
NORME INTERNATIONALE



3354

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

Mesure du débit d'eau propre dans les conduites fermées — Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets

Measurement of clean water flow in closed conduits — Velocity-area method using current-meters

Première édition — 1975-09-15

CDU 681.121.84

Réf. n° : ISO 3354-1975 (F)

Descripteurs : mesurage de débit, écoulement en conduite fermée, écoulement d'eau, mesurage de vitesse, moulinet.

AVANT-PROPOS

L'ISO (Organisation Internationale de Normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (Comités Membres ISO). L'élaboration de Normes Internationales est confiée aux Comités Techniques 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 3354 a été établie par le Comité Technique ISO/TC 30, *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées*, et soumise aux Comités Membres en mai 1974.

Elle a été approuvée par les Comités Membres des pays suivants :

Allemagne	France	Suisse
Australie	Inde	Tchécoslovaquie
Autriche	Irlande	Thaïlande
Belgique	Pays-Bas	Turquie
Bulgarie	Roumanie	U.R.S.S.
Espagne	Royaume-Uni	Yougoslavie

Le Comité Membre du pays suivant a désapprouvé le document pour des raisons techniques :

U.S.A.

SOMMAIRE	Page
1 Objet et domaine d'application	1
2 Référence	1
3 Définitions	1
4 Principe	1
4.1 Généralités	1
4.2 Mesurage de la section de jaugeage	2
4.3 Mesurage des vitesses locales	2
4.4 Emplacement et nombre de points de mesurage dans la section	3
5 Description du moulinet	4
6 Conditions d'utilisation des moulinets	4
6.1 Choix de la section de mesurage	4
6.2 Dispositifs pour l'amélioration de l'écoulement	5
6.3 Étalonnage du moulinet	5
6.4 Limites d'utilisation	5
6.5 Contrôle et entretien du moulinet	6
7 Mise en place des moulinets dans la conduite	6
7.1 Mise en place des moulinets	6
7.2 Montage en section circulaire	7
7.3 Montage en section rectangulaire	7
8 Détermination de la vitesse débitante par intégration graphique du champ des vitesses	8
8.1 Sections circulaires	8
8.2 Sections rectangulaires	10
9 Détermination de la vitesse débitante par intégration numérique du champ des vitesses	11
9.1 Sections circulaires	12
9.2 Sections rectangulaires	12
10 Détermination de la vitesse débitante par les méthodes arithmétiques	13
10.1 Méthode «log-linéaire»	13
10.2 Méthode «log-Tchebycheff»	15

11 Erreurs	16
11.1 Définition de l'erreur	16
11.2 Erreurs sur l'évaluation de la vitesse locale	16
11.3 Erreurs sur l'estimation du débit	16
11.4 Définition de l'écart-type	17
11.5 Définition de l'erreur limite	17
11.6 Calcul de l'écart-type	18
Annexes	
A : Corrections à apporter pour l'effet d'obstruction	19
B : Recommandations pour le choix du type de moulinet et de perche-support	20
C : 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	21
D : Détermination du coefficient m pour l'extrapolation au voisinage de la paroi	23
E : Exemples de valeurs des composantes de l'erreur globale	24
F : Exemple de calcul de l'erreur limite sur la mesure de débit à l'aide de moulinets	25

Mesure du débit d'eau propre dans les conduites fermées — Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets

1 OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

La présente Norme Internationale spécifie une méthode de détermination, par exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets à hélice, du débit-volume, dans une conduite fermée, d'un écoulement régulier.¹⁾

- d'eau propre²⁾, ou considérée comme telle,
- en charge dans cette conduite,
- en régime permanent.

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. La méthode de mesurage et les prescriptions définies dans la présente Norme Internationale visent à obtenir une erreur limite (au niveau de probabilité 95 %) sur le débit au plus égale à $\pm 2\%$, à condition que la correction correspondant à l'effet d'obstruction ait été apportée. Si certaines conditions mentionnées dans la présente Norme Internationale ne sont pas satisfaites, la méthode peut toutefois s'appliquer mais l'erreur-limite sur le débit est alors plus grande.

