
Norme internationale



4374

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

**Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts —
Déversoirs horizontaux à seuil arrondi**

Liquid flow measurement in open channels — Round-nose horizontal crest weirs

Première édition — 1982-12-15

CDU 532.572 : 532.532

Réf. n° : ISO 4374-1982 (F)

Descripteurs : écoulement de liquide, écoulement en canal découvert, mesurage de débit, déversoir.

Prix basé sur 17 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 4374 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 113, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts*, et a été soumise aux comités membres en octobre 1980.

Les comités membres des pays suivants l'ont approuvée :

Afrique du Sud, Rép. d'	France	Royaume-Uni
Allemagne, R. F.	Inde	Suisse
Australie	Italie	Tchécoslovaquie
Chine	Pays-Bas	USA
Espagne	Roumanie	URSS

Le comité membre du pays suivant l'a désapprouvée pour des raisons techniques :

Belgique

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Déversoirs horizontaux à seuil arrondi

1 Objet et domaine d'application

1.1 La présente Norme internationale traite de la mesure du débit dans les rivières et chenaux artificiels à écoulement permanent à l'aide de déversoirs horizontaux à seuil arrondi (voir figure 1).

1.2 Les conditions d'écoulement considérées se limitent aux écoulements permanents ne dépendant que de la hauteur de charge à l'amont. La norme ne traite pas des écoulements noyés sur lesquels influent tant le niveau à l'amont que le niveau à l'aval.

1.3 Le déversoir horizontal à seuil arrondi a une gamme de débit et une limite modulaire satisfaisantes et peut être plus convenablement utilisé dans des installations de petite ou de moyenne taille. Il est particulièrement robuste et insensible aux dommages matériels mineurs.

1.4 L'annexe A donne les critères de choix des déversoirs et des canaux jaugeurs pour le mesurage de débit de l'eau dans les canaux découverts.

2 Référence

ISO 772, *Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts — Vocabulaire et symboles.*

3 Définitions et symboles

Dans le cadre de la présente Norme internationale, les définitions données dans l'ISO 772 sont applicables. Une liste complète de symboles avec les unités de mesure correspondantes est donnée dans l'annexe B.

4 Unités de mesure

Les unités de mesure utilisées dans la présente Norme internationale sont les unités SI.

5 Installation

5.1 Choix de l'emplacement

5.1.1 Le déversoir doit être situé dans un tronçon de chenal rectiligne, à l'écart des obstructions locales, rugosités ou inégalités du lit.

5.1.2 Il faut procéder à une étude préliminaire des conditions physiques et hydrauliques de l'emplacement proposé, pour vérifier qu'il est conforme (ou peut être rendu tel) aux conditions nécessaires au mesurage de débit au moyen du déversoir. On veillera en particulier aux points suivants dans le choix de l'emplacement :

- a) Existence d'une longueur suffisante du chenal, à section droite régulière (voir 5.2.2.2).
- b) Uniformité de la répartition des vitesses existante (voir annexe C).
- c) Chenal à forte pente, à éviter (mais voir 5.2.2.6).
- d) Effets de l'augmentation des niveaux de l'eau en amont, due au dispositif de mesurage.
- e) Conditions en aval (y compris les influences telles que marées, confluent avec d'autres cours d'eau, écluses, barrages et autres accessoires de contrôle qui peuvent provoquer un écoulement noyé).
- f) Imperméabilité du sol sur lequel doit reposer le dispositif de mesurage et nécessité de procéder à un compactage, à des jointoiements ou à tout autre moyen de contrôle des suintements.
- g) Nécessité pour les rives de retenir le débit maximal de crue dans le chenal.
- h) Stabilité des rives et nécessité de nettoyer et/ou de garnir d'un revêtement dans le cas de chenaux naturels.
- j) Uniformité de la section du chenal d'approche.
- k) Effet du vent. Le vent peut avoir un effet considérable sur l'écoulement dans une rivière, un déversoir ou un canal jaugeur, surtout lorsque ceux-ci sont larges et la charge faible et que le vent dominant est dans une direction transversale.
- l) Croissance de mauvaises herbes aquatiques.
- m) Transport solide.

