

---

# NORME INTERNATIONALE 3966

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

---

## Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées — Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles

*Measurement of fluid flow in closed conduits — Velocity area method using Pitot static tubes*

ITEH STANDARD PREVIEW

(standards.iteh.ai)

Première édition — 1977-06-01

[ISO 3966:1977](#)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/b38e2386-5dd9-43a0-90ab-3059e90198f4/iso-3966-1977>

---

CDU 532.574.2

Réf. n° : ISO 3966-1977 (F)

**Descripteurs** : mesurage de débit, écoulement de fluide, écoulement en conduite fermée, tube de Pitot.

Prix basé sur 39 pages

## AVANT-PROPOS

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique correspondant. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO, participent également aux travaux.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO.

La Norme internationale ISO 3966 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 30, *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées*, et a été soumise aux comités membres en janvier 1976.

(standards.iteh.ai)

Les comités membres des pays suivants l'ont approuvée :

Afrique du Sud, Rép. d'  
Allemagne  
Australie  
Belgique  
Chili  
Corée, Rép. de

Finlande  
France  
Hongrie  
Italie  
Mexique  
Pays-Bas

ISO 3966:1977

Portugal

Roumanie

Royaume-Uni

Turquie

U.R.S.S.

Yougoslavie

Aucun comité membre ne l'a désapprouvée.

<b>SOMMAIRE</b>	<b>Page</b>
1 Objet et domaine d'application . . . . .	1
2 Symboles et définitions . . . . .	1
3 Principe. . . . .	2
4 Conception des tubes de Pitot . . . . .	4
5 Conditions d'utilisation des tubes de Pitot . . . . .	5
6 Mise en place du tube de Pitot . . . . .	7
7 Calcul de la vitesse. . . . .	8
8 Détermination de la vitesse débitante par intégration graphique du champ des vitesses. . . . .	9
9 Détermination de la vitesse débitante par intégration numérique du champ des vitesses. . . . .	12
10 Détermination de la vitesse débitante par les méthodes arithmétiques . . . .	13
11 Corrections sur la mesure de la vitesse locale. . . . .	15
12 Erreurs . . . . .	20
 <b>Annexes</b>	
A Tubes de Pitot . . . . .	24
B Correction de position des tubes de Pitot à apporter lors d'une mesure en écoulement comportant un gradient de vitesse . . . . .	29
C Étude concernant la correction de turbulence. . . . .	31
D Amortissement des manomètres. . . . .	33
E Mesures effectuées à l'aide d'un tube de Pitot dans un fluide compressible .	34
F Détermination du coefficient $m$ pour l'extrapolation au voisinage de la paroi. . . . .	37
G Exemple de calcul de l'erreur-limite sur la mesure de débit à l'aide de tubes de Pitot. . . . .	38

Page blanche

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

ISO 3966:1977

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f38e2386-5dd9-43a0-90ab-3059e90198f4/iso-3966-1977>

# Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles

## 1 OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

La présente Norme internationale spécifie une méthode de détermination, par exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles, du débit-volume, dans une conduite fermée, d'un écoulement régulier (voir 5.1) :

- de fluide incompressible ou sinon d'un nombre de Mach inférieur ou égal à 0,25;
- dont la température d'arrêt est sensiblement uniforme dans toute la section de mesure;
- remplissant complètement la conduite;
- en régime permanent.

Elle traite en particulier de la technologie et de l'entretien des tubes de Pitot, du calcul des vitesses locales à partir des pressions différentielles mesurées et du calcul du débit par intégration de ces vitesses.

La méthode de mesure et les prescriptions spécifiées visent à obtenir une erreur-limite (au niveau de probabilité 95 %) sur le débit au plus égale à  $\pm 2\%$ . Pour atteindre ce résultat, il pourra être nécessaire, suivant les conditions de la mesure, de tenir compte des corrections indiquées au chapitre 11. Si certaines conditions mentionnées dans la présente Norme internationale ne sont pas satisfaites, la méthode peut toutefois s'appliquer dans certains cas spécifiques, mais l'erreur-limite sur le débit est alors plus grande.

## 2 SYMBOLES ET DÉFINITIONS

### 2.1 Symboles

Symbole	Grandeur	Dimensions	Unité SI correspondante
<i>A</i>	Aire de la section transversale de la conduite	$L^2$	$m^2$
<i>a, a'</i>	Distance du point de mesure extrême à la paroi la plus proche	$L$	$m$
<i>D</i>	Diamètre de la conduite	$L$	$m$
<i>d</i>	Diamètre de l'antenne	$L$	$m$
<i>d'</i>	Diamètre de la hampe	$L$	$m$
<i>d<sub>i</sub></i>	Diamètre de la prise de pression totale	$L$	$m$

