

NORME INTERNATIONALE

ISO
3354

Deuxième édition
1988-07-15



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

Mesure de débit d'eau propre dans les conduites fermées — Méthode d'exploration du champ des vitesses dans les conduites en charge et dans le cas d'un écoulement régulier, au moyen de moulinets

Measurement of clean water flow in closed conduits — Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions

ISO 3354:1988

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/d95574a8-b5dc-4066-85f4-b9bd49c09ec/iso-3354-1988>

Avant-propos

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

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 3354 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 30, *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 3354 : 1975), dont elle constitue une révision technique.

L'attention des utilisateurs est attirée sur le fait que toutes les Normes internationales sont de temps en temps soumises à révision et que toute référence faite à une autre Norme internationale dans le présent document implique qu'il s'agit, sauf indication contraire, de la dernière édition.

Sommaire

	Page
1 Objet et domaine d'application	1
1.1 Objet	1
1.2 Domaine d'application	1
2 Références	1
3 Définitions et symboles	1
3.1 Définitions	1
3.2 Symboles	2
4 Principe	3
4.1 Généralités	3
4.2 Mesurage de la section de jaugeage	3
4.3 Mesurage des vitesses locales	3
4.4 Emplacement et nombre de points de mesurage dans la section	4
5 Description du moulinet	5
6 Conditions d'utilisation des moulinets	6
6.1 Choix de la section de mesurage	6
6.2 Dispositifs pour l'amélioration de l'écoulement	6
6.3 Étalonnage du moulinet	7
6.4 Limites d'utilisation	7
6.5 Contrôle et entretien du moulinet	8
7 Mise en place des moulinets dans la conduite	8
7.1 Mise en place des moulinets	8
7.2 Montage en section circulaire	8
7.3 Montage en section rectangulaire	9
8 Détermination de la vitesse débitante par intégration graphique du champ des vitesses	10
8.1 Généralités	10
8.2 Sections circulaires	10
8.3 Sections rectangulaires	11
9 Détermination de la vitesse débitante par intégration numérique du champ des vitesses	12
9.1 Généralités	12
9.2 Sections circulaires	12
9.3 Sections rectangulaires	12

10	Détermination de la vitesse débitante par les méthodes arithmétiques	14
10.1	Généralités	14
10.2	Méthode log-linéaire	14
10.3	Méthode log-Tchebycheff	16
11	Incertitude sur la mesure de débit	17
11.1	Généralités	17
11.2	Sources d'erreur dans la mesure des vitesses locales	17
11.3	Sources d'erreur sur l'estimation du débit	17
11.4	Composition des erreurs	18
11.5	Présentation des résultats	18
11.6	Calcul de l'incertitude	18

Annexes

A	Sections de mesurage de formes autres que circulaires et rectangulaires	21
B	Corrections à apporter pour l'effet d'obstruction	25
C	Recommandations pour le choix du type de moulinet et de perche-support ...	26
D	Exemple de répartition des points de mesurage le long d'un rayon pour le mesurage de la vitesse dans une conduite de section circulaire dans le cas des méthodes graphique et numérique	27
E	Détermination du coefficient de couche limite, m , pour l'extrapolation au voisinage de la paroi	29
F	Définition des termes et méthodes utilisés dans l'analyse des erreurs	30
G	Loi de t de Student	32
H	Exemples de valeurs des incertitudes composantes	33
J	Exemple de calcul de l'incertitude sur la mesure du débit à l'aide de moulinets	35

Mesure de débit d'eau propre dans les conduites fermées — Méthode d'exploration du champ des vitesses dans les conduites en charge et dans le cas d'un écoulement régulier, au moyen de moulinets

1 Objet et domaine d'application

1.1 Objet

La présente Norme internationale spécifie une méthode de détermination du débit-volume par exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets à hélice dans une conduite fermée, dans les conditions suivantes :

- a) la répartition des vitesses doit être régulière (voir 6.1.2);
- b) le fluide doit être de l'eau propre¹⁾ ou considérée comme telle;
- c) la conduite doit être en charge;
- d) le régime doit être permanent²⁾.

Elle traite en particulier de la technologie et de l'étalonnage des moulinets, du mesurage des vitesses locales et du calcul du débit par intégration de ces vitesses.

1.2 Domaine d'application

La méthode de mesurage et les prescriptions définies dans la présente Norme internationale visent à obtenir une incertitude (au niveau de probabilité de 95 %) sur le débit au plus égale à $\pm 2\%$, à condition que la correction correspondant à l'effet d'obstruction (voir 6.4.3 et annexe B), ait été apportée.

Ceci suppose toutefois que l'écoulement ne présente ni giration ni dissymétrie excessives; on trouvera en 6.1.2 des critères permettant de juger si l'écoulement est suffisamment régulier pour que la présente Norme internationale soit applicable et que l'incertitude reste dans la gamme requise. Dans le cas contraire, on se référera à l'ISO 7194.

Quand certaines conditions mentionnées dans la présente Norme internationale ne sont pas satisfaites, la méthode reste généralement applicable, mais l'incertitude sur le débit est alors plus grande.