5.1.3 Si l'emplacement ne remplit pas les conditions requises pour effectuer des mesurages satisfaisants, ou si un examen du courant montre que la répartition des vitesses dans le chenal d'approche diffère de manière appréciable de celle qui est indiquée dans les exemples de l'annexe C, il ne faut pas l'utiliser à

moins qu'il soit possible d'y apporter les améliorations nécessaires. Le fonctionnement de l'installation doit également être vérifié par une mesure de débit séparée.

5.2 Conditions d'installation

5.2.1 Spécifications générales

5.2.1.1 L'installation complète de mesurage comprend un chenal d'approche, un déversoir et un chenal aval. Les conditions de chacun de ces trois éléments affectent la précision totale des mesurages. Les conditions exigées pour l'installation comprennent des caractéristiques telles que : état de surface du déversoir, forme de la section transversale du chenal, rugosité du chenal et influence des appareils de contrôle en amont ou en aval du dispositif de jaugeage.

5.2.1.2 La répartition et la direction des vitesses peuvent avoir une influence importante sur le fonctionnement du déversoir (voir 5.2.2 et annexe C).

5.2.1.3 Une fois le déversoir installé, tout changement matériel apporté à l'installation modifie les caractéristiques de débit.

5.2.2 Chenal d'approche

5.2.2.1 Si le débit dans le chenal d'approche est perturbé par des irrégularités de la couche limite, telles que gros cailloux ou affleurements de roches, ou par une courbe, une écluse ou tout autre élément provoquant une asymétrie de l'écoulement dans le chenal, il peut se produire des erreurs sérieuses dans la mesure. L'écoulement dans le chenal d'approche doit avoir une répartition symétrique des vitesses (voir annexe C) et la meilleure manière de réaliser cette condition est de prévoir un long chenal d'approche rectiligne de section uniforme.

5.2.2.2 Une longueur droite de chenal d'approche égale à cinq fois la largeur du cours d'eau à son débit maximal suffit en général, dans la mesure où la pénétration de l'eau dans le chenal ne se fait pas à grande vitesse par un coude à angle aigu ou une écluse oblique. La longueur de chenal uniforme peut néanmoins être augmentée avec profit si cela est possible.

5.2.2.3 La longueur du chenal d'approche uniforme indiquée en 5.2.2.2 correspond à la distance située en amont du point de mesure de la charge. Dans un chenal naturel, cependant, il ne serait pas rentable de bétonner le lit et les berges sur une telle distance et il peut être nécessaire de prévoir une contraction en plan si la largeur entre les parois verticales du chenal canalisé est inférieure à la largeur du chenal naturel. La portion non canalisée du chenal en amont de la contraction doit néanmoins respecter les conditions de 5.2.2.1 et 5.2.2.2.

5.2.2.4 Les parois latérales verticales ménageant la contraction en plan doivent être disposées symétriquement par rapport à l'axe du chenal et doivent, de préférence, être incurvées sur un rayon d'au moins $2 H_{\max}$ vu en plan. Le point de tangence doit se situer à au moins H_{\max} en amont de la section de mesure de la hauteur de charge. La hauteur des parois latérales doit être choisie de manière à contenir le débit théorique maximal.

5.2.2.5 Dans un chenal exempt de débris flottants ou en suspension, on peut également établir de bonnes conditions d'approche en plaçant judicieusement des chicanes formées de lattes verticales, mais aucune chicane ne doit être placée à une distance du point de mesurage inférieure à $10 H_{\max}$.

5.2.2.6 Dans certaines conditions, un ressaut peut apparaître en amont du dispositif de mesurage, par exemple si le chenal d'approche est à forte pente. Si ce ressaut est à une distance en amont au moins égale à $30 H_{\max}$, on peut effectuer le mesurage du débit, sous réserve qu'il existe une répartition régulière des vitesses au niveau de la station de jaugeage.