Symbole	Grandeur	Dimensions	Unité SI correspondante
<i>H</i>	Hauteur d'une conduite rectangulaire	$L$	$m$
<i>h</i>	Distance du point de mesure à la paroi-origine dans le sens de la hauteur	$L$	$m$
<i>k<sub>b</sub></i>	Coefficient d'obstruction d'une hampe cylindrique	—	—
<i>k<sub>g</sub></i>	Coefficient dépendant de la forme de l'étrave	—	—
<i>k<sub>t</sub></i>	Coefficient de correction de la turbulence	—	—
<i>L</i>	Largeur d'une conduite rectangulaire	$L$	$m$
<i>l</i>	Distance du point de mesure à la paroi-origine dans le sens de la largeur	$L$	$m$
<i>M</i>	Masse molaire du fluide	$M$	$kg$
<i>m</i>	Coefficient de rugosité	—	—
<i>Ma</i>	Nombre de Mach	—	—
<i>p</i>	Pression statique absolue du fluide	$ML^{-1}T^{-2}$	$Pa$
<i>q<sub>v</sub></i>	Débit-volume	$L^3T^{-1}$	$m^3/s$
<i>R</i>	Constante molaire des gaz	$ML^2T^{-2}\theta^{-1}$	$J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}$
<i>R</i>	Rayon de la conduite	$L$	$m$
<i>r</i>	Rayon d'une circonférence de mesure	$L$	$m$
<i>Re</i>	Nombre de Reynolds	—	—
<i>S</i>	Surface projetée frontale de la partie de la hampe à l'intérieur de la conduite	$L^2$	$m^2$
<i>T</i>	Température absolue	$\theta$	$K$
<i>U</i>	Vitesse débitante	$LT^{-1}$	$m/s$
<i>u</i>	Vitesse moyenne le long d'une circonférence ou le long d'une droite de mesure	$LT^{-1}$	$m/s$
<i>v</i>	Vitesse locale du fluide	$LT^{-1}$	$m/s$
<i>X</i>	Dimension de la conduite	$L$	$m$
<i>Y</i>	Distance du point de mesure à la paroi	$L$	$m$
<i>Z</i>	Écart à la loi des gaz parfaits	—	—
$\alpha$	Coefficient d'étalonnage du tube de Pitot	—	—

Symbole	Grandeur	Dimensions	Unité SI correspondante
$\gamma$	Rapport des chaleurs massiques	—	—
$\Delta p$	Pression différentielle mesurée par le tube de Pitot	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
$\epsilon$	Coefficient de détente	—	—
$(1 - \epsilon)$	Facteur de correction de compressibilité	—	—
$\lambda$	Coefficient universel de perte de charge	—	—
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa·s
$\nu$	Viscosité cinématique du fluide	$L^2T^{-1}$	m <sup>2</sup> /s
$\xi$	Perte de pression	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
$\rho$	Masse volumique du fluide	$ML^{-3}$	kg/m <sup>3</sup>
$\varphi$	Inclinaison de la vitesse par rapport au tube de Pitot	—	—

**2.2 Définitions**

Les définitions des paragraphes suivants ne sont données que pour des termes employés dans un sens spécial ou pour des termes dont il semble utile de rappeler la signification.

**2.2.1 tube de Pitot double :** Appareil tubulaire constitué par une antenne cylindrique attachée perpendiculairement à une hampe permettant de mesurer une pression différentielle à partir de laquelle on détermine la vitesse de l'écoulement du fluide dans lequel il est immergé. Il est muni d'orifices de prise de pression statique (percés tout autour de la circonférence de l'antenne sur une ou plusieurs sections de celle-ci) et d'un orifice de prise de pression totale (situé face au sens de l'écoulement, au bout du nez axi-symétrique de l'antenne appelé étrave).

NOTE — Dans la suite de la présente Norme internationale, aucune confusion n'étant possible, on emploiera l'expression «tube de Pitot» sans autre précision pour désigner un «tube de Pitot double».

**2.2.2 prise de pression statique :** Ensemble des orifices destinés à mesurer la pression du fluide.

**2.2.3 prise de pression totale :** Orifice permettant de mesurer la pression d'arrêt du fluide (pression correspondant à celle obtenue en amenant le fluide au repos sans variation d'entropie).

**2.2.4 pression différentielle :** Différence de pressions aux prises de pression totale et statique.

**2.2.5 batterie fixe :** Ensemble de tubes de Pitot montés sur un ou plusieurs supports fixes et explorant simultanément tout le diamètre ou toute la section de mesure.

**2.2.6 débit pariétal :** Débit-volume qui s'écoule dans la zone située entre la paroi de la conduite et le contour défini par les points de mesure de la vitesse les plus proches de la paroi.

**2.2.7 vitesse débitante :** Rapport du débit-volume (intégrale dans la section de mesure de la composante axiale des vitesses locales) à l'aide de la section de mesure.

**2.2.8 vitesse relative :** Rapport de la vitesse de l'écoulement au point considéré à une vitesse de référence mesurée au même moment, celle-ci pouvant être soit la vitesse en un point particulier (par exemple au centre d'une conduite circulaire), soit la vitesse débitante.

**2.2.9 longueur droite :** Tronçon de conduite dont l'axe est rectiligne et dont la surface et la forme de la section droite sont constantes.

NOTE — La forme de cette section est généralement circulaire, mais peut être rectangulaire ou annulaire.

**2.2.10 singularité :** Tout élément ou configuration d'une conduite qui fait que cette conduite n'est pas une longueur droite.

NOTE — Dans le cadre de la présente Norme internationale, les singularités qui créent les perturbations les plus gênantes pour la mesure sont les coudes, les robinets, les vannes et les élargissements brusques.

**3 PRINCIPE**

**3.1 Principe général**

Le principe de la méthode consiste :

- a) à mesurer les dimensions de la section de mesure qui aura été choisie perpendiculairement à l'axe de la conduite; cette mesure a pour but de définir l'aire de cette section (voir 3.2);
- b) à définir dans cette section la position des points de mesure, qui devront être choisis en nombre suffisant pour connaître la répartition des vitesses de façon satisfaisante;
- c) à mesurer la pression différentielle existant entre les prises de pression totale et statique du tube de Pitot placé en ces points de mesure (voir 3.3) et la masse volumique du fluide dans les conditions de mesure;
- d) à déterminer la vitesse locale de l'écoulement, à partir des formules données, sur la base des mesures précédentes (voir chapitre 7);
- e) à déterminer la vitesse débitante à partir de ces valeurs;
- f) à calculer le débit-volume égal au produit de l'aire de la section par la vitesse débitante.

Les erreurs effectuées au cours de la réalisation des points a) à f) influencent directement l'erreur sur la mesure du débit; d'autres sources d'erreurs (telles que la forme du profil des vitesses, et le nombre de points de mesure) sont étudiées au chapitre 12.

