toutes deux basées sur le calcul des coefficients de Legendre, étant les plus utilisées car elles procurent la meilleure précision avec un nombre minimal de plans de mesure.

2.2.6 Calcul du débit volumique en mesure multicorde

Dans le cas d'une mesure effectuée à l'aide de plusieurs cordes en plan diamétral, le débit volumique est obtenu en calculant la moyenne des débits correspondant à chaque corde :

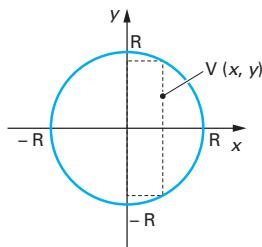
$$Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{\pi \mathcal{O}_{\text{int}}^2}{8} \cdot \frac{1}{K_H} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{D_i} \cdot \frac{\Delta T_i}{T_{AB_i} \cdot T_{BA_i}}$$

2.3 Mesure du débit par plans parallèles

2.3.1 Principe général

Soit une conduite de rayon R .

La vitesse moyenne par rapport à la section (\bar{V}) est calculée en intégrant d'abord la vitesse le long d'une corde d'abscisse x puis en intégrant celle-ci sur toute la section ($V(x, y)$ représente la vitesse en un point de coordonnées (x, y)) :



$$\bar{V} = \frac{1}{\pi R^2} \int_{-R}^R \left[\int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} V(x, y) dy \right] dx$$

La vitesse moyenne le long d'une abscisse x étant égale à :

$$V_x = \frac{1}{2\sqrt{R^2-x^2}} \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} V(x, y) dy$$

on obtient

$$\bar{V} = \frac{2}{\pi R^2} \int_{-R}^R V_x \sqrt{R^2-x^2} dx = \frac{2}{\pi R^2} \int_{-R}^R F(x) dx$$

Les mesures V_{x_i} effectuées dans des plans parallèles d'abscisse x_i permettent de connaître les valeurs $F(x_i)$ correspondantes.

Le problème consiste donc à calculer l'intégrale d'une fonction $F(x)$ dont on connaît un nombre n de valeurs discrètes.

2.3.2 Expression du débit

Dans le cas d'une mesure par plans parallèles, la vitesse moyenne sur toute la section est égale à la somme pondérée des vitesses mesurées par les cordes, les coefficients de pondération C_i dépendant de la méthode d'intégration choisie et du nombre de cordes :

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot V_i \quad (10)$$

expression dans laquelle

$$V_i = \frac{L_i^2}{2D_i} \cdot \frac{\Delta T_i}{T_{AB_i} \cdot T_{BA_i}}$$

avec L_i longueur du parcours acoustique de la corde,
 D_i projection de cette longueur sur l'axe de la conduite.

Le débit volumique pour une conduite circulaire est alors égal à :

$$Q_v = \frac{\pi \mathcal{O}_{\text{int}}^2}{4} \sum_{i=1}^n C_i \cdot \frac{L_i^2}{2D_i} \cdot \frac{\Delta T_i}{T_{AB_i} \cdot T_{BA_i}}$$

2.3.3 Coefficients correspondant aux méthodes de Gauss-Jacobi et de Gauss

La méthode de Gauss-Jacobi donne, pour un même nombre de cordes, de bien meilleurs résultats que la méthode de Gauss (cf. figure 25) et est réservée à un nombre pair de cordes, en pratique deux ou quatre, voire six en croisant les deux cordes centrales. (Pour un nombre de cordes plus élevé, il devient très difficile de placer les cordes les plus éloignées du centre de la conduite.)

La méthode de Gauss est quant à elle utilisée avec deux à six cordes.

Les tableaux 7 et 8 indiquent pour chacune de ces deux méthodes la position théorique des cordes par rapport au plan diamétral central ainsi que les coefficients C_i à appliquer :

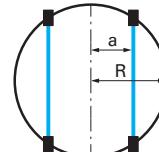


Tableau 7 – Coefficients calculés par la méthode de Gauss-Jacobi (conduite circulaire)

	a/R	C_i
Deux cordes	+ et - 0,5	0,5
Quatre cordes	+ et - 0,309 0	0,361 8
	+ et - 0,809 0	0,138 2

Tableau 8 – Coefficients calculés par la méthode de Gauss (conduite circulaire)

	a/R	C_i
Deux cordes	+ et - 0,577 4	0,519
Trois cordes	0	0,565 8
	+ et - 0,775	0,223 4
Quatre cordes	+ et - 0,340 0	0,390 4
	+ et - 0,861 1	0,112 6
Cinq cordes	0	0,362
	+ et - 0,536 5	0,258 8
	+ et - 0,906 7	0,064
Six cordes	+ et - 0,238 6	0,289 2
	+ et - 0,661 2	0,172 3
	+ et - 0,932 5	0,039

2.3.4 Correction des coefficients en fonction de la position réelle des cordes

Après installation des cordes, il est nécessaire de contrôler la position réelle de chacune d'elles.

En effet, des erreurs de fabrication peuvent entraîner de légères variations par rapport aux positions théoriques.

Si une ou plusieurs cordes s'écartent de la position théorique, il existe des méthodes permettant de recalculer les coefficients C_i effectifs à appliquer.

Par exemple, l'abaque ci-dessous permet de déterminer le coefficient à appliquer en fonction de la position réelle d'une corde dans le cas d'une mesure par deux cordes parallèles effectuée selon la méthode de Gauss-Jacobi (figure 24).

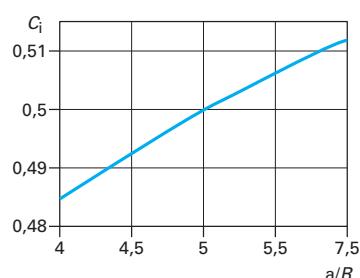


Figure 24 – Correction à appliquer dans le cas de deux cordes parallèles (méthode de Gauss-Jacobi) (document Ultraflux)

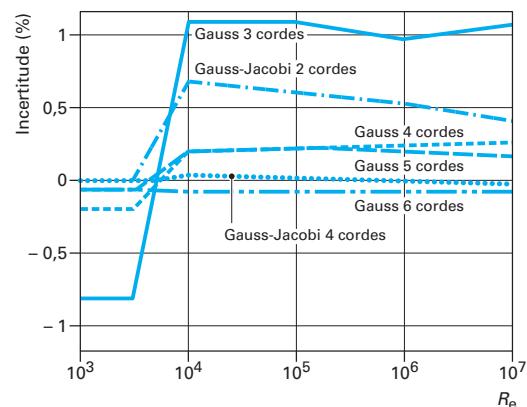


Figure 25 – Incertitude générée par les principales configurations de Gauss et de Gauss-Jacobi (document Ultraflux)

2.3.5 Comparaison entre les méthodes de Gauss-Jacobi et de Gauss

La figure 25 montre l'incertitude correspondant à plusieurs configurations en fonction du nombre de Reynolds et illustre la supériorité de la méthode de Gauss-Jacobi sur la méthode de Gauss.

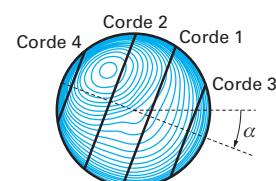
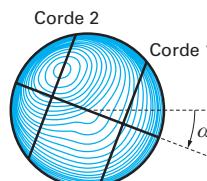
2.3.6 Influence de la rotation des cordes

Soit une modélisation de profil de vitesses ayant l'allure figure 26.

On voit aisément que ce type de profil n'est pas adapté à une mesure monocorde, la vitesse calculée le long de la corde dépendant de façon très sensible de l'orientation de la corde par rapport au sommet du profil de vitesses (figures 27 a et 27 b).

Pour obtenir une mesure pratiquement indépendante de l'orientation des cordes, il faut utiliser plusieurs cordes diamétrales croisées ou plusieurs cordes parallèles (figures 28 a et 28 b).