5.2.2.7 L'état du chenal d'approche peut être vérifié par examen visuel ou par des mesures pour lesquelles on dispose de plusieurs techniques telles que moulinets, flotteurs, bâtons de vitesse ou solutions concentrées de colorants, la dernière technique servant à vérifier les conditions au fond du chenal. Une estimation complète et quantitative de la répartition des vitesses doit alors être vérifiée par référence à l'annexe C.

5.3 Structure du déversoir

5.3.1 La structure doit être rigide, étanche et capable de résister aux écoulements de crue sans être endommagée par des débordements ou l'érosion aval. La crête du déversoir doit être perpendiculaire à la direction de l'écoulement et la géométrie doit correspondre aux dimensions données dans les chapitres qui s'y rapportent.

5.3.2 Les surfaces du déversoir et des butées verticales le flanquant doivent être lisses; elles peuvent être en béton recouvert, pour la finition, d'une couche de ciment lisse ou d'un matériau lisse non sujet à la corrosion. Dans les installations de laboratoire, la finition doit être équivalente à celle d'une tôle laminée ou d'un bois raboté, poncé et peint. L'état de surface est particulièrement important sur le seuil horizontal, mais moins important sur le profil sur une distance de $1/2 H_{\max}$ en amont et en aval de la crête proprement dite.

5.3.3 Pour minimiser les erreurs sur la mesure du débit, les tolérances suivantes sont acceptables :

- sur la largeur de la crête : 0,2 % de cette largeur avec un maximum de 0,01 m.
- sur les surfaces horizontales : pentes de 0,1 % (1 mm/m).

La structure doit être mesurée dès son achèvement et à intervalles réguliers par la suite, et si ses dimensions s'écartent de plus des tolérances admissibles des dimensions théoriques, le débit doit être calculé de nouveau.

5.4 Conditions en aval

Les conditions en aval de la structure sont importantes parce qu'elles contrôlent le niveau d'eau aval. Ce niveau est l'un des facteurs qui déterminent si, au niveau du déversoir, l'écoulement sera modulaire ou noyé. Il est donc essentiel de calculer ou de noter les niveaux d'eau aval sur toute la gamme des débits et, en fonction de ces renseignements, de prendre une

décision sur le type de déversoir à utiliser et sa forme géométrique.

6 Entretien — Spécifications générales

L'entretien du dispositif de mesure et du chenal d'approche est important pour assurer des mesurages précis et continus. Il est primordial que le chenal d'approche soit, dans la mesure du possible, maintenu propre et exempt de limon et de végétation sur une distance au moins égale à celle spécifiée en 5.2.2.2. Le puits à flotteur et l'entrée du chenal d'approche doivent aussi être maintenus propres et exempts de dépôts.

La structure du déversoir doit être maintenue propre et exempte de toute accumulation de débris et on doit prendre soin, au cours du nettoyage, de ne pas endommager la crête du déversoir.

7 Mesure de la hauteur de charge

7.1 Caractéristiques générales

7.1.1 En cas de mesures ponctuelles, la charge en amont de la crête du déversoir peut être mesurée à l'aide d'échelles limnimétriques verticales ou inclinées, de pointes limnimétriques recourbées ou droites, de sondes limnimétriques visuelles ou électriques. En cas d'enregistrement en continu, il faut utiliser des limnigraphes. L'emplacement de la section de mesure de la hauteur de charge est indiqué en 8.2.

7.1.2 Plus la taille du déversoir et la hauteur de charge correspondante sont petites, plus les écarts de construction, de réglage du zéro et de lecture du dispositif de mesure de la charge, même petits, prennent d'importance relative.

7.2 Puits de mesure

7.2.1 Il est habituel de mesurer la hauteur de charge dans un puits de mesure séparé pour réduire les effets des irrégularités de surface. Dans ce cas, il est souhaitable également de mesurer la hauteur de charge dans le chenal d'approche à titre de vérification.

7.2.2 Le puits de mesure doit être vertical et de hauteur et/ou de profondeur suffisantes pour couvrir toute la gamme des niveaux d'eau, et avoir une hauteur minimale de 0,3 m au-dessus du niveau maximal escompté. À l'endroit recommandé pour la mesure de la hauteur de charge, le puits doit être raccordé au chenal d'approche par une tuyauterie ou une fente.