Par ailleurs, seuls sont traités dans la présente Norme internationale les cas des sections circulaires et rectangulaires qui couvrent la très grande majorité des cas pratiques. On trouvera cependant à l'annexe A, des indications sur la façon d'opérer dans certaines sections de forme plus particulière.

2 Références

ISO 3455, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Étalonnage des moulinets à élément rotatif en bassins découverts rectilignes.*

ISO 4006, *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées — Vocabulaire et symboles.*

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

ISO 7194, *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées — Mesure de débit dans les conduites circulaires dans le cas d'un écoulement giratoire ou dissymétrique par exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets ou de tubes de Pitot doubles.*

3 Définitions et symboles

3.1 Définitions

Dans le cadre de la présente Norme internationale les définitions données dans l'ISO 4006 sont applicables.

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

3.1.1 moulinet: Appareil muni d'un rotor dont la vitesse de rotation est fonction de la vitesse locale du fluide dans lequel il est immergé.

La présente Norme internationale ne traite que des moulinets à hélice, c'est-à-dire des moulinets dont le rotor est constitué par

1) Cette méthode est applicable à d'autres fluides monophasiques mais dans ce cas, des précautions particulières doivent être prises.

2) Les écoulements permanents observés dans les conduites sont, en pratique, des écoulements pour lesquels les grandeurs telles que vitesse, pression, masse volumique et température, varient dans le temps autour de valeurs moyennes indépendantes du temps; ce sont, en fait, des «écoulements permanents en moyenne».

une hélice tournant autour d'un axe sensiblement parallèle à l'écoulement.

NOTE — Cette définition n'interdit évidemment pas l'emploi d'hélices autocomposantes (voir 6.1.5), dont le mérite est précisément de pouvoir être utilisées sous une inclinaison relativement importante par rapport à la direction locale de l'écoulement. Par contre, l'emploi de moulins à coupelles n'est pas autorisé dans le cadre de la présente norme.

3.1.2 batterie fixe : Ensemble de moulins montés sur un ou plusieurs supports fixes et explorant simultanément toute la section de mesurage.

3.1.3 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 mesurage de la vitesse les plus proches de la paroi.

3.1.4 vitesse débitante : Rapport du débit-volume (intégrale dans la section de mesurage de la composante axiale des vitesses locales) à l'aire de la section de mesurage.

3.1.5 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 dans la section de mesurage.

3.1.6 longueur droite : Tronçon de conduite dont l'axe est rectiligne et dont la surface et la forme de la section droite sont constantes; la forme de cette section est généralement circulaire ou rectangulaire, mais peut être annulaire ou de toute autre forme régulière.

3.1.7 singularité : Tout élément ou configuration d'une conduite qui fait que cette conduite n'a pas une longueur droite ou qui entraîne une variation très importante de rugosité à la paroi.

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

3.1.8 diamètre hydraulique : Diamètre égal à quatre fois le rayon hydraulique, c'est-à-dire quatre fois le quotient de l'aire de la section mouillée par le périmètre mouillé. (Pour une conduite en charge de section circulaire, le diamètre hydraulique est donc égal au diamètre géométrique.)

3.1.9 indice de dissymétrie (pour les conduites circulaires) : Quotient de l'écart-type des vitesses moyennes calculées le long de chaque rayon (c'est-à-dire de chaque ligne radiale allant du centre de la conduite à la paroi le long de laquelle sont situés les points de mesure de la vitesse) par la vitesse débitante dans la conduite, soit :

$$Y = \frac{\sigma_{U_i}}{U} = \frac{1}{U} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - U)^2}{n - 1} \right]^{1/2}$$

où

U_i est la vitesse moyenne calculée conformément à la méthode d'intégration retenue, à partir des vitesses mesurées en chaque point du rayon i (voir 8.2 et 9.2);

U est la vitesse débitante calculée à partir de toutes les vitesses locales mesurées dans la section;

n est le nombre de rayons le long desquels sont faites les mesures.

3.1.10 répartition régulière des vitesses : Répartition des vitesses s'approchant suffisamment d'une répartition pleinement établie pour permettre une mesure précise du débit.