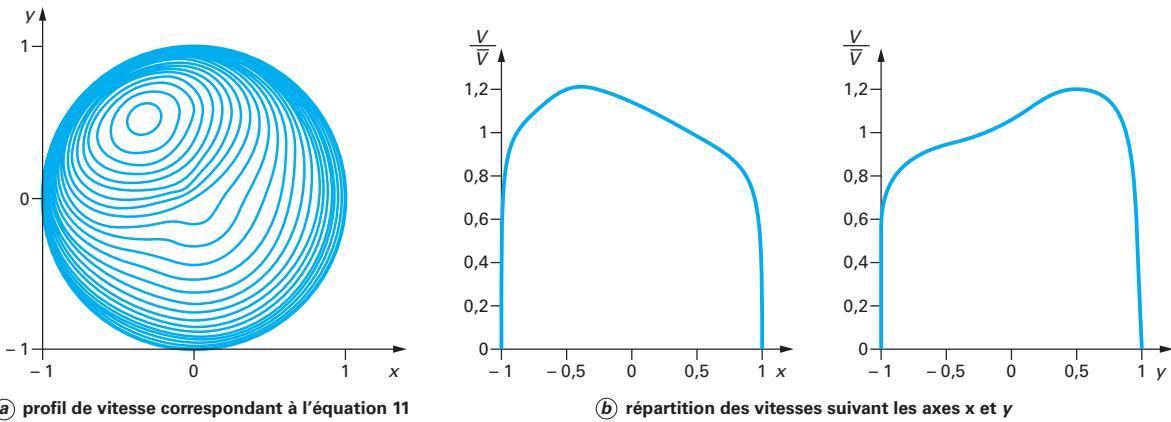
Les figures 29 et 30 montrent en fonction de l'orientation des cordes la vitesse calculée pour chaque corde ainsi que la vitesse moyenne dans le cas d'une mesure par deux ou quatre cordes parallèles effectuée selon la méthode de Gauss-Jacobi.



2.4 Variantes existantes en conduite pleine

2.4.1 Trajet hélicoïdal de l'onde ultrasonore

Aux deux techniques de base (mesure par plans diamétraux et mesure par plans parallèles) s'ajoute une troisième technique



Profil extrait des minutes du « *4th Practical Developments in Gas Flow Metering Workshop* ».

$$V(r, \theta) = (1 - r)^{1/9} + \frac{4r}{10\pi} (1 - r)^{1/4} (\theta^2 - 1)(1 - \cos \theta)^2$$

avec $\theta \in [0, 2\pi]$ et $r \in [0, 1]$

Figure 26 – Profil de vitesses utilisé pour illustrer l'influence de la rotation des cordes

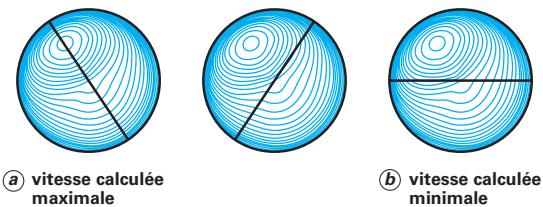


Figure 27 – Vitesse calculée tributaire de l'orientation de la corde

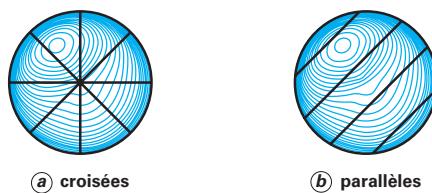


Figure 28 – Mesure par quatre cordes

consistant à utiliser des cordes « tournantes » se réfléchissant plusieurs fois dans la manchette de mesure dans des plans différents (figure 31).

Cette technique, utilisable pour des conduites de diamètre moyen (de l'ordre de 150 mm), permet une bonne prise en compte du profil de vitesses, si distordu soit-il, et permet une réalisation plus aisée des manchettes de mesure.

De plus, l'allongement des temps de parcours améliore la détermination des différences de temps de transit et donc la précision de la mesure.

2.4.2 Prise en compte d'une composante radiale de la vitesse d'écoulement

En mesure diamétrale monocorde, une composante radiale de la vitesse d'écoulement entraîne, suivant son orientation, soit un sous-comptage (débit mesuré inférieur au débit réel), soit un sur-comptage (débit mesuré supérieur au débit réel).

Dans le premier cas (figure 32) :

$$\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} = \frac{2V_L \cos \alpha - 2V_T \sin \alpha}{L}$$

Le débit calculé est inférieur au débit sans composante radiale, d'où sous-comptage.

Dans le deuxième cas (figure 33) :

$$\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} = \frac{2V_L \cos \alpha + 2V_T \sin \alpha}{L}$$

Le débit calculé est supérieur au débit sans composante radiale, d'où sur-comptage.

La mesure de la composante radiale est effectuée en plaçant deux sondes planes (transmission perpendiculaire à l'axe de la conduite) diamétralement opposées, sans décalage par rapport à l'axe de la conduite (figure 34).

$$T_{A'B'} = \frac{\phi_{int}}{C - V_T} \text{ et } T_{A'B'} = \frac{\phi_{int}}{C + V_T} \text{ d'où}$$

$$V_T = \frac{\phi_{int}}{2} \left[\frac{1}{T_{B'A'}} - \frac{1}{T_{A'B'}} \right] = \frac{\phi_{int}}{2} \cdot \frac{\Delta T'}{T_{B'A'} \cdot T_{A'B'}}$$

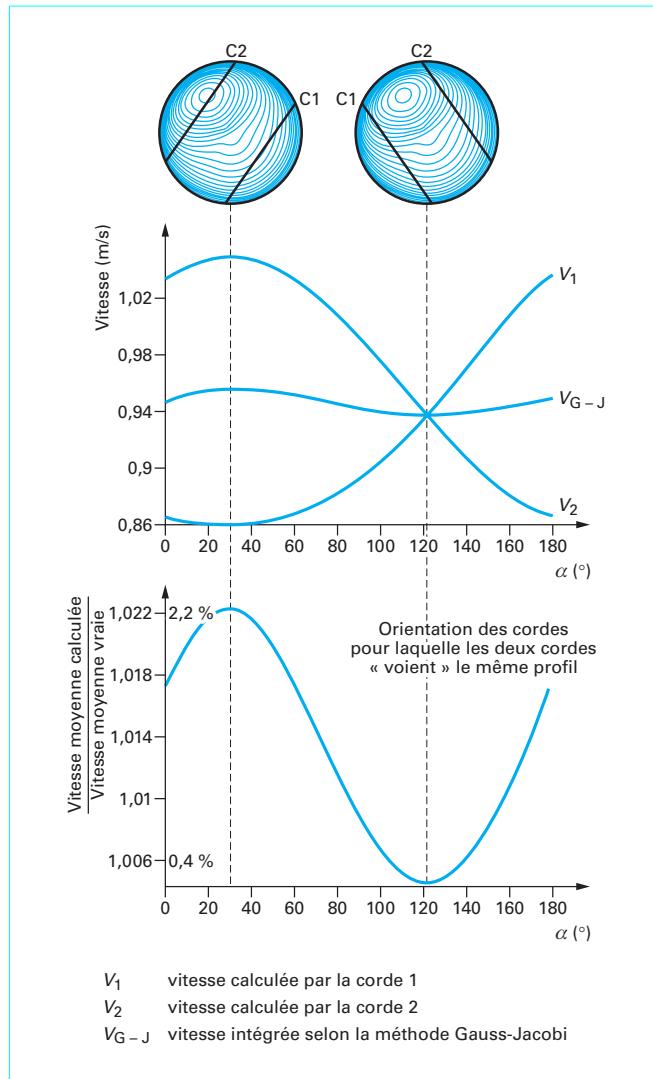


Figure 29 – Incidence de la rotation de deux cordes (méthode de Gauss-Jacobi) (document Ultraflux)

Si la composante transversale est dirigée vers le bas, la valeur de V_T est négative.

Remarque : en faisant tourner les sondes autour de la conduite, on peut avoir une idée relativement précise du profil de vitesses à l'endroit de la mesure. Dans le cas d'une mesure monocorde, il faut alors placer la corde dans un plan où la vitesse transversale est nulle (ou tout au moins minimale).

Le principe de la mesure avec compensation radiale (figure 35) de la vitesse consiste à placer deux paires de sondes, une paire de sondes obliques montées en mode direct et une paire de sondes planes permettant de mesurer la valeur de la composante radiale de la vitesse.