7.2.3 Le puits, la tuyauterie de raccordement ou la fente doivent être étanches et, lorsque le puits est prévu pour loger le flotteur d'un limnigraphe, il doit être de taille et de profondeur suffisantes pour laisser un jeu au flotteur quel que soit le niveau de l'eau. Le flotteur ne doit pas se trouver à moins de 0,075 m de la paroi du puits.

7.2.4 La tuyauterie ou la fente doivent avoir leur radier à au moins 0,06 m en-dessous du niveau le plus bas à enregistrer. Ils doivent affleurer perpendiculairement à la surface du chenal

d'approche. La couche limite du chenal d'approche doit être uniforme et lisse (finition équivalant à celle du béton soigneusement fini), sur une distance égale à 10 fois le diamètre de la tuyauterie ou la largeur de la fente à partir de l'axe du raccordement. La tuyauterie ne peut être inclinée par rapport à la paroi que si elle est munie d'un couvercle ou d'une plaque affleurant la paroi et percée de trous, dont les bords ne doivent être ni arrondis ni ébarbés.

7.2.5 Une profondeur de réserve doit être prévue dans le puits pour empêcher l'échouage des flotteurs sur le fond ou sur les limons ou les débris accumulés. Le puits de mesure peut comporter une chambre intermédiaire de dimensions et de proportions similaires placée entre lui et le chenal d'approche, pour permettre le dépôt des limons et autres débris à un endroit où il est facile de les repérer et de les éliminer.

7.2.6 Le diamètre de la tuyauterie de raccordement ou la largeur de la fente doivent être suffisants pour permettre au niveau d'eau dans le puits de suivre les fluctuations en hausse ou en baisse de la hauteur de charge sans retard appréciable, mais aussi suffisamment petits, compte tenu des exigences d'entretien, pour amortir les oscillations dues aux ondes à cycle court.

7.2.7 Il n'est pas possible de fixer des règles strictes pour la détermination de la taille de la tuyauterie de raccordement, car ce paramètre dépend des conditions particulières de l'installation considérée : par exemple, si l'emplacement est à découvert et donc exposé aux vagues, si le diamètre du puits doit être suffisant pour loger les flotteurs des limnigraphes. Il est préférable d'avoir un raccord plutôt large que trop étroit, car il est facile d'ajouter ultérieurement une restriction si l'amortissement des ondes à cycle court ne se fait pas convenablement. Il est généralement suffisant d'avoir une tuyauterie de 100 mm de diamètre pour les mesures de débit in situ. Un diamètre de 3 mm peut convenir pour les mesures précises en laboratoire.

7.3 Réglage du zéro

7.3.1 Pour obtenir une bonne précision globale, il est essentiel de régler initialement le zéro du système de mesure de façon précise par rapport au seuil du déversoir et de vérifier régulièrement ce réglage par la suite.

7.3.2 Un dispositif précis de vérification du zéro est nécessaire. Le zéro de l'instrument doit être réglé par référence directe au seuil du déversoir, et un enregistrement doit être fait des réglages effectués dans le chenal d'approche et dans le puits de mesure. Une vérification du zéro basée sur le niveau d'eau (quand l'écoulement cesse ou juste au moment où il commence) est sujette à des erreurs sérieuses par suite des effets de tension superficielle, et elle est donc à proscrire.

8 Déversoirs horizontaux à seuil arrondi

8.1 Définition

8.1.1 Un déversoir normalisé comporte un seuil vraiment plan et horizontal retenu entre deux butées. L'arête amont doit être

arrondie de manière à ne pas provoquer de décollement de l'écoulement et l'arête aval doit être

- a) soit arrondie,
- b) soit en pente oblique,
- c) soit verticale.

Le déversoir doit être placé perpendiculairement au sens de l'écoulement dans le chenal d'approche.