3.2 Symboles

Symbole	Grandeur	Dimensions	Unités SI
A	Aire de la section de mesurage	L^2	m^2
a, a'	Distance à la paroi la plus proche du point de mesurage extrême, le long d'une droite de mesurage en section rectangulaire	L	m
D	Diamètre de la conduite	L	m
d	Diamètre de l'hélice	L	m
e	Incertitude (valeur absolue)	$1)$	$1)$
e_r	Incertitude aléatoire	$1)$	$1)$
e_s	Incertitude systématique	$1)$	$1)$
E	Incertitude relative	—	—
E_r	Incertitude aléatoire relative	—	—
E_s	Incertitude systématique relative	—	—
H	Côté court de la section d'une conduite rectangulaire	L	m
h	Distance d'un point de mesure à la paroi d'origine, parallèlement au côté court	L	m
k	Rugosité uniforme équivalente	L	m
L	Côté long de la section d'une conduite rectangulaire	L	m
l	Distance d'un point de mesure à la paroi d'origine, parallèlement au côté long	L	m
m	Coefficient de couche limite	—	—
n	Fréquence de rotation de l'hélice	T^{-1}	tr/s
p	Nombre de points de mesurage sur un rayon (section circulaire) ou sur une droite (section rectangulaire)	—	—
q_v	Débit-volume	$L^3 T^{-1}$	m^3/s
R	Rayon de la conduite	L	m
r	Rayon d'une circonférence de mesurage	L	m
r^*	Rayon relatif d'une circonférence de mesurage $r^* = \frac{r}{R}$	—	—
Re	Nombre de Reynolds	—	—
U	Vitesse débitante	LT^{-1}	m/s
u	Vitesse moyenne le long d'une circonférence ou d'une droite de mesurage	LT^{-1}	m/s

Symbole	Grandeur	Dimensions	Unités SI
v	Vitesse locale du fluide	LT^{-1}	m/s
v_0	Vitesse locale au centre de la conduite	LT^{-1}	m/s
Y	Indice de dissymétrie de l'écoulement	—	—
y	Distance d'un point de mesurage à la paroi la plus proche	L	m
y^*	Intervalle relatif entre deux points de mesurage $y^* = \frac{l_i - l_{i-1}}{L}$	—	—
α	Angle polaire d'un point de mesurage (en section circulaire)	—	rad
λ	Coefficient universel de perte de charge	—	—

1) Les dimensions et unités sont celles de la grandeur considérée.

4 Principe

4.1 Généralités

Le principe de la méthode consiste :

- à mesurer les dimensions de la section de jaugeage qui aura été choisie perpendiculairement à l'axe de la conduite; ce mesurage a pour but de définir l'aire de cette section (voir 4.2);
- à définir dans cette section la position des points de mesurage, qui devront être choisis en nombre suffisant pour connaître la répartition des vitesses de façon satisfaisante (voir 4.3);
- à mesurer la composante axiale de la vitesse en ces points de mesurage;
- à déterminer la vitesse débitante à partir des mesures précédentes;
- à calculer le débit-volume égal au produit de l'aire de la section par la vitesse débitante.

Toutefois, pour certaines sections de forme particulière, le traitement des mesures conduit directement à la détermination du débit sans passer par la détermination préalable de l'aire de la section et de la vitesse débitante (voir annexe A).

L'erreur que l'on commet en utilisant la méthode d'exploration du champ des vitesses dépend, entre autres facteurs, de la forme du profil des vitesses ainsi que du nombre et de l'implantement des points de mesurage.

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

4.1.1 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 correspondant au débit pariétal (voir 3.1.3) 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 librement, mais doivent permettre une connaissance satisfaisante du champ des vitesses.

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

La seule différence entre cette méthode et la précédente (4.1.1) consiste dans le fait que le graphique du profil des vitesses est remplacé par une courbe algébrique et que l'intégration est effectuée de manière analytique.

4.1.3 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.

4.2 Mesurage de la section de jaugeage

4.2.1 Sections circulaires

Le diamètre moyen de la conduite est pris égal à la moyenne arithmétique des mesures obtenues suivant au moins quatre diamètres de la section de jaugeage 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.

4.2.2 Sections rectangulaires

Le côté long et le côté court de la section rectangulaire doivent être mesurés sur au moins chaque droite passant par les points de mesurage. Si la différence entre les largeurs (ou les hauteurs) correspondant à deux droites de mesurage consécutives est supérieure à 1 %, le nombre de largeurs (ou de hauteurs) mesurées doit être doublé.

4.3 Mesurage des vitesses locales

4.3.1 Généralités

La vitesse de l'écoulement en un point de la section de jaugeage est déterminée en mesurant la vitesse de rotation d'un moulinet placé en ce point et en portant cette valeur dans l'équation d'étalonnage du moulinet.

La vitesse de rotation du moulinet peut être obtenue

- soit en comptant le nombre de tours accomplis par l'hélice en un temps prédéterminé,
- soit en mesurant le temps nécessaire pour que l'hélice accomplisse un nombre de tours prédéterminé.

Une autre méthode qui peut être utilisée est celle suivant laquelle la mesure de la vitesse est obtenue par mesurage direct de la fréquence du signal.

Les différents points de mesurage dans la section peuvent être explorés simultanément ou successivement (voir 4.3.2 et 4.3.3).

4.3.2 Mesurages simultanés

Lorsqu'on emploie simultanément plusieurs moulinets, la méthode par comptage du temps nécessite un appareillage de comptage plus complexe que la méthode par comptage du nombre des tours, mais elle est plus précise. En effet, on compare avec celle-ci une erreur due à l'intervalle de temps choisi qui peut ne pas correspondre à un nombre entier de tours.