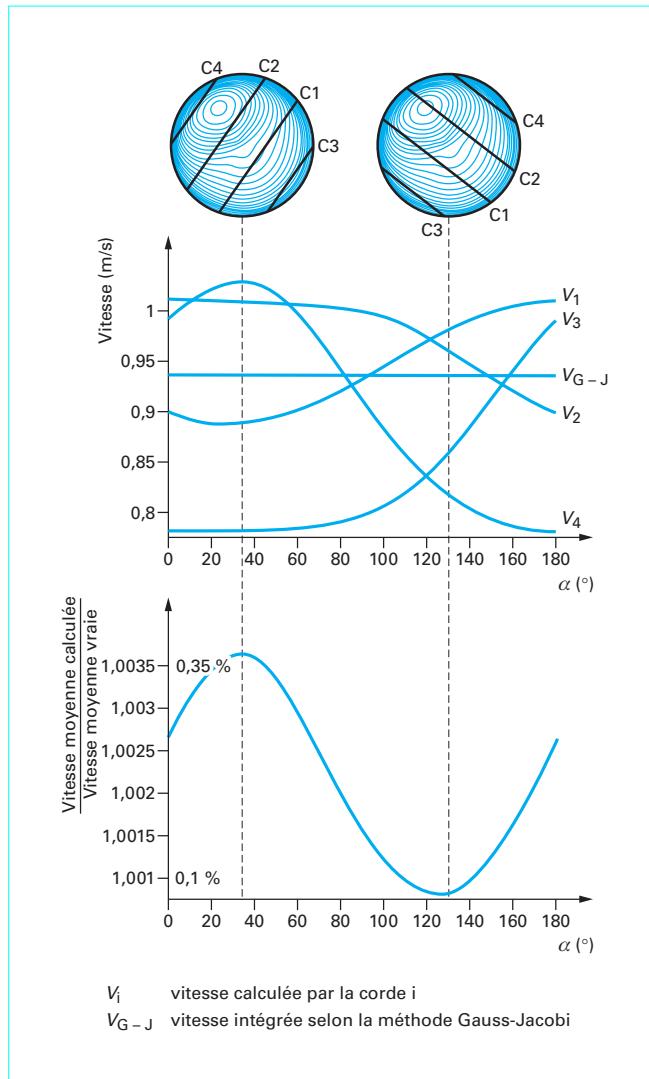


Figure 30 – Incidence de la rotation de quatre cordes (méthode de Gauss-Jacobi) (document Ultraflux)

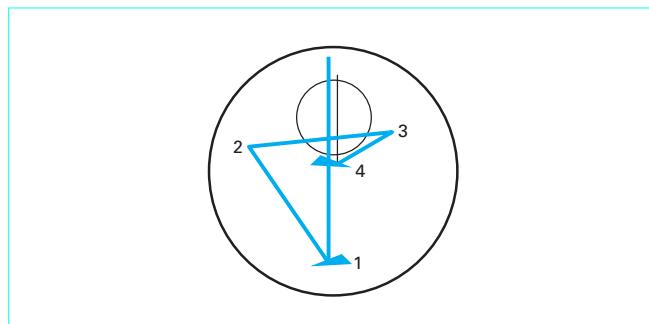


Figure 31 – Manchette à section ronde avec quatre réflexions, deux fois sur la paroi et deux fois sur un réflecteur (document Siemens)

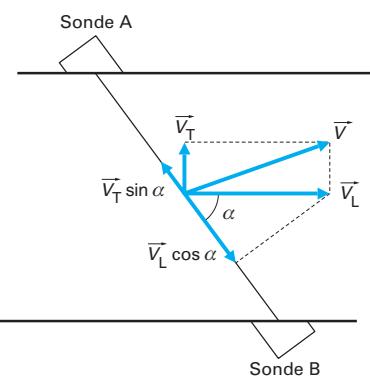


Figure 32 – Composante radiale entraînant un sous-comptage

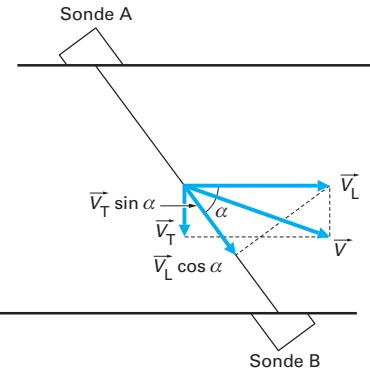


Figure 33 – Composante radiale entraînant un sur-comptage

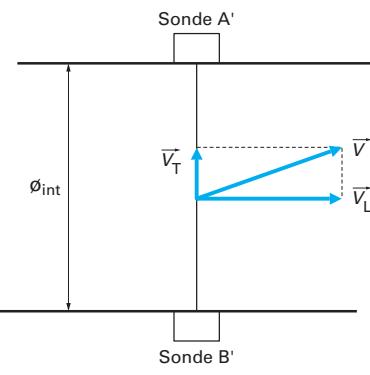


Figure 34 – Principe de mesure de la vitesse transversale

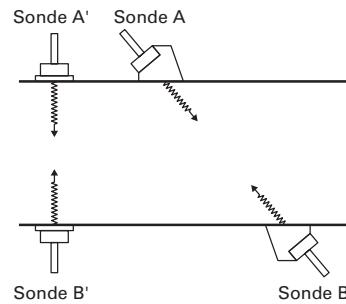


Figure 35 – Principe de la mesure avec prise en compte de la composante radiale (document Caldon)

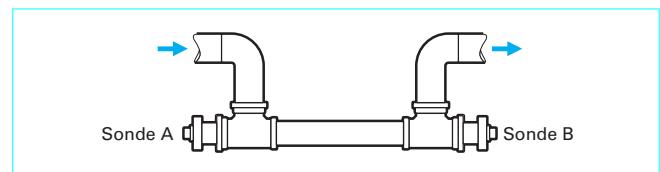


Figure 36 – Manchette en U

Connaissant la valeur V_T de la composante radiale, la relation :

$$\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} = \frac{2}{L} (V_L \cos \alpha + V_T \sin \alpha)$$

permet de déduire la vitesse axiale V_L .

$$V_L = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left(\frac{\Delta T}{T_{AB} \cdot T_{BA}} \right) - V_T \tan \alpha$$

Remarque : il n'est pas nécessaire que les deux trajets, trajet de mesure et trajet radial, soient dans le même plan.

2.4.3 Mesure à l'aide d'une manchette en U

Pour des petits diamètres et de petits débits, il est possible d'utiliser une manchette en U (figure 36) (appelée aussi manchette bypass ou manchette offset axiale) avec sondes dans l'axe de l'écoulement.

L'expression du débit est alors simplifiée dans la mesure où le trajet acoustique est parallèle à l'axe de l'écoulement :

$$T_{AB} = \frac{L}{C+V} \text{ et } T_{BA} = \frac{L}{C-V}$$

$$\text{D'où } V = \frac{2}{L} \cdot \frac{\Delta T}{T_{BA} - T_{AB}}$$

$$\text{et } Q = \frac{\pi \phi_{int}^2}{2} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta T}{T_{BA} \cdot T_{AB}}$$

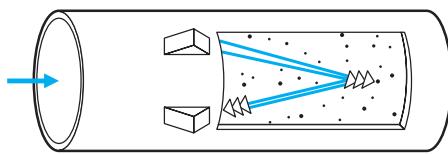


Figure 37 – Réflexion sur particules, bulles, gouttes... et différence de temps de transit (document Panametrics)

Remarque : la vitesse mesurée par cette technique est la vitesse moyenne correspondant à l'axe de la manchette.

Pour obtenir la vitesse moyenne sur la section, il est nécessaire d'appliquer un coefficient correctif qui dépend des conditions d'entrée et de sortie de la manchette et qui est en général déterminé expérimentalement.

2.4.4 Technique mixant différence de temps de transit et réflexion de l'onde sur les bulles et particules

Cette technique (*Transflection de Panametrics*) utilise deux sondes externes ou mouillées orientées dans le même sens et placées côté à côté (pour des conduites de diamètre supérieur à 100 mm), ou diamétriquement opposées (pour des conduites de diamètre inférieur à 100 mm), l'une des sondes étant toujours émettrice, l'autre toujours réceptrice.

La sonde émettrice envoie des impulsions ultrasonores à des intervalles très rapides (environ un millier d'impulsions par seconde).

Ces signaux sont réfléchis par les particules, bulles et gouttelettes éventuelles d'un autre liquide (par exemple gouttelettes d'huile présentes dans un écoulement d'eau) véhiculées au centre de la conduite par le liquide mesuré et sont recueillis par la sonde réceptrice (figure 37).

Chaque groupe d'impulsions reçues représente une « photographie instantanée » de l'écoulement. En comparant tous ces instantanés, le débitmètre repère les objets qui semblent ne pas se déplacer avec le liquide et les « sort » de la mesure.

Le débitmètre analyse alors le mouvement des objets restants à l'aide d'instantanés successifs afin de déterminer la direction de l'écoulement et la valeur du débit.