La présente Norme internationale expose trois types de méthodes de détermination de la vitesse débitante :

*Intégration graphique du champ des vitesses*  
(voir chapitre 8)

Cette méthode consiste à tracer sur un graphique le profil des vitesses et à le planimétrer dans la région de la conduite limitée par les points de mesure les plus proches de la paroi. À la valeur ainsi obtenue, on ajoute un terme relatif à la zone pariétale (située entre la paroi et la courbe passant par les points de mesure qui en sont les plus proches) calculé à partir de l'hypothèse que le profil des vitesses dans cette zone suit une loi de puissance.

Dans cette méthode, les points de mesure peuvent être placés de manière à permettre une connaissance satisfaisante du champ des vitesses.

*Intégration numérique du champ des vitesses*  
(voir chapitre 9)

La seule différence entre cette méthode et la précédente consiste dans le fait que le graphe du profil des vitesses est remplacé par une courbe algébrique et que l'intégration est effectuée de manière analytique.

*Méthodes arithmétiques* (voir chapitre 10)

Les méthodes arithmétiques supposent que la répartition des vitesses suit une loi particulière, la vitesse moyenne dans la conduite est alors donnée par une combinaison linéaire des vitesses individuelles mesurées en des points dont la position est prescrite par la méthode.

Les méthodes arithmétiques décrites au chapitre 10 admettent, dans la zone pariétale, une loi logarithmique de répartition des vitesses en fonction de la distance à la paroi.

## 3.2 Mesure de la section de mesure

### 3.2.1 Sections circulaires

Le diamètre moyen de la conduite est pris égal à la moyenne arithmétique des mesures effectuées suivant au moins quatre diamètres (y compris les diamètres d'exploration) de la section de mesure, faisant entre eux des angles sensiblement égaux. Si la différence entre les longueurs de deux diamètres successifs est supérieure à 0,5 % le nombre de diamètres mesurés doit être doublé.

### 3.2.2 Sections rectangulaires

La largeur et la hauteur de la conduite doivent être mesurées sur au moins chaque droite (au moins quatre) passant par les points de mesure. Si la différence entre les largeurs (ou les hauteurs) correspondant à deux droites de mesure consécutives est supérieure à 1 %, le nombre de largeurs (ou de hauteurs) mesurées doit être doublé.

## 3.3 Mesure des vitesses locales

### 3.3.1 Méthode d'exploration de la section de mesure

Il est parfois proposé de monter plusieurs tubes de Pitot sur une batterie fixe afin d'explorer simultanément toute la section de mesure. Cependant, on ne dispose pas actuellement de suffisamment de données expérimentales pour permettre de définir la conception de certains détails (tels que la forme de l'antenne et le profil de la hampe) qui permettraient de s'assurer que les mesures effectuées au moyen d'une batterie fixe satisfont à la précision requise par la présente Norme internationale.

La présente Norme internationale ne traite donc que des méthodes d'exploration du champ des vitesses par un tube de Pitot employé seul et placé successivement en chaque point de mesure.

### 3.3.2 Mesure de référence

Il faut prévoir une mesure de référence pour vérifier la stabilité de l'écoulement et pour corriger les mesures de vitesses ponctuelles, afin de tenir compte de légères variations de débit pendant l'exploration; un tel appareil de référence doit être placé de façon à éviter toute interaction avec la mesure faite au tube de Pitot. La mesure de référence doit, autant que possible, être effectuée en même temps que chaque mesure de vitesse locale.

Toutefois, si l'on ne dispose que d'un seul tube de Pitot, on s'assurera de la stabilité de l'écoulement en réitérant les mesures au point de référence après chaque mesure de vitesse locale.

Il est essentiel que la répartition des vitesses dans la section de mesure reste stable et ne soit pas affectée par les variations éventuelles du débit pendant tout le temps de la mesure.

Ayant tracé la courbe de variation de la vitesse de référence  $v_r$  en fonction du temps, on utilisera cette courbe pour ramener toutes les mesures d'exploration à un même débit de référence  $q_0$  (de préférence celui qui correspond à la moyenne des mesures au point fixe). Pour des variations relativement faibles de la vitesse de référence, on peut transposer la vitesse  $v_{i,t}$  mesurée en un point quelconque  $i$  à l'instant  $t$  en la multipliant par le rapport entre la vitesse  $v_{r,0}$  au point de référence correspondant au débit  $q_0$  et la vitesse  $v_{r,t}$  en ce point de référence à l'instant  $t$  :

$$v_{i,0} = v_{i,t} \times \frac{v_{r,0}}{v_{r,t}}$$

NOTE — Lorsque la mesure de référence est une grandeur directement proportionnelle au débit (par exemple, la vitesse de rotation de l'arbre d'entraînement d'un ventilateur ou d'une pompe), cette mesure peut être directement substituée à  $v_{r,0}$  et  $v_{r,t}$  dans l'équation ci-dessus. Lorsque la mesure de référence est sous forme d'une différence de pression (par exemple dans une structure fixe du circuit, ou bien la pression différentielle d'un tube de Pitot de référence), la racine carrée de la lecture de référence peut être substituée à  $v_{r,0}$  et  $v_{r,t}$  dans l'équation ci-dessus.

Cependant, il faut signaler qu'il peut se produire des fluctuations du profil des vitesses sans que cela entraîne des fluctuations du débit. Dans un tel cas, l'emploi d'une vitesse ponctuelle de référence peut entraîner des erreurs et il est préférable de contrôler la stabilité du débit à l'aide de tout dispositif déprimogène (appareil déprimogène normalisé, contrôle piézométrique sur un convergent, un coude, une bêche spirale, une perte de charge singulière, etc.), même non étalonné, pourvu que l'on soit assuré de sa fidélité et d'une sensibilité suffisante.

Dans ce cas, la correction proportionnelle mentionnée ci-dessus portera sur la pression différentielle et non sur la vitesse.