Les vitesses locales étant généralement sujettes à des fluctuations de longue période, il est nécessaire de prévoir une durée de mesurage suffisante pour déterminer correctement la vitesse moyenne. Cette durée pourra être fixée en mesurant un même débit avec des temps successivement croissants. La durée de mesurage, t , à adopter doit être telle que les valeurs de la vitesse moyenne dans la section, obtenues avec des temps de mesurage t et $t + \Delta t$, ne diffèrent pas entre elles de plus de x %. Par exemple, Δt pourra être de l'ordre de 30 s, et x pourra être choisi égal à 0,1 %. Le temps t peut être variable selon la vitesse moyenne de l'écoulement.

4.3.3 Mesurages non simultanés

Dans le cas où tous les points de mesurage des vitesses ne sont pas explorés simultanément, il est essentiel que la forme du profil des vitesses dans la section de jaugeage reste stable et ne soit pas affectée par les variations éventuelles du débit pendant tout le temps du mesurage. On devra alors vérifier que l'écoulement est permanent, et éventuellement corriger les vitesses ponctuelles, à l'aide d'un mesurage continu pendant toute la durée du jaugeage, de la vitesse en un point de référence.

Si l'on ne dispose que d'un seul dispositif de mesurage, il y a lieu de s'assurer que l'écoulement est permanent en réitérant fréquemment le mesurage au point de référence.

Cependant, il faut signaler que des fluctuations du profil des vitesses peuvent se produire 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 que le débit est permanent à l'aide de tout dispositif déprimogène (appareil déprimogène, normalisé ou non, contrôle piézométrique sur un convergent, un coude, une bêche spirale, un dispositif indicateur de perte de charge singulière, etc.), même non étalonné, pourvu que l'on soit assuré de sa fidélité et d'une sensibilité suffisante.

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 de référence). 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 de référence $v_{r,0}$ correspondant au débit q_0 et la vitesse de référence $v_{r,t}$ à l'instant t :

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

où $v_{i,0}$ est la vitesse au point i à utiliser pour l'intégration.

4.3.4 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 mesurages 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 3.1.5)], 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, pour une large gamme de nombre de Reynolds).

Il peut également être 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, le mesurage suspecté doit être recommencé, sinon, il doit être éliminé et le profil des vitesses tracé sur la base des profils obtenus précédemment pourvu qu'il y ait des raisons indépendantes de penser que cette mesure suspectée est fautive.

4.4 Emplacement et nombre de points de mesurage dans la section

4.4.1 Généralités

La position des points de mesurage dépend de la méthode choisie pour calculer le débit. Les règles relatives aux méthodes spécifiées dans la présente Norme internationale sont données dans les chapitres 8, 9 et 10, respectivement.

Quelle que soit la méthode, les règles dimensionnelles suivantes doivent être respectées :

— distance minimale entre l'axe du moulinet et la paroi : $0,75d$;

— entraxe minimal entre deux moulinets : $(d_1 + d_2)/2 + 0,03$ m, d_1 et d_2 étant les diamètres extérieurs de l'hélice des moulinets.

NOTE — d_1 et d_2 sont le plus souvent égaux, mais il peut être utile de placer au voisinage de la paroi des hélices de plus faible diamètre afin d'explorer le mieux possible l'écoulement dans cette zone (voir chapitre 8).

Le positionnement du moulinet doit être mesuré avec une incertitude égale à la plus petite des valeurs suivantes :

$\pm 0,001 L$, L étant la dimension de la conduite parallèlement à la mesure du positionnement du moulinet;

$\pm 0,02 y$, y étant la distance du moulinet à la paroi la plus proche.

Les sous-paragraphes 4.4.2 et 4.4.3 prescrivant un nombre minimal de points de mesurage s'appliquent 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 mesurage sera avantageusement accru dans la

mesure où les règles dimensionnelles ci-dessus le permettent et où cela n'entraîne pas d'effet d'obstruction sensible (voir 6.4.3).

Quand on utilise un seul moulinet 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 tous les mesurages de positionnement. Dans ces circonstances, il est recommandé, dans le cas d'une conduite de section circulaire, 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.

Cependant, les problèmes dus à l'obstruction et aux vibrations peuvent s'avérer plus graves lorsque l'exploration est effectuée sur un diamètre complet.

4.4.2 Sections circulaires

Les points de mesure dans les sections circulaires doivent être situés aux intersections d'un nombre donné de circonférences centrées sur l'axe de la conduite et d'un nombre donné de diamètres d'égal espacement angulaire.

Les nombres minimaux recommandés dans le cadre de la présente Norme internationale sont de trois circonférences et de deux diamètres perpendiculaires entre eux (voir note 2 ci-dessous), de sorte que le nombre minimal de points de mesure dans la section soit de 12. Un point de mesure supplémentaire au centre de la conduite est souhaitable pour vérifier la forme du profil des vitesses.

Cependant, ce nombre minimal n'est acceptable que si l'une des deux conditions suivantes est remplie :

- si on a la quasi-certitude que la répartition des vitesses est très proche d'une répartition axi-symétrique, soit du fait du tracé de la conduite, soit à la suite de mesures effectuées précédemment dans la même section, ou
- si la mise en place d'un nombre plus élevé de diamètres entraîne une obstruction rédhibitoire de la section de mesure (voir 6.4.3).