Cette technique permet de mesurer avec une incertitude de 2 à 5 % le débit d'eaux d'égoût non traitées, de boues, de pâtes, de sables bitumineux, de mélanges huile-eau-gaz, de liquides absorbants acoustiques...

2.5 Spécificités de certaines mesures

2.5.1 Mesure de débit de vapeur

La principale difficulté d'une mesure de débit de vapeur par ultrasons réside dans la température élevée du fluide mesuré, température qui dépasse sensiblement la température de Curie des matériaux piézo-électriques des sondes (cf. § 2.1.3).

Cette limitation est actuellement levée (débitmètre GS868 de Panametrics) grâce à des guides d'onde spécialement conçus pour des températures élevées de gaz et de vapeur. (Du fait de l'écart

très important entre les impédances acoustiques des métaux et des gaz, il n'existe pas auparavant de guides d'onde applicables aux gaz.)

Ces guides d'onde sont composés d'une gaine en acier inoxydable à l'intérieur de laquelle sont insérées plusieurs centaines de fils d'acier constituant autant de « fibres acoustiques », par analogie aux fibres optiques, et permettant de véhiculer les ondes ultrasonores sans altération.

Cette technique permet de mesurer des débits de vapeur à des températures de service allant jusqu'à 500 °C.

2.5.2 Mesure de débit de gaz

Du fait d'un ensemble d'avantages intéressants (incertitude réduite, possibilité de mesurer le débit dans les deux sens d'écoulement sans ajout d'option, facilité d'installation...), les débitmètres à ultrasons appliqués aux mesures de débit de gaz naturel se développent de façon importante, notamment dans le domaine du transport et du comptage transactionnel industriel.

Remarque : les USA sont le marché sur lequel les débitmètres à ultrasons appliqués aux mesures de débit de gaz se développent le plus, en particulier en vue d'obtenir une meilleure prise en compte des faibles débits.

Les autres pays ou régions où la mesure de débit de gaz par ultrasons connaît une croissance rapide sont les pays en voie de développement, notamment la Chine et les pays du Moyen-Orient.

La spécificité fondamentale de la mesure de débit de gaz par ultrasons réside, d'une part, dans la faible impédance acoustique des gaz, en particulier à faible pression (cf. § 1.7), d'autre part, dans le fait que les gaz sont plus absorbants vis-à-vis des ondes ultrasonores que les liquides.

- Le caractère absorbant des gaz nécessite des fréquences de travail plus faibles que pour les liquides, typiquement entre 100 et 500 kHz. (Rappel : l'absorption d'une onde ultrasonore est proportionnelle au carré de la fréquence de l'onde.)

Remarque : contrairement à ce qu'on pourrait penser, la diminution de la fréquence de travail n'entraîne pas de détérioration de la précision.

En effet, la célérité dans un gaz étant pratiquement quatre fois moindre que dans un liquide (environ 400 m/s dans un gaz à pression atmosphérique, environ 1 500 m/s dans un liquide), et la vitesse d'écoulement des gaz étant de l'ordre de cinq-dix fois celle des liquides (couramment 10-15 m/s pour les gaz, rarement plus de 5 m/s pour les liquides), la différence de temps de transit ΔT est pour les gaz 20 à 100 fois plus importante que pour les liquides.

- La faible impédance acoustique des gaz nécessite de définir avec soin l'adaptation d'impédance des sondes en fonction des conditions de service prévisibles du gaz mesuré.

Théoriquement, l'adaptation entre deux milieux d'impédances Z_1 et Z_2 est réalisée en intercalant entre les deux milieux une lamelle dont l'épaisseur est égale au quart de la longueur d'onde dans la lamelle et dont l'impédance acoustique est égale à $\sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$.

Dans la mesure où cette dernière condition ne peut être obtenue pour des solides, une solution approchée consiste à réaliser la lamelle dans un matériau de faible densité et dans lequel la célérité est faible (résine ou matériau thermoplastique).

- La grande différence d'impédance acoustique entre les matériaux utilisés pour les conduites et les gaz impose pratiquement

d'utiliser des sondes intrusives, l'utilisation de sondes externes pour la mesure de débit de gaz se heurtant à la difficulté que pose la réflexion d'une grande partie de l'onde lors des interfaces paroi-gaz.

Cette difficulté de fond a cependant été résolue en 2001 par la société Panametrics (débitmètre GC868) qui a développé des sondes externes beaucoup plus puissantes et un traitement du signal permettant d'exploiter le faible rapport signal/bruit, grâce notamment à une horloge capable de mesurer la picoseconde.

- L'énergie acoustique transmise à travers un gaz augmente avec l'impédance acoustique de ce gaz.

Or, l'impédance acoustique d'un gaz augmente avec la pression du fait notamment de l'augmentation de la masse volumique.

Pour un gaz de masse molaire M , la masse volumique est approximativement égale à PM/RT , R étant la constante des gaz parfaits.

L'énergie acoustique transmise est de ce fait d'autant plus importante que la pression est élevée. À titre d'exemple, la transmission acoustique dans du gaz naturel sera environ 40 fois meilleure à 60 bars qu'à pression atmosphérique, ce qui signifie que plus la pression est élevée, plus le diamètre maximal possible est important.

Par exemple, le diamètre maximal permettant une mesure à 1 bar est d'environ 100 mm pour des sondes travaillant à une fréquence de 200 kHz. Il peut atteindre 1 m à 30 bars pour la même fréquence de travail.

Outre ces différents points liés à la faible impédance acoustique des gaz et au fait que les gaz soient absorbants, il faut aussi noter que la célérité moindre et la vitesse d'écoulement plus élevée que pour les liquides entraînent une déviation du faisceau émis et donc une perte d'énergie par la sonde réceptrice. Les sondes doivent donc être conçues pour assurer le plus grand cône d'émission possible.

2.5.3 Mesure de débit d'air

■ Utilisation d'un anémomètre à ultrasons

Pour permettre de mesurer le débit d'air dans des conduits de ventilation, la société Airflow a développé un anémomètre à ultrasons (Anemosonic) reprenant globalement le principe de mesure par différence de temps de transit : deux sondes ultrasonores alternativement émettrice et réceptrices sont placées à une distance L l'une de l'autre dans un plan faisant un angle α avec l'écoulement (figure 38).

Les deux relations :

$$C + V \cos \alpha = \frac{L}{T_{AB}} \text{ et } C - V \cos \alpha = \frac{L}{T_{BA}}$$

permettent de déduire la vitesse d'écoulement V :

$$V = \frac{L}{\cos \alpha} \cdot \frac{\Delta T}{T_{AB} - T_{BA}}$$

En pratique, deux sondes ne sont pas suffisantes dans la mesure où l'angle α ne peut être connu *a priori*.

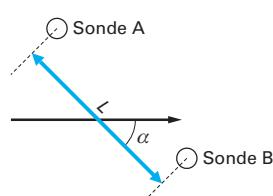


Figure 38 – Principe d'un anémomètre à ultrasons

C'est pourquoi l'anémomètre est constitué de trois sondes disposées en triangle équilatéral, la vitesse étant déterminée par trois mesures successives effectuées entre chacune des paires.

■ Utilisation de sondes externes

Les sondes externes développées par Panametrics (cf. § 2.5.2) sont aussi applicables en mesure de débit d'air.

Cependant, leur utilisation est actuellement limitée par le fait que pour des canalisations en métal (acier ou inox), la mesure ne peut être effectuée que pour des pressions supérieures à 6 bars. (Si la conduite n'est pas métallique, la mesure peut être réalisée à pression atmosphérique.)

La majorité des conduits aérauliques étant en métal, les sondes externes ne sont donc utilisables pour l'instant en air de ventilation qu'à la condition de prévoir à l'endroit de la mesure des portions de conduite non-métalliques.

Par contre, ces sondes sont tout à fait adaptées à la mesure de débit d'air comprimé.

2.5.4 Mesure de débit de liquide chargé

La technique de mesure par différence de temps de transit n'est théoriquement pas adaptée à la mesure de débit de liquide fortement chargé de particules ou de bulles d'air. Cette affirmation doit toutefois être nuancée, car tout un ensemble de mesures ont pu être réalisées dans des conditions de liquide chargé. Il convient donc d'effectuer des essais sur site.

Remarques

1) Certains constructeurs indiquent le pourcentage en particules ou en bulles du liquide (en général 1 ou 2 %, parfois jusqu'à 7 %) au-dessus duquel la mesure risque de ne pas être possible.