### 3.3.3 Contrôle de la répartition des vitesses

Même lorsque la vitesse débitante est calculée par une méthode qui ne nécessite pas de tracer le profil des vitesses, il est recommandé, afin de s'assurer que la répartition des vitesses est régulière, de procéder à ce tracé ou, à défaut, d'en contrôler la régularité de toute autre manière.

De la même façon, quand on effectue plusieurs mesures dans une même section à des débits différents, il est recommandé de tracer les profils des vitesses de manière adimensionnelle (c'est-à-dire en utilisant les vitesses relatives, voir 2.8) afin de vérifier leur bonne concordance et s'assurer ainsi qu'il n'existe pas de profils anormaux pour certains débits (les profils ne doivent pas varier de manière erratique, quand le débit varie dans une large gamme de nombres de Reynolds).

Il peut être également utile de tracer les courbes de répartition des vitesses comme indiqué ci-dessus afin de déceler une erreur éventuelle dans la mesure d'une vitesse locale. Si cela est possible, la mesure suspectée doit être recommencée; sinon elle sera éliminée et le profil des vitesses sera tracé sur la base des profils obtenus précédemment pourvu qu'il y ait des raisons indépendantes de penser que cette mesure suspectée est fautive.

## 3.4 Emplacement et nombre des points de mesure dans la section

### 3.4.1 Prescriptions générales

Les règles à suivre pour la mise en place des points de mesure sont différentes suivant les méthodes de détermination de la vitesse débitante spécifiées dans la présente Norme internationale. Ces règles sont données dans les chapitres 8, 9 et 10, respectivement.

Quelle que soit la méthode, la distance entre l'axe de l'antenne du tube de Pitot et la paroi doit être au moins égale au diamètre de l'étrave  $d$ .

Le positionnement du tube de Pitot doit être déterminé à partir de la dimension de la conduite mesurée le long de la droite de mesure (plutôt qu'à partir de la dimension moyenne) et doit être mesuré avec une tolérance égale à la

plus petite des deux valeurs suivantes :

$\pm 0,005 X$ ,  $X$  étant la dimension de la conduite le long de la droite de mesure en cause, ou

$\pm 0,05 y$ ,  $y$  étant la distance du tube de Pitot à la paroi la plus proche.

En 3.4.2 et 3.4.3 il est prescrit un nombre minimal de points de mesure s'appliquant particulièrement à des conduites de petites dimensions. Compte tenu du besoin de connaître le mieux possible le profil des vitesses, le nombre de points de mesure sera avantageusement accru dans la mesure où les conditions opératoires et la stabilité de l'écoulement le permettent.

Quand on utilise un seul tube de Pitot pour l'exploration de la conduite, on doit tout d'abord déterminer la distance entre un point de référence (à partir duquel on mesure chaque position) et la paroi de la conduite. Cela peut introduire une erreur systématique relativement grande pour toutes les mesures de positionnement. Dans ce cas il est recommandé d'explorer des diamètres complets (plutôt que des rayons opposés sur chaque diamètre) car l'erreur systématique tendra ainsi à s'annuler sur les deux moitiés de l'exploration.

### 3.4.2 Sections circulaires

Les points de mesure doivent être situés aux intersections d'un nombre donné de circonférences centrées sur l'axe de la conduite et d'au moins deux diamètres perpendiculaires entre eux.

On doit effectuer les mesures en au moins trois points par rayon de sorte que le nombre minimal de points dans la section soit de douze. Un point de mesure supplémentaire au centre de la conduite est souhaitable pour vérifier la forme du profil des vitesses et est nécessaire pour le calcul de la correction d'obstruction (voir 11.1.2).

### 3.4.3 Sections rectangulaires

Le nombre de points de mesure sera au minimum de 25. À moins que l'on doive adopter une disposition spéciale des points de mesure pour utiliser une méthode arithmétique, leur emplacement sera défini par les intersections d'au moins cinq droites parallèles à chacune des parois de la conduite.

## 4 CONCEPTIONS DES TUBES DE PITOT

### 4.1 Description générale

Il est recommandé d'utiliser l'un des types de tube de Pitot décrits à l'annexe A qui remplissent toutes les spécifications de 4.2; cela évite d'apporter un certain nombre de corrections aux mesures. L'emploi de tout autre type de tube de Pitot remplissant les conditions décrites en 4.2 est autorisé à condition que son étalonnage soit connu.



Les tubes de Pitot doubles traités dans la présente Norme internationale consistent en une antenne cylindrique attachée perpendiculairement à une hampe passant habituellement au travers de la paroi d'une conduite. La longueur de l'antenne est généralement comprise entre 15 et 25 fois son diamètre.

Dans une ou deux sections le long de l'antenne, tout autour de la circonférence, sont percés des orifices de prise de pression statique permettant, en l'absence de fuite, le transfert de la pression par l'antenne et la hampe jusqu'à un point situé en dehors de la conduite.

Un tube plus petit, concentrique à l'antenne et à la hampe, transfère, jusqu'à un point situé en dehors de la conduite, la pression totale exercée au niveau d'un orifice situé face au sens de l'écoulement, au bout du nez axi-symétrique de l'antenne appelé étrave faisant partie intégrante de l'antenne.

Un index, fixé à l'extrémité de la hampe, facilite l'orientation de l'antenne lorsque celle-ci est cachée par la paroi de la conduite.