Dans le cas contraire, il faudra procéder à une exploration plus serrée du champ des vitesses, par exemple en portant à trois le nombre des diamètres. Il faut en effet souligner que, le plus souvent, l'incertitude sur la mesure du débit sera davantage réduite en augmentant le nombre de rayons sur lesquels les mesures sont faites, plutôt qu'en augmentant le nombre de points par rayon; in n'y aurait cependant guère d'intérêt à dépasser le nombre de quatre diamètres.

NOTES

1 Quand les mesurages sont faits au moyen d'une batterie fixe, on se référera à 6.4.4 pour le diamètre minimal des conduites dans lesquelles cette méthode est applicable; mais, en tout état de cause, les prescriptions générales données en 4.4.1 relatives à l'espacement des moulinets conduisent à interdire l'emploi d'une batterie fixe dans les conduites de diamètre inférieur à $7,5 d + 0,18$ m.

2 Si l'on ne recherche pas une grande précision, on peut effectuer les mesurages le long d'un seul diamètre, à condition qu'il y ait une longueur droite d'au moins $60 D$ en amont de la section de mesure et que

que le nombre de Reynolds soit supérieur aux valeurs données dans le tableau 1, pour les valeurs correspondantes du coefficient universel de perte de charge λ (pour l'évaluation de λ , voir annexe E).

Tableau 1 — Nombre de Reynolds minimal en fonction du coefficient universel de perte de charge, λ

λ	Re_D
$> 0,03$	10^4
0,025	3×10^4
0,02	10^5
0,01	10^6

4.4.3 Sections rectangulaires

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

NOTE — Quand les mesurages sont faits au moyen d'une batterie fixe, on se référera à 6.4.4 pour les dimensions minimales des conduites dans lesquelles cette méthode est applicable; en tout état de cause, les prescriptions générales données en 4.4.1, relatives à l'espacement des moulinets, conduisent à interdire l'emploi d'une batterie fixe dans les conduites dont la plus petite dimension est inférieure à $5,5 d + 0,12$ m.

5 Description du moulinet

Le moulinet à hélice se compose d'une hélice, d'un axe de rotation, de paliers et du corps du moulinet avec le dispositif de comptage.

Chaque moulinet peut être équipé d'hélices de différents types (pas, diamètre, etc.). L'hélice comporte deux pales ou plus, et elle peut être fabriquée en métal ou en matière plastique.

Les moulinets pour mesurages in situ doivent être fabriqués entièrement en matériau inoxydable ou bien être protégés de façon efficace contre la corrosion. Ils doivent être de construction suffisamment robuste pour que leur étalonnage reste valable dans les conditions normales de fonctionnement in situ.

Les pièces détachées doivent être interchangeables pour permettre un remplacement aisé des parties usées ou endommagées, mais ce remplacement ne doit pas accroître l'incertitude de mesurage.

Les signaux peuvent être émis par un contact mécanique ou un moyen magnétique, électrique ou optique. Ils sont totalisés ou enregistrés sur un récepteur approprié, ou indiqués par un dispositif acoustique ou optique.

Le comptage doit être précis et sûr pour n'importe quelle vitesse comprise dans les limites d'emploi définies par le constructeur. Le nombre de signaux délivrés par révolution de l'hélice doit être compatible avec les vitesses à mesurer, la

conception du récepteur utilisé et un temps de mesurage acceptable. Dans certains cas, il sera donc nécessaire de pouvoir choisir le nombre de signaux par tour d'hélice.

Des dispositifs doivent être prévus pour fixer le moulinet sur une perche dans une position bien déterminée.

6 Conditions d'utilisation des moulinets

6.1 Choix de la section de mesurage

6.1.1 La section choisie pour effectuer les mesurages doit être située dans un alignement droit; elle doit être perpendiculaire à la direction de l'écoulement et de forme géométrique simple, par exemple circulaire ou rectangulaire. La section de mesurage doit être située dans une zone où les vitesses locales de l'écoulement se trouvent dans la gamme normale d'utilisation des moulinets employés (voir 6.4.2).

6.1.2 Au voisinage de la section de mesurage, l'écoulement doit pouvoir être considéré comme « régulier », c'est-à-dire qu'il doit être sensiblement parallèle et symétrique par rapport à l'axe de la conduite et qu'il ne doit présenter ni turbulence excessive ni giration. On pourra pour cela se référer à l'ISO 7194.

On admettra que l'écoulement est suffisamment régulier pour autoriser l'emploi de la présente Norme internationale si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

- a) en tout point de la section, l'angle de giration doit être inférieur ou égal à 5° ;
- b) l'indice de dissymétrie Y (tel que défini en 3.1.9) doit être inférieur ou égal à 0,05.