Cette indication n'est cependant pas vraiment significative, car la possibilité de mesure dépend principalement de la taille des particules, de leur composition (sable, matières organiques, etc.) et de leur fréquence de passage...

Il vaut donc mieux demander un essai même lorsque le constructeur mentionne un pourcentage *a priori* faible.

2) Si le liquide est trop chargé ou trop aéré, on peut utiliser une technique particulière (par exemple Transflection de Panametrics, cf. § 2.4.4) ou passer en mesure par effet Doppler comme le permet Controlotron.

Ce constructeur a en effet développé une série d'appareils (série 1010) permettant de mesurer le débit soit par différence de temps de transit, soit par effet Doppler, suivant le degré de charge du liquide mesuré.

(Le choix de l'une ou l'autre des techniques peut être fait à la demande ou de façon automatique.)

Cette solution est particulièrement intéressante lorsque le liquide subit des variations importantes de turbidité, la technique de différence de transit n'étant pas vraiment applicable à des liquides chargés et la technique par effet Doppler n'étant pas véritablement adaptée à des liquides peu chargés.

La technique par effet Doppler (figure 39), utilisable uniquement sur des liquides chargés ou aérés (un générateur de bulles peut éventuellement être installé), consiste à mesurer la différence de fréquence entre une onde incidente et l'onde réfléchie par une particule ou une bulle en mouvement, cette différence de fréquence étant égale à :

$$\Delta f = \frac{v_p \cdot f_i \cdot \cos \theta}{c}$$

avec	f_i	fréquence incidente (fréquence constante et choisie en fonction de la taille des particules de façon à assurer la pénétration de l'onde dans le liquide),
	v_p	vitesse de la particule ou de la bulle,
	θ	l'angle de l'onde incidente avec l'axe de la conduite.

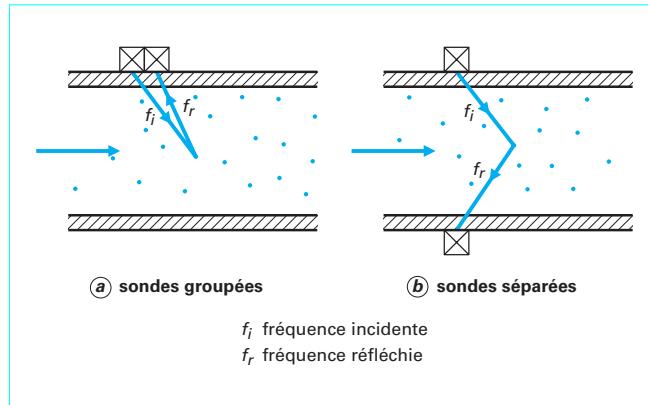


Figure 39 – Principe d'une mesure par effet Doppler

2.5.5 Mesure de débit de liquide visqueux

La mesure de débit de fluide visqueux par la technique de différence de temps de transit est tributaire des deux facteurs principaux :

- la viscosité (l'absorption d'une onde ultrasonore étant proportionnelle à la viscosité) ;
 - le diamètre de la conduite. (À la limite, le signal d'écho peut disparaître, ce qui rend la mesure impossible.)

À titre d'indication, on peut mesurer le débit d'un fluide de viscosité égale à 200 cSt transitant dans une conduite de 100 mm, ou le débit d'un fluide de viscosité égale à 500 cSt transitant dans une conduite de 25 mm. Au-delà de ces combinaisons de viscosité et de diamètre, des essais doivent être effectués au cas par cas. (Ordres de grandeur de viscosités :

- huile moteur à température ambiante 100 cSt ;
 - fuel lourd à 50 °C 550 : cSt ;
 - fuel lourd à 100 °C 40 : cSt.)

Remarque : les fluides visqueux s'écoulant généralement dans des conduites de diamètre peu important et à faible vitesse, l'écoulement est souvent laminaire ou à la limite entre laminaire et turbulent. Dans ce dernier cas, seul un appareil calculant le coefficient hydraulique K_H en écoulement transitatoire peut être utilisé pour des mesures en plans diamétraux.

2.6 Grandeurs d'influence

Une mesure de débit par différence de temps de transit peut-être influencée par un certain nombre de paramètres pouvant être regroupés en trois grandes catégories :

- paramètres concernant le fluide (nature du fluide, température, vitesse d'écoulement...) ;
- paramètres concernant la conduite (géométries amont et aval, matériau, diamètre...) ;
- paramètres concernant l'environnement (température et humidité ambiante, rayonnements ionisants, vibrations...).

2.6.1 Paramètres concernant le fluide

■ Nature du fluide

Un débitmètre à différence de temps de transit permet de mesurer le débit d'une grande variété de fluides : eau douce, eau de mer, eau lourde, acides, huiles, sodium liquide, produits pétroliers, gaz...

Les seules restrictions (devant cependant être nuancées) concernent les liquides fortement chargés ou fortement aérés (cf. § 2.5.4), les liquides fortement visqueux (cf. § 2.5.5) ainsi que les écoulements diphasiques.

Remarque : des techniques comme Transflection permettent aussi de traiter des écoulements di- ou multi-phasiques.

■ Température du fluide

En sondes intrusives, la limitation en température est principalement due à la température de Curie du matériau utilisé (cf. § 2.1.3). Des guides d'onde peuvent toutefois permettre l'utilisation de ces sondes à des températures de fluide élevées.

En sondes externes, la limitation vient d'une part de la température de Curie des sondes, d'autre part de la tenue en température du couplant utilisé (cf. § 2.7.4).

■ Variations de la température du fluide

Les variations de température peuvent avoir deux conséquences.

1) Une variation de température entraîne une variation de la viscosité cinématique du fluide et devrait donc entraîner en mesure par plans diamétraux un réajustement du coefficient hydraulique K_H :

$$\Delta \text{Temp} \Rightarrow \Delta v \Rightarrow \Delta Re \Rightarrow K_H$$

Exemple numérique : conduite d'eau de 300 mm, vitesse d'écoulement de 0,2 m/s, température passant de 20 °C ($\nu = 1 \text{ cSt}$) à 80 °C ($\nu = 0,37 \text{ cSt}$).

À 20 °C, le nombre de Reynolds est égal à 60 000. À 80 °C, il est égal à 160 000. Les deux valeurs de K_H sont respectivement 1,065 et 1,06. L'erreur sur le débit qui résulte d'un non réajustement de K_H est de 0,4 %.

2) Un autre risque d'erreur, plus important que le premier, est dû au fait que la variation de température du liquide entraîne une variation des vitesses du son dans les sondes, dans la paroi de la conduite et, surtout, dans le fluide.

D'où une modification des angles de parcours de l'onde pouvant provoquer, si la variation de température est trop importante, la perte du signal (figure 40).

Remarque : certains constructeurs, comme Panametrics ou Controlotron, ont mis au point des méthodes permettant de compenser ce décalage, notamment en appliquant des faisceaux d'onde élargis.

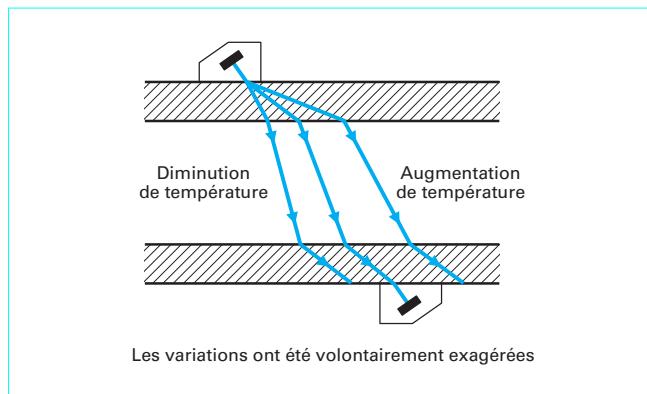


Figure 40 – Perte du signal du fait d'une variation importante de température

■ Pression du fluide

À température égale, la vitesse du son dans un liquide augmente légèrement avec la pression.

Par exemple, pour de l'eau pressurisée à 175 °C et 45 bar, la célérité $c = 1\,416 \text{ m/s}$; à 80 bar, $c = 1\,423 \text{ m/s}$.

Cette augmentation de la vitesse du son n'a cependant pas de conséquence sur la mesure.

■ Vitesse d'écoulement du fluide

Le problème se pose surtout pour les faibles vitesses (inférieures par exemple à 0,1 m/s), car la différence entre les temps de parcours de l'onde peut devenir très faible.