#### 4.2 Critères à remplir par le tube de Pitot

L'étrave (orifice de prise de pression totale y compris) doit être conçue de telle manière qu'elle réponde aux exigences suivantes :

- a) La réponse de la pression différentielle à l'inclinaison de l'antenne par rapport à l'écoulement doit satisfaire à l'une des deux conditions suivantes selon les circonstances. Dans les deux cas, il est nécessaire de connaître la courbe de réponse du tube de Pitot :

1) si un alignement précis du tube de Pitot par rapport à l'axe de la conduite n'est pas possible mais s'il n'existe pas de giration, la pression différentielle doit être aussi indépendante que possible de l'inclinaison de l'antenne en écoulement uniforme;<sup>1)</sup>

2) si un alignement précis du tube de Pitot par rapport à l'axe de la conduite est possible, mais s'il existe des girations, la variation de la pression différentielle enregistrée par le tube de Pitot en écoulement uniforme pour une inclinaison  $\varphi$  doit être proportionnelle à  $\cos^2\varphi$ . Si l'alignement de l'antenne est parfaitement axial et si l'angle de giration est inférieur à  $\pm 3^\circ$ , la pression différentielle ne doit pas dévier de plus de 1 % par rapport à cette loi.

Il y a lieu de noter qu'un mauvais alignement et des girations peuvent coexister et il importe donc de chercher à les limiter.

- b) Les coefficients, pour différents modèles de tubes de Pitot conformes à une spécification particulière, doivent être identiques à 0,25 % près et le rester pour toute la durée de service de ces tubes. En cas de doute, un étalonnage individuel de chaque tube de Pitot devrait être effectué.

- c) Si l'on emploie les tubes dans un liquide, la cavitation due à l'étrave ne doit pas être susceptible de causer une erreur notable dans la mesure de la pression statique relevée par le tube.

- d) Les orifices de prise de pression statique doivent être :

- 1) de diamètre inférieur ou égal à 1,6 mm;
- 2) au moins au nombre de six et suffisants pour avoir un amortissement dans le circuit sous pression statique aussi égal que possible à celui qui existe dans le circuit sous pression totale; si nécessaire, sur des tubes d'un faible diamètre, les orifices peuvent être répartis dans deux plans;
- 3) placés au moins à six diamètres d'antenne de l'étrave;
- 4) placés au moins à huit diamètres d'antenne de l'axe de la hampe.

- e) Si la hampe est évasée pour atteindre un diamètre  $d'$ , il doit y avoir une longueur d'au moins  $7d'$  entre l'axe de l'antenne et le commencement de l'évasement, longueur sur laquelle le diamètre de hampe est égal au diamètre d'antenne.

- f) Le raccordement entre l'antenne et la hampe doit être soit coudé, soit courbé selon un rayon moyen égal à  $3 \pm 0,5$  fois le diamètre d'antenne.

- g) Un index d'orientation doit être fixé à l'extrémité de la hampe assez loin de l'antenne pour permettre un alignement et un positionnement précis dans la conduite.

Trois types de tubes de Pitot couramment utilisés et satisfaisant à ces critères, sont décrits à titre d'exemple dans l'annexe A.

## 5 CONDITIONS D'UTILISATION DES TUBES DE PITOT

### 5.1 Choix de la section de mesure

5.1.1 La section choisie pour effectuer les mesures doit être située dans un alignement droit et être perpendiculaire à la direction de l'écoulement. Elle doit être de forme simple, par exemple soit circulaire, soit rectangulaire. Elle doit être située dans une zone où les vitesses mesurées se situent dans la gamme normale d'utilisation de l'appareillage employé (voir 5.3.2).

5.1.2 Au voisinage de la section de mesure, l'écoulement doit être sensiblement parallèle et symétrique par rapport à l'axe de la conduite et ne doit présenter ni turbulence excessive ni rotation. La section de mesure doit donc être choisie suffisamment éloignée de toute singularité qui pourrait créer une dissymétrie, une rotation ou de la turbulence (voir 5.1.4).

1) Les tubes de Pitot décrits en annexe A permettent une indépendance de la pression différentielle lue à  $\pm 1,5$  % près jusque vers  $14^\circ$  d'inclinaison en écoulement uniforme.

La longueur droite de tuyauterie qui peut être nécessaire pour satisfaire à ces conditions varie avec la vitesse de l'écoulement, les singularités en amont, le niveau de turbulence et le degré de giration, s'il en existe.<sup>1)</sup>

**5.1.3** Bien que des mesures au tube de Pitot en écoulement oblique ou convergent doivent autant que possible être évitées, elles peuvent cependant être pratiquées sous réserve que la déviation maximale de l'écoulement par rapport à l'axe du tube de Pitot ne dépasse pas 3°.

À titre indicatif, on peut de même considérer qu'une rotation est suffisamment faible pour ne pas accroître les limites de confiance, données dans la présente Norme internationale, sur le débit mesuré si elle se traduit par une inclinaison des vitesses locales par rapport à l'axe de la conduite inférieure à 3°.

**5.1.4** Des explorations préliminaires doivent être effectuées afin de s'assurer que l'écoulement est régulier.

Si ces explorations montrent que l'écoulement n'est pas satisfaisant, on pourra parfois y remédier au moyen de l'un des dispositifs décrits en 5.2.

Une fois ces dispositifs mis en place, on s'assurera que les conditions d'écoulement requises pour que la présente Norme internationale soit applicable sont satisfaites. Dans le cas contraire, une exploration plus détaillée de la section de mesure est nécessaire et l'on se référera alors à un document distinct qui sera publié ultérieurement.

## 5.2 Dispositifs pour l'amélioration de l'écoulement

**5.2.1** Si l'écoulement présente une rotation, on peut tenter de la supprimer à l'aide d'un dispositif anti-giratoire constitué soit par un empilage de tubes parallèles à l'écoulement, soit par un nid d'abeille à alvéoles carrés ou hexagonaux. Quel que soit le type utilisé, l'ensemble du dispositif doit être rigoureusement symétrique et les prescriptions suivantes doivent être observées :

- la dimension transversale maximale  $a$  d'un canal doit être inférieure à  $0,25 D$ ;
- la longueur de ce dispositif doit être supérieure à  $10 a$ .