2 RÉFÉRENCE

ISO 3455, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Étalonnage des moulinets en bassins découverts rectilignes.*³⁾

3 DÉFINITIONS

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

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

3.3 débit pariétal : Volume de liquide qui s'écoule par unité de temps, 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.

3.4 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.

3.5 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.

3.6 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 éventuellement rectangulaire.

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

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

4 PRINCIPE

4.1 Généralités

Le principe de la méthode consiste :

- a) 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);

1) Voir 6.1.

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

3) Actuellement au stade de projet.

- b) à définir dans cette section la position des points de mesurage;
- c) à mesurer la composante axiale de la vitesse en ces points de mesurage choisis en nombre suffisant pour connaître la répartition des vitesses de façon satisfaisante (voir 4.3);
- d) à déterminer la vitesse débitante à partir des mesures précédentes;
- e) à calculer le débit-volume égal au produit de l'aire de la section par la vitesse débitante.

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'emplacement des points de mesurage.

La présente Norme Internationale expose trois types de méthodes de détermination de la vitesse débitante, à savoir :

- *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 satisfait aux lois de la couche limite turbulente.

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 distribution 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

La largeur et la hauteur de la conduite doivent être mesurées 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

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 4.3.1 et 4.3.2).

4.3.1 Mesurages simultanés

Lorsqu'on emploie simultanément plusieurs moulinets, la seconde méthode indiquée ci-dessus nécessite un appareillage de comptage plus complexe que la première, mais elle est plus précise. En effet, on commet avec la première méthode une erreur, dont la résultante statistique est par excès, due aux fractions d'intervalles non prises en compte au début et à la fin de la durée de comptage; cette erreur est d'autant plus faible en valeur relative que le nombre de contacts comptés est plus grand.

Les écoulements étant généralement sujets 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 $(t + \Delta t)$ s, 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.

4.3.2 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.

Si tel est le cas, on pourra vérifier la stabilité de l'écoulement, 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 de la stabilité de l'écoulement en réitérant fréquemment le mesurage au point de référence.

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 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 :

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

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 ou non, 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.

4.3.3 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 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 3.3), 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 s'il y a 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 Prescriptions générales

Les règles à suivre pour la mise en place des points de mesurage 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, les règles dimensionnelles suivantes doivent être respectées :

- distance minimale entre l'axe du moulinet et la paroi : $0,75 d$,
- entraxe minimal entre deux moulinets : $d + 0,03 m$,

d étant le diamètre extérieur de l'hélice du moulinet;

Le positionnement du moulinet doit être mesuré avec une tolérance 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 paragraphes 4.4.2 et 4.4.3 prescrivent un nombre minimal de points de mesurage 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 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. Il est donc 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.

4.4.2 Sections circulaires

Les points de mesurage doivent être situés sur des circonférences concentriques et sur au moins deux diamètres de la section perpendiculaires entre eux.

On doit effectuer les mesurages en au moins trois points par rayon, de sorte que le nombre minimal de points dans la

section soit de 12. Un point de mesurage supplémentaire au centre de la conduite est souhaitable pour vérifier la forme du profil des vitesses.

NOTE — 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 ci-dessus, 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.

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; mais, en tout état de cause, les prescriptions générales ci-dessus, 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

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

5.2 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.

5.3 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*.

5.4 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.

5.5 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 indiquée 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.

5.6 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, perpendiculaire à la direction de l'écoulement et 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 des moulinets employés (voir 6.4.2).

6.1.2 Au voisinage de la section de mesurage, 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 mesurage doit donc être choisie suffisamment éloignée de toute singularité qui pourrait créer une dissymétrie, une rotation ou de la turbulence (voir 6.1.4).