La résolution de l'appareil peut alors être insuffisante pour maintenir la précision à un niveau acceptable. (Cette difficulté est d'autant plus sensible que le diamètre de la conduite est faible.)

Pour ce qui est des vitesses élevées, les vitesses maximales mesurables pour les liquides avec les débitmètres courants sont de l'ordre de 10-12 m/s.

Pour les gaz, la vitesse maximale mesurable dépend : du cône d'émission du faisceau, de la fréquence de travail des sondes et du diamètre de la conduite.

Valeur typique : 40 m/s pour une fréquence de travail de 300 kHz et un diamètre de 250 mm.

2.6.2 Paramètres concernant la conduite

■ Longueurs droites disponibles

L'un des paramètres les plus importants est la localisation du point de mesure par rapport aux perturbations (appelées aussi singularités) amont et aval, car la méthode de mesure employée (monocorde ou multicorde, mode direct ou reflex, sondes intrusives ou externes), et donc le matériel, dépendent directement de ce choix. (cf. § 2.7.1 les longueurs droites types conseillées pour une mesure monocorde.)

■ Matériau composant la conduite

En sondes intrusives, le matériau de la conduite n'intervient normalement pas, le trajet acoustique étant entièrement compris dans le liquide. (Toutefois, dans le cas d'une mesure en mode reflex, la réflexion de l'onde peut être perturbée par un matériau présentant de fortes aspérités.)

En sondes externes, certains types de conduite peuvent présenter quelques difficultés du fait de leur atténuation acoustique :

- les aciers inoxydables moulés à forte épaisseur ;

- les aciers à revêtement de protection interne en néoprène ou en ciment ;
- les téflons ;
- les fibres polyesters d'épaisseur supérieure à 10 mm.

Ces cas ne sont pas insurmontables, les constructeurs proposant des sondes spécifiques à utiliser de préférence en mode direct.

Remarque : les conduites à structure mixte (béton et acier) type Bonna interdisent l'utilisation de sondes externes.

À l'inverse, les sondes externes peuvent être utilisées pour des conduites en fibrociment ou en ciment de faible épaisseur.

■ État de la surface interne de la conduite

Si la rugosité est trop importante, la mesure peut devenir réellement problématique du fait des multiples réflexions sur les aspérités de la paroi.

De plus, les dépôts de boue, de tartre... réduisent sensiblement la transmission acoustique. À la limite, des conduites anciennes et très entartrées peuvent rendre impossible l'utilisation de sondes externes.

■ Diamètre de la conduite

Les conduites de dimensions extrêmes, quelques dizaines de millimètres de diamètre intérieur ou, à l'inverse, près d'une dizaine de mètres, peuvent poser quelques difficultés.

Outre la difficulté que représente la mise en place des sondes (obligatoirement externes), la limitation vers les petits diamètres est liée au très faible temps de parcours de l'onde ultrasonore, ce qui nécessite d'augmenter, si l'état de la conduite le permet, le nombre de traverses (montage double reflex, voire multireflex).

C'est pourquoi il est conseillé d'utiliser des manchettes spécifiques pour petits diamètres.

La limitation vers les très gros diamètres résulte de l'atténuation subie par l'onde. (Les constructeurs permettent en général de réaliser des mesures sur des conduites de 5-6 m, voire davantage. Cependant, des mesures ont été réalisées aux États-Unis par Accusonic sur des « conduites » de l'ordre de 35 mètres !)

■ Épaisseur de la conduite

Une conduite très épaisse peut poser quelques difficultés :

- en sondes intrusives, en particulier à insertion, la profondeur du corps de sonde peut être insuffisante ;
- en sondes externes, le signal peut être fortement atténué par une épaisseur trop importante.

Remarque : les constructeurs indiquent parfois dans leurs notices l'épaisseur maximale possible en standard.

2.6.3 Paramètres concernant l'environnement

■ Température et humidité ambiantes

En sondes externes, une atmosphère trop sèche peut altérer le couplant qui, à la longue, peut perdre sa fonction, d'où une dégradation possible de la mesure.

Inversement, une humidité ambiante importante ou un ruissellement sur la conduite peut entraîner une dilution du couplant.

■ Vibrations et bruit

Des vibrations appliquées sur la conduite peuvent progressivement décaler les sondes l'une par rapport à l'autre et entraîner une mauvaise réception des signaux. (Ceci est surtout vrai pour les sondes externes, les sondes pouvant glisser sur le couplant, même si elles sont bien maintenues.)

D'autre part, si elles possèdent des composantes de fréquence élevée, c'est-à-dire du même ordre que la fréquence de travail des sondes, les vibrations peuvent perturber la mesure. C'est pourquoi certains constructeurs génèrent des ondes codées qui permettent de filtrer les signaux parasites.

■ Rayonnements électromagnétiques

Les rayonnements électromagnétiques n'ont pas d'influence sur le principe de mesure.

Il faut néanmoins prendre les précautions « classiques » :

- utiliser des câbles blindés ;
- éviter de placer des câbles à proximité ou, pire, parallèlement aux câbles de puissance.

■ Rayonnements ionisants

Certains constructeurs (par exemple Ultraflux) ont eu à réaliser des débitmètres supportant une ambiance fortement ionisante en y supprimant tout matériau pouvant être dégradé par les radiations.

2.7 Mise en œuvre d'une mesure en conduite pleine

Trois critères principaux doivent être respectés pour obtenir une mesure correcte :

- longueurs droites entre le point de mesure et les singularités amont et aval ;
- dans le cas d'un liquide, non-perturbation de la mesure par du gaz ou des particules en suspension ;
- dans le cas d'un gaz, non-perturbation de la mesure par du liquide.

2.7.1 Longueurs droites à respecter

■ Cas d'une mesure monocorde

L'utilisation d'une mesure monocorde suppose que :

- le profil de vitesses à l'endroit de la mesure soit symétrique par rapport à l'axe de la conduite ;
- pleinement développé ;
- stable.

Ces trois conditions ne sont plus vérifiées dans une zone d'écoulement perturbé, par exemple à la sortie d'un coude ou en aval d'une vanne de régulation (figure 41).

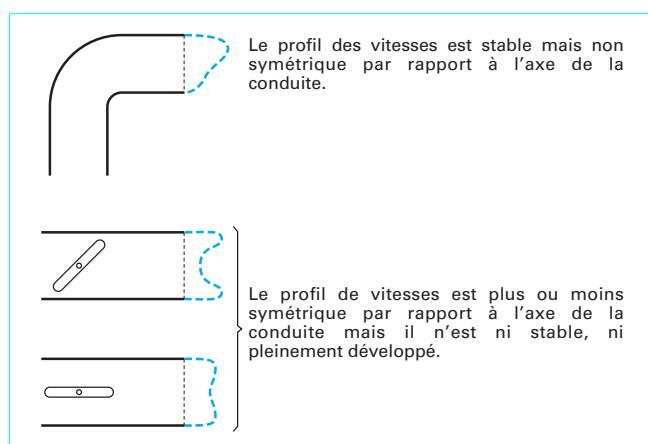
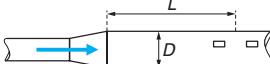
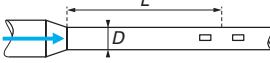
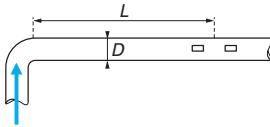
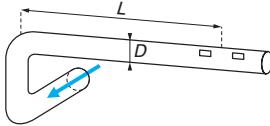
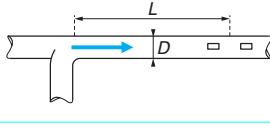
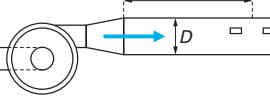


Figure 41 – Exemples de profil de vitesses perturbé

C'est pourquoi il est nécessaire de placer les sondes sur une portion droite de la conduite, suffisamment loin, en amont et en aval, d'une perturbation hydraulique (resserrement ou élargissement de la conduite, coude, pompe, etc.).

Les indications dans le tableau 9 montrent, pour les liquides, les distances minimales à respecter (L) en fonction du diamètre intérieur de la conduite (D) avant et après une perturbation pour que les erreurs induites par ces perturbations restent inférieures à $\pm 1\%$.