**5.2.2** Si la répartition des vitesses est jugée trop irrégulière, on peut souvent y remédier à l'aide d'un régularisateur de profil constitué par exemple par un ou plusieurs écrans ou grilles ou tôles perforées. Il faut toutefois noter que ces dispositifs n'acquièrent une certaine efficacité qu'au prix d'une perte de charge assez élevée.

**5.2.3** Les dispositifs décrits en 5.2.1 et 5.2.2 doivent être installés aussi loin que possible à l'amont de la section de mesure et en tous cas à une distance de celle-ci au moins

égale à 5 fois le diamètre d'une conduite de section circulaire (ou 20 fois le rayon hydraulique d'une conduite de section quelconque). De plus, ils ne doivent pas être placés immédiatement en aval d'une singularité.

**5.2.4** Si la répartition des vitesses est trop irrégulière ou l'écoulement insuffisamment parallèle, mais si l'on a pu s'assurer que l'écoulement ne présente pas de rotation, il est parfois possible d'y remédier à l'aide d'une installation provisoire de guidage. Celle-ci comportera une entrée légèrement convergente raccordée, sans que cela provoque des décollements, à un tronçon droit dont la longueur sera au moins égale à deux fois la plus grande dimension de la conduite.

## 5.3 Limites d'utilisation

### 5.3.1 Nature du fluide

Le fluide doit être continu en phase unique ou doit se comporter comme tel. Les liquides doivent être newtoniens et ne doivent pas avoir une viscosité ou un comportement thixotropique anormal.

### 5.3.2 Gamme des vitesses

Le tube de Pitot ne doit pas être utilisé pour une vitesse d'écoulement inférieure à celle correspondant à la limite inférieure du nombre de Reynolds (voir 7.1) et pour une vitesse d'écoulement supérieure à celle correspondant à un nombre de Mach égal à 0,25.

### 5.3.3 Nature de l'écoulement

Les formules données (voir 7.1 et 7.2) ne sont rigoureuses que lorsque l'écoulement est permanent et ne présente ni gradient de vitesse transversal, ni turbulence. Dans la pratique, les deux coexistent toujours dans les conduites fermées. Le chapitre 11 et les annexes B et C donnent des indications sur l'importance des erreurs correspondantes.

### 5.3.4 Limitations dimensionnelles

Le rapport  $d/D$  du diamètre  $d$  de l'antenne du tube de Pitot au diamètre  $D$  de la conduite ne doit pas dépasser 0,02, cela en vue de minimiser l'erreur sur le débit résultant du gradient de vitesse et de l'obstruction causée par la hampe (voir chapitre 11). Dans des conditions d'écoulement difficiles, on pourra admettre un rapport allant jusqu'à 0,04 pourvu que soient effectuées les corrections nécessaires dues à l'influence de l'obstruction et du gradient de vitesse; cette valeur limite peut en effet être nécessaire pour éviter la vibration du tube dans des écoulements à très haute vitesse. D'autre part, les conditions mentionnées dans le chapitre 4 doivent être respectées.

1) À titre indicatif, on considère généralement que pour satisfaire à ces conditions, la longueur droite de conduite entre la section de mesure et toute singularité importante (voir 2.2.10) en amont doit être d'au moins 20 fois le diamètre d'une conduite de section circulaire (ou 80 fois le rayon hydraulique d'une conduite de section quelconque). De même, la longueur droite entre la section de mesure et toute singularité importante en aval doit être d'au moins 5 fois le diamètre d'une conduite de section circulaire (ou 20 fois le rayon hydraulique d'une conduite de section quelconque).

### 5.3.5 Influence de la turbulence

L'influence de la turbulence intervient de deux façons dans le cas d'une exploration au tube de Pitot, à savoir :

- a) sur la mesure de la pression totale;
- b) sur la mesure de la pression statique.

La turbulence de l'écoulement entraîne, sur la détermination de la vitesse, une erreur par excès qui est fonction de ce degré de turbulence.

Une étude détaillée concernant la correction de turbulence fait l'objet de l'annexe C.

## 5.4 Exécution des mesures

### 5.4.1 Mesure de la pression différentielle

L'appareillage choisi pour la mesure de la pression différentielle doit être capable de mesurer une pression différentielle stable égale à la valeur maximale observée dans l'exploration de la section avec une erreur-limite n'excédant pas 1 % (au niveau de confiance de 95 %).

### 5.4.2 Fluctuations de la pression différentielle

En vue de déduire des mesures, en dépit des fluctuations aléatoires des vitesses, des moyennes temporelles représentatives, il est nécessaire :

- a) d'amortir les fluctuations de la pression différentielle en appliquant aux appareils de mesure l'amortissement minimal qui permet des lectures aisées sans masquer les fluctuations à plus long terme. L'amortissement de l'appareil doit être symétrique et linéaire; il peut être réalisé au moyen d'un tube capillaire placé dans le liquide manométrique, conformément aux prescriptions de l'annexe D;
- b) de répéter les lectures en chaque point de mesure un certain nombre de fois à des intervalles de temps de préférence inégaux. Un nombre suffisant de lectures sera atteint lorsque la suppression de l'une quelconque d'entre elles (à l'exception de celles présentant une erreur importante injustifiée, qui devront être éliminées d'office) ne modifie pas la moyenne de plus de  $\pm 1\%$ .

Cependant, si les conditions d'amortissement a) ont été suffisamment bien réalisées pour que des lectures instantanées de la pression différentielle ne fluctuent pas de plus de  $\pm 2\%$  de la pression différentielle moyenne, sur une période de temps suffisamment longue (par exemple dix valeurs maximales et dix valeurs minimales étant observées), on peut alors se contenter d'effectuer visuellement la moyenne de la mesure.