La longueur droite de tuyauterie qui peut être nécessaire pour satisfaire ces conditions varie avec la vitesse de l'écoulement, les singularités amont, le niveau de turbulence et le degré de rotation, s'il en existe.

À titre indicatif, on considère généralement que, pour satisfaire à ces conditions, la longueur droite de conduite entre la section de mesurage et toute singularité importante¹⁾ 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 mesurage et toute singularité importante¹⁾ 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).

6.1.3 Bien que des mesurages au moulinet en écoulement oblique ou convergent doivent autant que possible être évités, ils peuvent cependant être pratiqués sous réserve que

- les moulinets utilisés soient étudiés pour mesurer avec précision la vraie composante axiale de la vitesse, cela étant contrôlé par un étalonnage approprié;
- 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 précision 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 l'attention doit être attirée sur la sensibilité particulière de ce type d'hélices à l'influence du support du moulinet et à la turbulence de l'écoulement.

1) Voir 3.7.

À titre indicatif, on peut considérer qu'une rotation est suffisamment faible pour ne pas accroître les limites de confiance, données dans la présente norme, sur le débit mesuré si elle se traduit par une inclinaison des vitesses locales par rapport à l'axe de la conduite inférieure à 5°.

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, on pourra parfois y remédier au moyen de l'un des dispositifs décrits en 6.2.

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 mesurage est nécessaire et on se référera alors à un document distinct, qui sera publié ultérieurement.

6.2 Dispositifs pour l'amélioration de l'écoulement

6.2.1 Si l'écoulement présente une rotation, on peut tenter de la supprimer à l'aide d'un dispositif antigiratoire 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 b doit être supérieure à $10 a$.

6.2.2 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'acquiescent une certaine efficacité qu'au prix d'une perte de charge assez élevée.

6.2.3 Les dispositifs décrits en 6.2.1 et 6.2.2 doivent être installés aussi loin que possible à l'amont de la section de mesurage et en tout cas à une distance de celle-ci au moins égale à cinq fois le diamètre d'une conduite de section circulaire (ou vingt fois le rayon hydraulique d'une conduite de section quelconque). De plus, ils ne doivent pas être placés immédiatement en aval d'une singularité.

6.2.4 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 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.

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.

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 Le procès-verbal d'étalonnage doit contenir

- un graphique sur lequel sont portés tous les points d'étalonnage et sont tracées les droites moyennes (en abscisses : n et en ordonnées : $\Delta v = v - A_0 n$, A_0 étant une valeur proche des valeurs A effectives);
- les équations $v = An + B$ des droites d'étalonnage, avec les limites des gammes de vitesses où chaque équation est applicable.

En outre, doivent être indiqués : les formes et dimensions du support du moulinet, le lubrifiant utilisé pour le graissage du moulinet, la température de l'eau du canal d'étalonnage.

6.3.5 En principe, chaque moulinet doit faire l'objet d'un étalonnage avant et après chaque série de mesurages. Cependant, si l'étalonnage a révélé la similitude hydraulique des hélices et si les hélices sont de fabrication très homogène, 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 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 les grandes vitesses peut cependant être tolérée 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, zone 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).

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.

Il est clair que l'importance de cette erreur dépend du type des moulinets utilisés, de leur nombre et du profil des perches. 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 A); s'il est supérieur à 6 %, le mesurage ne peut pas être effectué en respectant la présente Norme Internationale.

6.4.4 Limitations dimensionnelles

Les remarques ci-dessus relatives à l'effet d'obstruction d'une part, 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.

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 %.

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 (4 à 5 in) 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 (56 in). 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 (40 in), mais, en outre, l'autre dimension doit être suffisante pour limiter l'effet d'obstruction (voir 6.4.3).

Dans des conduites de plus faibles dimensions, on utilisera de préférence un dispositif 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 rigoureusement normal au plan de la section de mesure.

Les supports 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. Pour cela, il est particulièrement recommandé d'utiliser des perches à profil polygonal telles que celle décrite à l'annexe B.

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.