En effet, à titre indicatif, on peut considérer qu'une giration globale de l'écoulement reste sans influence notable sur les limites de confiance, données dans la présente Norme internationale, du débit mesuré tant qu'elle se traduit par une inclinaison des vitesses locales par rapport à l'axe de la conduite inférieure à 5° . Quant à la valeur $Y = 0,05$, elle correspond approximativement à une incertitude composante sur le débit, due à la dissymétrie de la répartition des vitesses d'environ 0,35 %, pour autant que la section de mesurage soit explorée sur au moins six rayons.

6.1.3 Pour satisfaire à ces conditions, la section de mesurage doit être choisie suffisamment éloignée de toute singularité qui pourrait créer une dissymétrie, une giration ou de la turbulence. La longueur droite de tuyauterie qui peut être nécessaire varie avec la vitesse de l'écoulement, les singularités amont, la rugosité des parois, le niveau de turbulence et le degré de giration, s'il en existe.

À titre indicatif, on a souvent considéré que la longueur droite de tuyauterie entre la section de mesurage et toute singularité importante (voir 3.1.7) en amont, doit être d'au moins 20 fois le diamètre hydraulique de la conduite (voir 3.1.8). De même, la longueur droite entre la section de mesurage et toute singularité importante en aval, doit être d'au moins cinq fois le diamètre hydraulique de la conduite. Ces valeurs pouvaient être acceptées de façon assez générale lorsque les conduites présentaient des parois relativement rugueuses, mais la diminution générale de la rugosité hydraulique due à l'emploi de revêtements modernes très lisses, aussi bien qu'à l'existence de

conduites de diamètre de plus en plus grand, conduit à une grande prudence dans l'estimation des longueurs droites nécessaires.

De plus, on devra se montrer particulièrement exigeant lorsque la nature des singularités amont (coudes dans des plans différents, par exemple) est telle qu'elle peut entraîner une giration de l'écoulement, toujours très longue à disparaître.

6.1.4 Si l'on n'est pas certain des conditions de l'écoulement, il est nécessaire d'effectuer des explorations préliminaires permettant de s'assurer que l'écoulement est régulier.

Si ces explorations montrent que l'écoulement n'est pas satisfaisant, c'est-à-dire qu'il ne répond pas aux conditions définies en 6.1.2, on doit se référer à l'ISO 7194 pour effectuer le mesurage du débit. Il faut cependant souligner que la dissymétrie de la répartition des vitesses est, jusqu'à un certain point, prise en compte par le principe même de la méthode d'exploration du champ des vitesses et qu'elle n'augmente que peu (normalement moins de $\pm 1\%$ si Y n'est pas supérieur à 0,25) l'imprécision des mesures, tout au moins si le nombre de points de mesurage est suffisant, au contraire de la giration qui fausse chaque mesure de vitesse locale.

6.1.5 Bien que des mesurages au moulinet en écoulement oblique ou convergent doivent autant que possible être évités, ils peuvent cependant être pratiqués si l'une des conditions suivantes est satisfaite :

- a) les moulinets utilisés sont étudiés pour mesurer avec précision la vraie composante axiale de la vitesse, cela étant contrôlé par un étalonnage approprié jusqu'à la vitesse maximale prévisible de l'écoulement;
- b) la déviation maximale de l'écoulement par rapport à l'axe du moulinet ne dépasse pas 5° .

NOTE — Les hélices usuelles peuvent donner des indications correctes jusqu'à des incidences de 5° avec une exactitude de 1 % (écart relatif entre la vitesse mesurée et la composante axiale de la vitesse de l'écoulement). Il existe des hélices autocomposantes qui mesurent directement la composante axiale de la vitesse avec une erreur inférieure à 1 % pour des angles d'incidence supérieurs, mais il est nécessaire d'attirer l'attention sur la sensibilité particulière de ce type d'hélices à l'influence du support du moulinet (notamment l'angle formé par le plan contenant le vecteur vitesse et l'axe du moulinet avec le plan contenant le support et l'axe du moulinet) et à la turbulence de l'écoulement.

6.2 Dispositifs pour l'amélioration de l'écoulement

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 giration, il est parfois possible d'y remédier à l'aide d'une installation de guidage. Celle-ci comportera une entrée légèrement convergente raccordée, sans que cela provoque des décollements, à un tronçon droit dont la longueur sera si possible au moins égale à deux fois la plus grande dimension de la conduite. On s'assurera par un calcul que les moulinets les plus proches de la paroi sont dans la couche limite

dont l'épaisseur est donnée par $\delta = 0,37 x \left(\frac{U_x}{v} \right)^{-0,2}$ et que

les procédures d'évaluation du débit pariétal s'appliquent. Dans le cas contraire, la vitesse sera admise invariable entre le moulinet le plus proche de la paroi et la couche limite; le débit

pariétal ne sera calculé que dans celle-ci. Si une intégration arithmétique est utilisée, on vérifiera, pour au moins une mesure du débit, qu'aucun écart anormal n'existe avec une intégration graphique ou numérique.

Il faut toutefois signaler que l'installation d'un tel dispositif peut modifier la valeur du débit.