NOTE — La tolérance finale applicable au débit en raison des fluctuations aléatoires des lectures sera fonction du nombre total de lectures effectuées pendant une exploration. Par conséquent, si le nombre total de points de mesure est élevé, le nombre de lectures en chaque point pourrait être relativement faible.

### 5.4.3 Détermination de la masse volumique

La masse volumique du fluide doit être déterminée d'une manière telle que l'on soit assuré que l'erreur-limite sur la valeur obtenue ne dépasse pas  $\pm 0,5\%$  (au niveau de confiance de 95 %).

Lorsque la masse volumique est déduite de la pression (statique absolue) et de la température statique, ces grandeurs peuvent généralement être obtenues par des relevés uniques effectués en un point situé à 0,75 fois le rayon à partir de la paroi. Cependant, pour les mesurages en fluide compressible où le rapport de la pression différentielle maximale à la pression (statique absolue) dans le plan de mesure est supérieur à 0,01, la méthode décrite en 7.2 et en E.3 de l'annexe E doit être appliquée.

### 5.5 Contrôle et entretien de l'appareillage de mesure

Le tube de Pitot ne nécessite pas d'entretien particulier; toutefois on doit s'assurer avant et après les mesures que le tube utilisé satisfait aux critères du chapitre 4.

On s'assurera en particulier :

- que les prises de pression et les tuyauteries de liaison ne sont pas bouchées;
- qu'il n'existe pas de communication entre les encastres recueillant la pression totale et la pression statique;
- que le tube n'a pas subi de choc et que son étrave n'est pas détériorée;
- que le tube est propre;
- que l'antenne du tube de Pitot est bien perpendiculaire à sa hampe.

D'autre part, la détermination de la vitesse étant liée à la mesure de la pression différentielle, on s'assurera également :

- que les liaisons au manomètre sont aussi courtes que possible;
- qu'elles ne présentent pas de fuites (un caoutchouc poreux, fendillé, etc., n'est pas admissible);
- que, d'une façon générale, elles sont conformes aux spécifications de l'ISO 2186, *Débit des fluides dans les conduites fermées — Liaisons pour la transmission du signal de pression entre les éléments primaires et secondaires*;
- que, le cas échéant, l'amortissement du manomètre est symétrique et linéaire (voir annexe D).

## 6 MISE EN PLACE DU TUBE DE PITOT

L'axe de l'antenne du tube de Pitot doit être placé parallèlement à l'axe de la conduite; un bras d'alignement doit être prévu à cet effet.

Le tube de Pitot doit être fixé rigidement pendant les mesures.

Le tube de Pitot doit être positionné dans la conduite conformément aux prescriptions de 3.4.1 et du chapitre 8 ou 10.

Le dispositif qui tient le tube de Pitot dans la conduite doit être tel qu'il ne puisse exister ni perte ni apport vis-à-vis du fluide circulant dans la conduite.

**7 CALCUL DE LA VITESSE**

**7.1 Vérification des conditions de mesure**

On peut calculer la vitesse locale à condition que le nombre de Reynolds rapporté au diamètre de la prise de pression totale du tube de Pitot soit supérieur à 200, et que le nombre de Mach local (pour des mesures dans un fluide compressible) soit inférieur ou égal à 0,25. Toutefois, l'annexe E donne des indications sur la façon d'effectuer des mesures de vitesse dans un fluide compressible à nombre de Mach plus élevé.

La première condition équivaut à dire que Δp ne doit jamais être inférieur à

$$\frac{2 \times 10^4}{\rho} \left( \frac{\mu}{\alpha d_i} \right)^2$$

où

Δp est la pression différentielle mesurée par le tube de Pitot;

ρ est la masse volumique du fluide;

μ est la viscosité dynamique du fluide;

d<sub>i</sub> est le diamètre de la prise de pression totale du tube de Pitot;

α est le coefficient d'étalonnage du tube de Pitot que l'on prendra égal à 1 pour ce calcul.

La seconde condition nécessite, pour la mesure dans un fluide compressible, que le rapport de la pression différentielle à la valeur absolue de la pression enregistrée par la prise de pression statique du tube de Pitot n'excède jamais une valeur limite, qui varie avec γ (le rapport des chaleurs massiques du gaz) en fonction du tableau 1.

TABLEAU 1

γ	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
$\left( \frac{\Delta p}{p} \right)_{\max.}$	0,035	0,038	0,042	0,046	0,048	0,052	0,054

**7.2 Formules de calcul de la vitesse**

La vitesse locale d'un fluide en écoulement permanent, sans gradient de vitesse transversal ou turbulence, à des nombres de Reynolds, rapportés au diamètre intérieur de la prise de

pression totale, supérieurs à 200, est donnée par l'expression :

$$v = \alpha(1 - \epsilon) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

dans laquelle (1 - ε) est le facteur de correction de compressibilité. Dans un liquide, ε = 0, de sorte que la correction de compressibilité est inutile, mais dans un fluide compressible à faibles nombres de Mach, le facteur (1 - ε) peut se déterminer par la relation suivante :

$$(1 - \epsilon) \approx \left[ 1 - \frac{1}{2\gamma} \frac{\Delta p}{p} + \frac{\gamma - 1}{6\gamma^2} \left( \frac{\Delta p}{p} \right)^2 \right]^{1/2}$$

où

γ est le rapport des chaleurs massiques;

p est la pression (statique absolue) locale;

ρ est la masse volumique locale du fluide;

Δp est la pression différentielle indiquée par le tube de Pitot;

α est le coefficient d'étalonnage du tube de Pitot (dans les conditions mentionnées ci-dessus et pour les tubes de Pitot décrits dans la présente norme, il est pratiquement de 1,00).