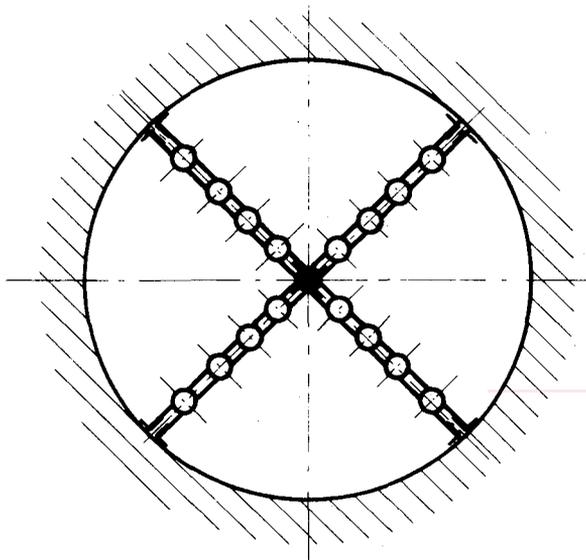


FIGURE 1 — Batterie fixe de moulinets, montés sur un croisillon dans une conduite circulaire

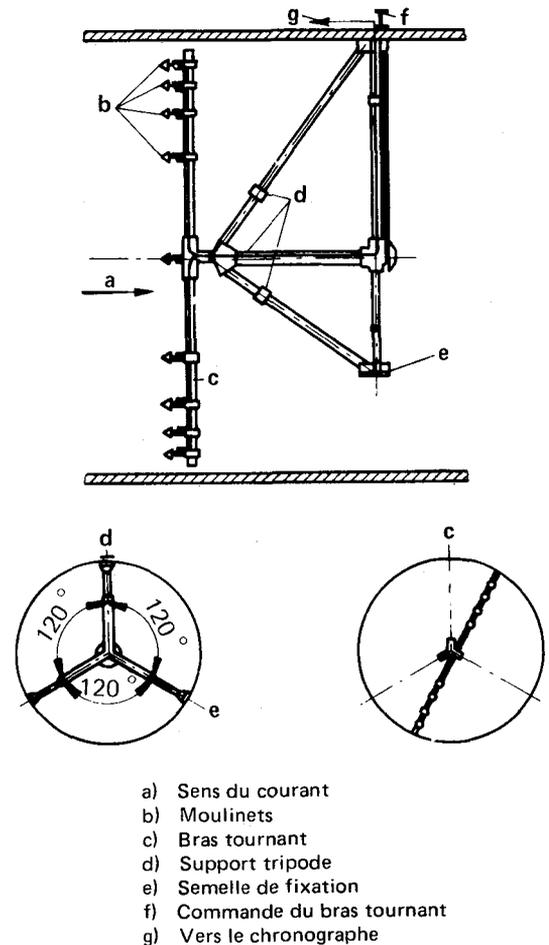
7.2.2 Bras tournant

Les moulinets peuvent être fixés sur un diamètre tournant autour de l'axe de la section (un exemple en est donné par la figure 2). Ce dispositif, complexe dans la réalisation (commande de la rotation depuis l'extérieur et risques de vibration à éviter), permet d'explorer un nombre beaucoup plus grand de points de mesurage.

Il peut éventuellement permettre un mesurage direct de la vitesse moyenne par circonférence, l'intégration le long de chaque circonférence étant obtenue par rotation du diamètre à vitesse constante; la vitesse tangentielle maximale du diamètre tournant ne doit pas dépasser 5 % de la vitesse moyenne de l'écoulement.

Afin de s'assurer que le mesurage n'est pas faussé par une inclinaison excessive de la vitesse apparente par rapport au moulinet, due à la superposition du mouvement du moulinet et d'une obliquité ou d'une rotation préexistante de l'écoulement, il est recommandé de vérifier les mesurages

faits par intégration continue soit en donnant au bras tournant une rotation de sens inverse, soit en effectuant un jaugeage par stationnement du bras en un certain nombre de positions fixes.