6.3 Étalonnage du moulinet

6.3.1 L'étalonnage d'un moulinet consiste à déterminer expérimentalement la relation entre la vitesse de l'eau et celle de l'hélice. Cette relation est représentée en général par une ou plusieurs droites d'équation :

$$v = an + b$$

où

v est la vitesse de l'eau, en mètres par seconde;

n est la vitesse de rotation de l'hélice, en tours par seconde;

a et b sont des constantes à déterminer par étalonnage.

6.3.2 L'étalonnage doit être effectué dans une installation conçue à cet effet, en conformité avec les prescriptions de l'ISO 3455.

6.3.3 Lors de son étalonnage, le moulinet doit être équipé du même support que celui qui sera utilisé lors des mesurages.

6.3.4 Chaque moulinet doit être périodiquement réétalonné, à des intervalles qui dépendent de ses conditions d'emploi. À titre indicatif, on peut envisager des intervalles de quelques centaines d'heures de fonctionnement dans une eau de qualité normale. Cependant, après une série d'essais, il est impératif de contrôler l'étalonnage d'un moulinet dont l'hélice ou les paliers paraîtraient avoir été endommagés (chocs, corrosion, abrasion, etc.). Un réétalonnage est également nécessaire si l'on a changé un élément du moulinet.

6.3.5 En principe, chaque moulinet doit être étalonné individuellement. Cependant, si les hélices d'une série de moulinets sont de fabrication très homogène et si un premier étalonnage a fait la preuve de la similitude hydraulique des hélices, un étalonnage statistique peut être établi à partir d'un nombre suffisant d'étalonnages particuliers dans des conditions bien définies. Dans ce cas, l'organisme étalonneur doit indiquer les écarts maximaux probables par rapport à la formule moyenne d'étalonnage proposée.

6.4 Limites d'utilisation

6.4.1 Nature du liquide

Les moulinets ne doivent pas être utilisés lorsque des matières en solution ou en suspension dans l'eau de la conduite risquent de contrarier leur bon fonctionnement.

6.4.2 Gamme des vitesses

Les moulinets doivent être utilisés seulement dans leur gamme normale d'utilisation, c'est-à-dire la gamme des vitesses pour laquelle ils ont été étalonnés; l'extrapolation vers des grandes vitesses peut cependant être tolérée jusqu'à 1,25 fois la vitesse maximale d'étalonnage dans le cas où un étalonnage à ces grandes vitesses ne peut être obtenu.

On ne doit, par contre, jamais extrapoler la courbe d'étalonnage dans la zone des faibles vitesses, dans laquelle la précision et surtout la fidélité des moulinets diminuent considérablement. D'une façon générale, on ne doit pas utiliser un moulinet pour des vitesses inférieures à un certain seuil au-dessous duquel le manque de fidélité peut conduire à des erreurs importantes (ce seuil est fonction du type de moulinet; il est inférieur à 0,5 tr/s pour un moulinet en bon état d'entretien).

6.4.3 Effet d'obstruction

La répartition des vitesses dans la conduite est perturbée par les moulinets et leur support, ce qui entraîne une erreur par excès sur le mesurage du débit.

Des études théoriques et expérimentales ont montré que l'importance de cette erreur dépend :

- du nombre, du profil et de l'aire du maître-couple des perches supports (et éventuellement de la pièce de jonction centrale);
- de la distance de la partie active de l'hélice à la perche-support;
- du type, du nombre et des dimensions des moulinets utilisés (dimensions de l'hélice, du moyeu, du corps, etc.).

En général, cependant, on a constaté que l'encombrement relatif du support dans la section de mesurage, c'est-à-dire le rapport du maître-couple des supports à l'aire totale de la section de la conduite, est le paramètre géométrique le plus important. Si cet encombrement relatif est compris entre 2 % et 6 %, une correction doit être apportée (voir annexe B); s'il est supérieur à 6 %, le mesurage ne peut pas être effectué conformément à la présente Norme internationale.

6.4.4 Limitations dimensionnelles

Les remarques ci-dessus relatives à l'effet d'obstruction d'une part et les prescriptions dimensionnelles spécifiées en 4.4.1 d'autre part, conduisent à proscrire les jaugeages au moulinet dans les conduites dont les dimensions sont trop petites par rapport aux dimensions des moulinets utilisés. On choisira donc des moulinets et des perches-supports dont les dimensions sont adaptées à celles de la conduite où doit être fait le mesurage.

D'une façon générale, on peut admettre qu'une batterie fixe de moulinets peut être utilisée si le diamètre d'une conduite de section circulaire est supérieur à neuf fois le diamètre des hélices, ou si la plus petite dimension d'une section rectangulaire est supérieure à huit fois le diamètre des hélices, et à condition que l'encombrement relatif défini en 6.4.3 soit inférieur à 6 %. (Voir également 4.4.2 et 4.4.3.)