La masse volumique du fluide compressible est déterminée par la formule

ISO 3966:1977

$$\rho = \frac{pM}{ZRT}$$

où

R = 8,314 3 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, la masse molaire étant exprimée en kilogrammes par mole et ayant une valeur de 0,028 95 pour l'air;

Z est l'écart à la loi des gaz parfaits; pour l'air, à une pression absolue inférieure à dix fois la pression atmosphérique et à des températures comprises entre 273 et 373 K, il ne diffère pratiquement pas de l'unité (Z ne doit pas être confondu avec (1 - ε), facteur de correction de compressibilité);

T est la température statique locale donnée par la formule<sup>1)</sup>

$$\frac{T_o}{T} = \left[ 1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\Delta p}{p} \right]$$

T<sub>o</sub> étant la température totale mesurée sur l'axe de la conduite à l'aide d'une sonde de température totale adéquate.

L'influence de l'utilisation d'une sonde de température non adéquate fait l'objet d'une étude dans l'annexe E.

Pour les valeurs choisies de γ et Δp/p, les valeurs de (1 - ε) et celles de T/T<sub>o</sub> sont données dans le tableau 2.

1) Cette formule approchée donne une précision suffisante pour les besoins de la présente Norme internationale.

TABLEAU 2

$\frac{\Delta\rho}{\rho}$	1,1		1,2		1,3		1,4		1,5		1,6		1,7	
	$T/T_o$	$(1-\epsilon)$	$T/T_o$	$(1-\epsilon)$	$T/T_o$	$(1-\epsilon)$	$T/T_o$	$(1-\epsilon)$	$T/T_o$	$(1-\epsilon)$	$T/T_o$	$(1-\epsilon)$	$T/T_o$	$(1-\epsilon)$
0,01	0,999	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	0,998	0,997	0,998	0,996	0,998	0,996	0,999
0,02	0,998	0,996	0,997	0,996	0,995	0,996	0,994	0,997	0,993	0,997	0,993	0,997	0,992	0,997
0,03	0,997	0,993	0,995	0,994	0,993	0,994	0,992	0,995	0,990	0,995	0,989	0,995	0,988	0,996
0,04	0,996	0,991	0,994	0,992	0,991	0,993	0,989	0,993	0,987	0,994	0,985	0,994	0,984	0,994
0,05	—	—	—	—	0,989	0,991	0,986	0,991	0,984	0,992	0,982	0,992	0,980	0,993

**8 DÉTERMINATION DE LA VITESSE DÉBITANTE PAR INTÉGRATION GRAPHIQUE DU CHAMP DES VITESSES**

Le principe général de cette méthode est exposé en 3.1.

Les points de mesure doivent être disposés le long de droites. Sur chacune de ces droites, deux points de mesure doivent être placés aussi près que possible de la paroi afin de déterminer  $m$  avec précision (voir annexe F).

Le nombre et la position des autres points sont choisis de sorte que le champ des vitesses soit connu de manière satisfaisante. Ils seront en général répartis dans la section de manière à découper celle-ci en aires présumées d'égal débit afin de donner sensiblement la même importance à tous les points de mesure.

On se référera à 3.4 pour déterminer le nombre et l'emplacement des points de mesure et au chapitre 11 lorsqu'on estimera nécessaire d'apporter certaines corrections à la mesure des vitesses locales ou à l'emplacement des points de mesure.

**8.1 Sections circulaires**

Si  $v$  est la vitesse de l'écoulement en un point de coordonnées polaires  $r$  et  $\theta$ , et si  $R$  est le rayon moyen de la section de mesure, la vitesse débitante est

$$U = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R v(r,\theta) r dr d\theta = \int_0^1 u d\left(\frac{r}{R}\right)^2$$

1) Pour guider le tracé de la courbe à proximité du point de mesure placé le plus près de la paroi, on tracera la tangente à cette courbe pour  $r = r_n$  avec une pente égale à

$$\left(\frac{du_c}{dx}\right)_{r=r_n} = \frac{-u_n}{2m \frac{r_n}{R} \left(1 - \frac{r_n}{R}\right)}$$

où  $(r/R)^2$  est noté  $x$ .

La pente de cette courbe est dérivée de la loi classique de Karman, pour la variation des vitesses du fluide dans la zone pariétale :

$$u = u_n \left(\frac{R-r}{R-r_n}\right)^{1/m}$$

2) Cette expression simplifiée omet l'autre terme

$$\frac{-m}{(m+1)(2m+1)} u_n \left(1 - \frac{r_n}{R}\right)^2$$

dans le résultat de l'intégration (dans la zone pariétale) dérivée de la loi classique de Karman : ce dernier terme représente seulement environ

$$\frac{1 - (r_n/R)}{4m + 2}$$

fois le débit dans la zone pariétale.

$$= \int_0^{(r_n/R)^2} u d\left(\frac{r}{R}\right)^2 + \int_{(r_n/R)^2}^1 u d\left(\frac{r}{R}\right)^2$$

où

$u$  est la vitesse moyenne spatiale le long de la circonférence de rayon  $r$ ;

$r_n$  est le rayon de la circonférence relative aux points de mesure les plus proches de la paroi.

La méthode employée consiste

a) à prendre  $u_c$  (moyenne arithmétique des vitesses aux points de mesure situés sur une même circonférence de rayon  $r_c$ ) comme valeur de  $u$ ;

b) à tracer la courbe de variation de  $u_c$  en fonction  $(r_c/R)^2$ , entre  $r = 0$  et  $r = r_n$  (voir figure 1)<sup>1)</sup>;

c) à déterminer graphiquement la valeur de l'aire comprise sous cette courbe (voir figure 1);

d) à ajouter à cette valeur le terme<sup>2)</sup> suivant correspondant à la zone pariétale :

$$\frac{m}{m+1} u_n \left(1 - \frac{r_n^2}{R^2}\right)$$

où

$u_n$  est la valeur de la moyenne arithmétique des vitesses aux points de mesure situés sur la circonfé-