Tableau 9 – Longueurs droites pour une mesure monocorde de débit liquide (document Ultraflux)

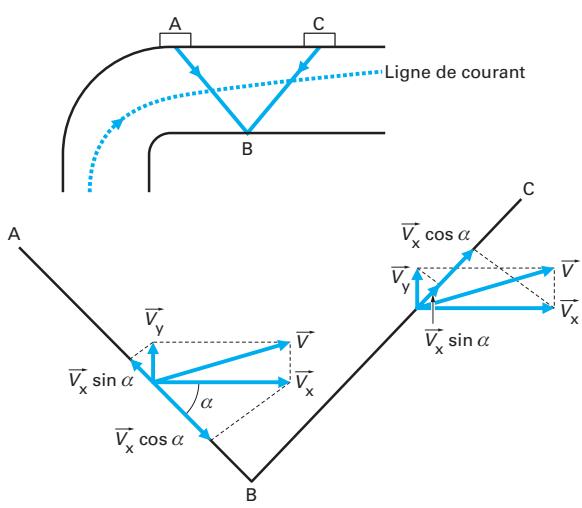
Après un divergent		En mode reflex $L > 30D$ direct $L > 40D$
Après un convergent		En mode reflex $L > 10D$ direct $L > 15D$
Après un coude simple		En mode reflex $L > 15D$ direct $L > 20D$
Après deux coude non coplanaires		En mode reflex $L > 15D$ direct $L > 30D$
Après une jonction de deux conduites		En mode reflex $L > 15D$ direct $L > 20D$
Après une vanne de régulation		En mode reflex $L > 15D$ direct $L > 20D$
Après une pompe		En mode reflex $L > 30D$ direct $L > 40D$
Avant une de ces singularités		En mode reflex $L > 3D$ direct $L > 5D$ sauf avant une vanne de régulation : En mode reflex $L > 5D$ direct $L > 8D$

Remarques

1. Les longueurs droites sont moins astreignantes en mode reflex car ce mode compense l'influence d'une composante radiale de vitesse lorsque le vecteur vitesse conserve la même direction sur les deux trajets, ce qui est généralement le cas aux vitesses élevées (figure 42).

2. Le tableau 9 est établi pour des sondes externes. Les longueurs droites à respecter sont un peu moins restrictives avec des sondes intrusives.

3. Dans le cas d'un gaz, les turbulences générées par une singularité restent actives sur des longueurs sensiblement plus importantes que pour un liquide. Il est donc nécessaire de multiplier ces indications de longueur droite par un facteur d'ordre 2,5.



Le terme d'erreur $V_x \sin \alpha$ se retranche à la vitesse utile le long du trajet AB et s'ajoute à celle-ci sur le trajet BC

Figure 42 – Compensation d'une composante radiale par le mode reflex

Cas d'une mesure multicorde

Comme une mesure multicorde permet de mieux intégrer les irrégularités du profil de vitesses, les mesures multicordes peuvent être utilisées avec des longueurs droites bien inférieures à celles nécessaires pour une mesure monocorde.

Par exemple, des essais réalisés sur une mesure effectuée à l'aide de quatre cordes parallèles placées à $1,6D$ d'un té suivi d'une vanne papillon ont montré que l'erreur dans ces conditions très défavorables était de 2 %.

Dans les mêmes conditions, une mesure monocorde aurait généré une erreur de l'ordre de 10 %.

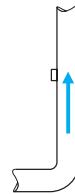
2.7.2 Non-perturbation d'une mesure de débit liquide par du gaz ou des particules en suspension

Les ondes ultrasonores franchissant difficilement les poches de gaz (cf. § 1.7), il faut veiller à ce que la conduite soit complètement remplie à l'endroit de la mesure, même à débit nul, et à ce que la mesure ne soit pas perturbée par le passage de poches de gaz.

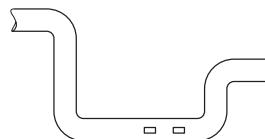
Nota : par souci de simplification, les figures qui suivent ne respectent pas les longueurs droites définies précédemment.

Emplacements recommandés

– Conduites verticales avec écoulement montant



– Conduites horizontales en point bas



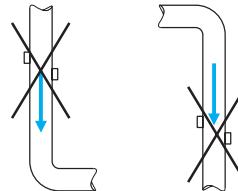
– Montage en siphon pour des conduites en pente légère



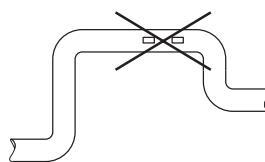
Nota : attention toutefois à la présence possible de vortex entre le second coude et le point de mesure.

Emplacements déconseillés

– Conduite verticale avec écoulement descendant, en particulier dans le cas d'un écoulement libre



– Points hauts



Remarque : même à fort débit et grande vitesse, on ne peut garantir que les portions de conduite en point haut sont entièrement remplies d'eau. Si le point de mesure ne peut être installé qu'en point haut, il faut prévoir une purge automatique.

Positionnement des sondes sur une conduite horizontale ou en faible pente

Il faut veiller à ce que les sondes ne soient pas installées sur les génératrices supérieures et inférieures de la conduite. (Les bulles de gaz circulent en partie haute de la conduite, les particules en suspension se déposent en partie basse.) (figure 43)

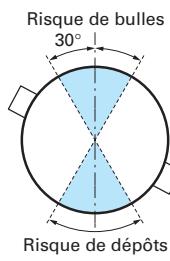
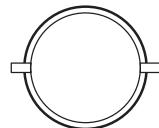


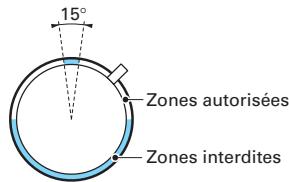
Figure 43 – Zones à éviter dans le cas d'une mesure de débit de liquide

2.7.3 Non-perturbation d'une mesure de débit de gaz par du liquide

En mode direct et sur une conduite horizontale, placer les sondes sur un plan horizontal.



En mode reflex et sur une conduite horizontale, éviter le haut et la moitié inférieure de la conduite.



Le haut de la conduite est à éviter car la réflexion de l'onde s'effectue dans une zone où risquent de s'écouler des condensats ou autres liquides.

La moitié basse de la conduite est à éviter car les écoulements liquides risquent de provoquer un pont acoustique entre les sondes et leur support (l'impédance acoustique des liquides n'étant pas très éloignée de celle des solides), ce qui propagerait l'onde dans la paroi de la conduite.

Ne placer des sondes sur une conduite verticale que si le gaz est parfaitement sec. (En effet, les condensats ruisselant sur la conduite peuvent s'accumuler au niveau des sondes, ce qui fausserait la mesure.)

2.7.4 Installation des sondes externes

Distance entre sondes

La majorité des appareils proposés par les constructeurs calculent la distance entre sondes à appliquer en fonction des paramètres principaux de la mesure :

- matériau et épaisseur de la conduite ;
- diamètre intérieur ;
- nature du liquide ;
- vitesse du son ;
- référence des sondes ;
- mode de travail, direct ou reflex.

Cette distance doit ensuite être reportée, soit directement sur la réglette maintenant les deux sondes si le diamètre de la conduite est peu important, soit en utilisant des techniques géométriques de tra-

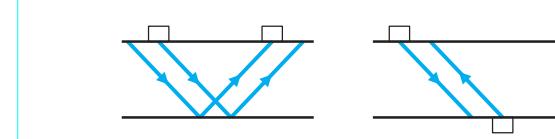


Figure 44 – Défauts de transmission dus à une distance entre sondes incorrecte

çage (il existe plusieurs méthodes de traçage, avec ou sans utilisation d'un gabarit, permettant de positionner précisément les sondes en mode direct ou en mode reflex).

Remarque : une distance incorrecte peut générer un défaut de réception des signaux ultrasonores (figure 44).

Ponçage de la conduite

Il est nécessaire de poncer soigneusement les parties de la conduite sur lesquelles doivent être posées les sondes, en particulier si elles présentent une surface rugueuse, ou si elles sont revêtues de plusieurs couches de peinture.

Utilisation d'un couplant acoustique

Afin de compenser la présence de petites poches d'air, entre la sonde et la paroi dues aux aspérités résiduelles de la paroi et assurer ainsi une bonne transmission de l'onde ultrasonore entre la sonde et la conduite, il est indispensable d'appliquer un couplant acoustique sur la face de la sonde en contact avec la paroi.

Il existe plusieurs types de couplant, principalement :

- gel ;
- graisse ;
- film polymère.