C'est ainsi, par exemple, qu'avec les types de moulinets et de supports couramment employés pour les mesurages industriels, comportant des hélices de 0,10 à 0,125 m de diamètre, il est généralement admis dans la pratique et compte tenu, d'une part, des règles générales relatives à l'espacement des moulinets (voir 4.4.2) et, d'autre part, de l'encombrement du support, qu'on ne peut utiliser une batterie fixe montée sur un croisillon que dans les conduites circulaires de diamètre supérieur à 1,4 m. En section rectangulaire, on admet de même que la plus petite dimension de la conduite (à laquelle les perches supports seront parallèles) doit être au moins égale à 1 m, mais, en outre, l'autre dimension doit être suffisante pour limiter l'effet d'obstruction (voir 6.4.3).

Lorsque le débit doit être calculé par une méthode d'intégration arithmétique (voir chapitre 10), les positions imposées pour les moulinets et en particulier pour ceux qui sont les plus proches de la paroi conduisent à des valeurs minimales D/d ou H/d sensiblement plus élevées (par exemple $D/d > 23$ pour une méthode à trois points par rayon en section circulaire).

Dans les conduites de plus faibles dimensions, on pourra utiliser des moulinets équipés d'hélices plus petites (de l'ordre de 0,03 à 0,05 m de diamètre par exemple) ou même des micro-moulinets montés sur un croisillon aussi léger que possible. On pourra aussi utiliser un dispositif, de réalisation souvent complexe, permettant d'effectuer des mesurages non simultanés (voir 7.2.2, 7.2.3 ou 7.3.2).

6.4.5 Influence de la turbulence et des fluctuations de vitesse

Bien que l'influence des composantes longitudinales et transversales de la turbulence de l'écoulement sur le comportement du moulinet soit encore mal définie, l'attention doit être attirée sur la différence fondamentale existant entre l'étalonnage du moulinet par traînage en eau morte et son utilisation en écoulement turbulent. Les fluctuations longitudinales tendent à entacher la vitesse mesurée au moulinet d'une erreur par excès, tandis que les fluctuations transversales entraînent généralement une erreur par défaut. Sans oublier que de nombreux autres facteurs influent sur la réponse du moulinet, on peut observer que l'erreur commise augmentera d'autant plus que :

- l'amplitude et la fréquence des fluctuations seront plus grandes;
- la vitesse moyenne sera plus faible;
- le moment d'inertie de l'hélice sera plus grand.

6.5 Contrôle et entretien du moulinet

6.5.1 Contrôle

Avant et après chaque mesurage, il faut s'assurer du bon état du moulinet, à savoir :

- libre rotation dans les paliers;
- non-déformation de l'hélice;
- bon fonctionnement du dispositif de détection de la vitesse de rotation.

Le contrôle du frottement dans les paliers peut être effectué en observant le ralentissement de l'hélice lancée à une certaine vitesse. En aucun cas, il ne doit y avoir d'arrêt brutal.

La forme de l'hélice peut être contrôlée au moyen d'un moule en plâtre ou d'un gabarit métallique.

6.5.2 Entretien

Après chaque série de jaugeages, le moulinet doit être démonté, nettoyé soigneusement, puis graissé à nouveau avec le même lubrifiant que celui ayant servi lors de l'étalonnage.

7 Mise en place des moulinets dans la conduite

7.1 Mise en place des moulinets

Les moulinets doivent être fixés rigidement sur leur support de telle sorte que l'axe de l'hélice soit normal au plan de la section de mesure à mieux que 2° près.

Les supports d'une batterie fixe doivent être eux-mêmes rigidement liés aux parois de la conduite. Ils doivent être étudiés pour présenter une résistance mécanique suffisante (afin notamment d'éviter toute vibration nuisible), une traînée minimale et stable, et le minimum d'interférences sur le fonctionnement des moulinets.

Des conseils relatifs aux profils des perches-supports sont donnés à l'annexe C.

7.2 Montage en section circulaire

7.2.1 Batterie fixe

Les moulinets sont généralement employés en batterie fixe. Les supports sont alors disposés selon les rayons de la conduite pour constituer au moins deux diamètres (voir 4.4.2); un exemple en est donné à la figure 1. Autant que possible, aucun des bras de mesure ne doit être situé dans le plan vertical de l'axe de la conduite pour éviter l'influence éventuelle des poches d'air ou de sédiments. L'obstruction au centre peut être réduite en utilisant des bras supports radiaux en porte-à-faux à partir de la paroi de la conduite; on n'a alors besoin que d'un seul diamètre passant effectivement par le centre de la conduite.

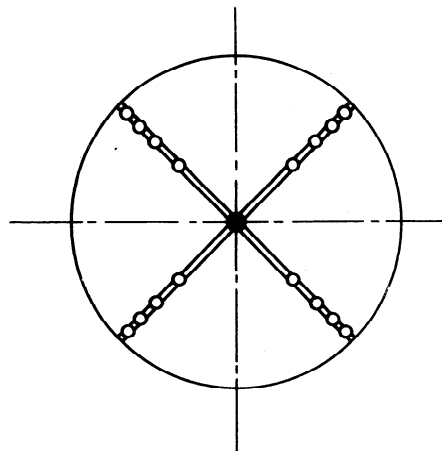


Figure 1 — Batterie fixe de moulinets, montés sur un croisillon dans une conduite circulaire