- a) Sens du courant
- b) Moulinets
- c) Bras tournant
- d) Support tripode
- e) Semelle de fixation
- f) Commande du bras tournant
- g) Vers le chronographe

FIGURE 2 — Dispositif de bras diamétral tournant dans une conduite circulaire

7.2.3 Exploration par un seul moulinet

Un moulinet peut être employé seul en le plaçant successivement en chaque point de mesurage. Cette méthode nécessite des aménagements spéciaux (vannes à sas) permettant de faire glisser la perche porte-moulinet le long du diamètre à explorer et de la transférer d'un diamètre de mesurage à l'autre tout en assurant l'étanchéité. Par ailleurs, il y a lieu de tenir compte des prescriptions de 4.3.2.

7.3 Montage en section rectangulaire

7.3.1 Batterie fixe

Les moulinets peuvent être employés en batterie fixe, montés sur un certain nombre de perches parallèles. Cette méthode peut avoir l'inconvénient de présenter un encombrement notable de la section par les supports.

7.3.2 Exploration de la section par une rangée de moulinets

Une autre méthode consiste à utiliser un chariot portant une (ou deux) rangée de moulinets qui se déplace de telle façon que les moulinets occupent successivement toutes les horizontales de mesure (ou éventuellement toutes les verticales). Ce dispositif exige une commande extérieure avec traversée étanche de certains organes. Par ailleurs, il y a lieu de tenir compte de 4.3.2.

Ce procédé peut éventuellement permettre un mesurage direct de la vitesse moyenne le long d'une verticale (ou d'une horizontale), l'intégration le long de chaque verticale (ou horizontale) étant obtenue par déplacement du chariot à vitesse constante; cette dernière ne doit pas dépasser 5 % de la vitesse moyenne de l'écoulement.

Afin de s'assurer que le mesurage n'est pas faussé par une inclinaison excessive de la vitesse apparente par rapport au moulinet, due à la superposition du mouvement du moulinet et d'une obliquité ou d'une rotation préexistante de l'écoulement, il est recommandé de vérifier les mesures obtenues par intégration continue soit en donnant au chariot un mouvement de sens inverse, soit en effectuant un jaugeage par stationnement du chariot en un certain nombre de positions fixes.

Cependant, dans le cas d'un écoulement dont la ligne piézométrique n'est que peu élevée par rapport à la génératrice supérieure de la conduite, la mise en oeuvre de ce procédé se trouve simplifiée : le chariot peut être déplacé dans des puits ou des rainures débouchant à l'air libre (rainures à batardeau par exemple) et son dispositif de commande reporté au-dessus de la cote piézométrique maximale.

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

Le principe général de cette méthode est exposé en 4.1.

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.

Le nombre et la position des autres points sont choisis de façon 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 trouvera à l'annexe C un exemple de répartition des points de mesure pour une section circulaire lorsqu'on ne possède aucune indication sur la répartition des vitesses dans la section.

D'une manière générale, on se référera à 4.4 pour déterminer le nombre et 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 α , et R est le rayon moyen de la section de mesure, la vitesse débitante est donnée par la formule

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

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

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

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 utilisée 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 ;¹⁾
- b) à tracer la courbe de variation de u_c en fonction de $(r_c/R)^2$ entre $r = 0$ et $r = r_n$;²⁾
- c) à déterminer graphiquement la valeur de l'aire comprise sous cette courbe entre $r = 0$ et $r = r_n$ (voir figure 3);
- d) à ajouter à cette valeur le terme³⁾ 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 circonférence de rayon r_n (c'est-à-dire la plus proche de la paroi);

m est un coefficient dépendant de la rugosité de la paroi et des conditions de l'écoulement, dont la valeur, qui peut être déterminée conformément aux indications données dans l'annexe D, est généralement comprise entre 4 (paroi rugueuse) et 10 (paroi lisse).