Le choix d'un type de couplant est fonction des conditions d'environnement (en particulier de la température de la conduite) et de la durée de la mesure :

– gel de couplage, comme ceux utilisés en contrôle non-destructif ou en échographie médicale, pour des mesures ponctuelles (quelques dizaines d'heures), ou pour des mesures sur des conduites dont la température est inférieure à 60-80 °C (sous réserve d'absence de ruissellement risquant à terme d'emporter le couplant) ;

– élastomère pour des mesures permanentes sur des conduites dont la température est de l'ordre de 60-80 °C, ce matériau présentant une bonne tenue aux intempéries (L'élastomère peut être éventuellement enduit sur ses deux faces de graisse de couplage.) ;

– graisse prévue pour de hautes températures si la température de la conduite dépasse 80-100 °C.

Remarques

1. Certains constructeurs (par exemple Panametrics) utilisent entre leurs guides d'onde et la conduite un film d'oxyde de zinc qui tient en utilisation permanente jusqu'à 350 °C.

2. Le couplant est en général livré par le constructeur en fonction du contexte de la mesure. Il est néanmoins possible d'utiliser un couplant autre que celui fourni.

3. Dans le cas de mesure permanente sur une conduite à état de surface ordinaire, l'utilisation d'un film mince et très malléable, comme par exemple un matériau élastomère, est satisfaisante car ce film permet de s'affranchir des problèmes de séchage ou de disparition du couplant sous l'effet d'agents extérieurs (évaporation, vibrations, ruissellement...).

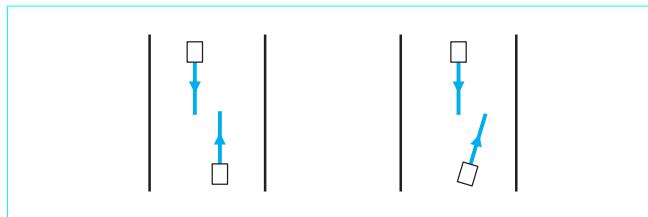


Figure 45 – Défauts de transmission dus à un alignement incorrect des sondes

■ Nécessité de bien vérifier l'alignement des sondes

Des sondes mal alignées peuvent générer une transmission insuffisante des signaux (figure 45).

2.7.5 Installation des sondes intrusives

■ Distance entre sondes

La distance exacte entre les sondes ainsi que les paramètres L et D_{axe} (trajet acoustique et projection de celui-ci sur l'axe de la conduite) sont principalement définis en fonction du type et de la géométrie des sondes utilisées (par exemple sondes intrusives à piquage droit avec plan des sondes à 45 ou 30°) et du diamètre de la conduite. Suivre les indications données par le constructeur.

■ Importance du bon enfouissement des sondes

Les sondes intrusives doivent être correctement enfoncées :

— une sonde insuffisamment enfoncée produit un sous-comptage (débit mesuré inférieur au débit réel) (figure 46 a) ;

— une sonde trop enfoncée génère un sur-comptage (débit supérieur au débit réel) (figure 46 b).

Remarque : certains constructeurs proposent des outils spécifiques permettant de régler très précisément l'enfoncement de la sonde connaissant l'épaisseur de la conduite. (Ces outils permettent aussi de repositionner la sonde à l'identique – en enfoncement et en orientation – dans le cas d'un échange de sonde.)

■ Importance du bon alignement des sondes

Comme pour les sondes externes, il faut bien veiller à ce que les sondes soient correctement alignées, un alignement incorrect pouvant perturber la transmission des signaux acoustiques (cf. figure 45).

■ Installation des sondes à piquage oblique

L'installation de sondes en piquage oblique demande un soin particulier :

- les bossages doivent être préalablement usinés en fonction de leur position sur la conduite ;
- il est nécessaire d'utiliser un outil permettant un alignement correct des bossages (par exemple, barre enfilée dans les deux bossages d'une même corde) ;
- dans le cas d'une mesure multicorde, et afin d'obtenir la précision recherchée, il est nécessaire de procéder à des relevés géométriques précis :
 - mesure du diamètre moyen ;
 - détermination de L et D_{axe} de chaque corde ;
 - détermination de la position réelle des cordes par rapport à l'axe de la conduite (pour pouvoir effectuer un réajustement éventuel des coefficients de pondération).

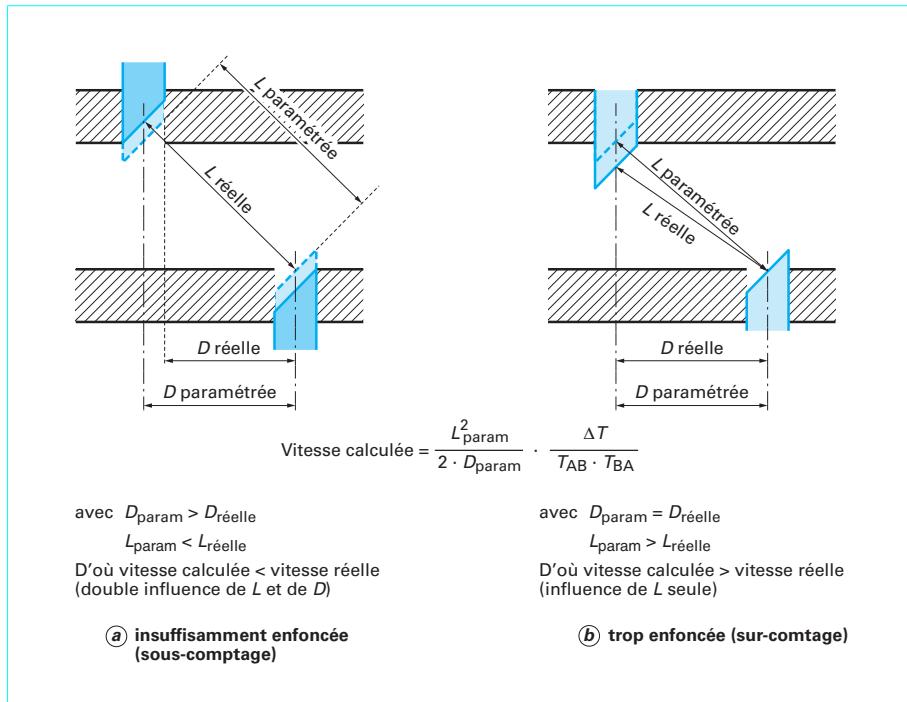


Figure 46 – Sous- ou sur-comptage généré par une sonde intrusive

2.8 Avantages apportés par la technique DTT en mesure sur conduites pleines

Vis-à-vis des techniques « classiques » de mesure de débit (diaphragme, venturi, tuyère, tube de Pitot, vortex, manchettes électromagnétiques), les débitmètres à différence de temps de transit présentent un certain nombre d'avantages :

- perte de charge nulle (dans le cas de sondes externes) ou quasi nulle (dans le cas de sondes intrusives) ;
- installation facile sans nécessité de couper la conduite ou d'arrêter l'installation (en particulier lors de l'utilisation de sondes externes ou sondes intrusives à insertion) ;
- précision souvent meilleure que 1 % pour une large gamme de débits ; précision inférieure à 1 % obtenue avec des sondes intrusives ou des manchettes ;
- temps de réponse rapide ;
- possibilité de mesurer le débit dans les deux sens d'écoulement, sans ajout d'option ;
- possibilité de mesurer le débit aussi bien sur des conduites horizontales ou inclinées que sur des conduites verticales ;

- possibilité de mesurer des débits dans des conduites de diamètre très important (jusqu'à 7-8 mètres, voire davantage) ;
- vaste gamme de fluides mesurables, y compris produits non-conducteurs d'électricité, comme les hydrocarbures ;
- coût pratiquement indépendant du diamètre de la conduite (si on n'utilise pas des manchettes de mesure) ;
- pas de pièces mobiles ;
- étalonnage possible *in situ* à l'aide des seuls paramètres géométriques que sont le diamètre intérieur de la conduite, la longueur L du trajet acoustique entre les sondes et la projection D_{axe} de L sur l'axe de la conduite. (Cette approche est appelée « étalonnage théorique » ou *dry calibration*) ;
- possibilité de compenser à l'aide d'un système multicorde des conditions d'écoulement difficiles, en particulier lorsqu'on ne dispose pas d'une longueur droite suffisante ;
- possibilité d'effectuer une mesure locale et temporaire à l'aide de sondes externes et d'un appareil portable ;
- avec certains appareils portables (Digisonic ou Minisonic P d'Ultraflux, PT868 de Panametrics, 1010 DP de Controlotron), possibilité de mesurer l'épaisseur de la conduite sans utiliser d'appareil spécifique ;
- facilité de transport de l'ensemble appareil + sondes.