8.1.2 Les dimensions du déversoir et de ses butées doivent être conformes aux indications de la figure 1. Le rayon du seuil amont ne doit pas être inférieur à $0,2 H_{max}$. La longueur de la partie horizontale du seuil ne doit pas être inférieure à $1,75 H_{max}$ et la somme de la longueur du seuil et du rayon de l'arête arrondie ne doit pas être inférieure à $2,25 H_{max}$.

8.2 Emplacement de la section de mesure de la hauteur de charge

La hauteur de charge sur le déversoir doit être mesurée en un point situé suffisamment loin du seuil en amont pour ne pas être affectée par les effets d'abaissement de la surface, mais suffisamment proche, néanmoins, pour que la perte de charge entre la section de mesure et l'arête amont du déversoir puisse être considérée comme négligeable. Il est recommandé de placer la section de mesure à une distance comprise entre trois et quatre fois H_{max} en amont du bloc du déversoir.

8.3 Cas d'un écoulement modulaire

Un écoulement est dit modulaire lorsqu'il est indépendant des variations du niveau d'eau aval. Pour aboutir à cette condition, il faut, dans l'hypothèse d'un régime subcritique dans le chenal aval, que le niveau de charge totale aval ne monte pas au-delà d'un certain pourcentage de H . Si la face aval du déversoir est verticale, ce pourcentage dépend de H/p_d : 63 % pour les faibles valeurs de H/p_d , montant à 75 % pour $H/p_d = 0,5$ et à 80 % pour H/p_d égal à 1,0 et plus. Si le bloc du déversoir a une pente plus aplatie que $1/5$ à l'aval, la limite modulaire peut être considérée partout comme supérieure de 5 % à ces valeurs. Dans ce qui précède, p_d est la hauteur du seuil au-dessus du niveau du lit aval.

9 Équations de débit

9.1 Équation de base

9.1.1 La théorie de la profondeur critique, étayée par des données expérimentales, montre que le débit au travers d'un déver-

soir horizontal à seuil arrondi épais peut se représenter à l'aide de l'équation :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_D b \sqrt{g} H^{3/2} \dots (1)$$

où

- Q est le débit;
- C_D est le coefficient de débit (sans dimension);
- g est l'accélération due à la pesanteur;
- b est la largeur du seuil du déversoir;
- H est la hauteur de charge totale.

9.1.2 La hauteur de charge totale, H , ne pouvant se mesurer directement, l'équation de débit, exprimée en fonction de la hauteur jaugée, h , par rapport à la hauteur du seuil, peut s'écrire comme suit :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_D C_v b \sqrt{g} h^{3/2} \dots (2)$$

où C_v est un autre coefficient sans dimension tenant compte de l'effet de la vitesse d'approche sur le niveau d'eau mesuré en amont du déversoir.

Par définition

$$C_v = \left(\frac{H}{h}\right)^{3/2} \dots (3)$$

9.1.3 La hauteur de charge totale est rapportée à la hauteur jaugée par l'équation :

$$H = h + \alpha \bar{v}^2 / 2g \dots (4)$$

où \bar{v} est la vitesse locale moyenne dans le chenal d'approche au niveau de la section transversale où se mesure la hauteur de charge, et α est un coefficient (coefficient d'énergie cinétique ou coefficient de Coriolis) tenant compte du fait que la charge cinétique dynamique excède $\bar{v}^2 / 2g$ si la distribution des vitesses dans la section est régulière mais non uniforme.¹⁾ Pour les besoins de la présente Norme internationale, α peut être pris égal à 1 compte tenu des tolérances données aux chapitres suivants et des conditions de 5.2 et de l'annexe C.

1) Les formules données dans la présente Norme internationale découlent d'expériences où la distribution des vitesses dans le chenal d'approche était relativement uniforme et où donc α avoisinait l'unité. Si une étude des vitesses au niveau de la section de jaugeage indique $\alpha > 1,25$, la station ne respecte visiblement pas les conditions de 5.2 et des améliorations doivent être apportées au chenal d'approche. De façon très approximative :

$$\alpha = 1 + 3e^2 - 2e^3$$

où $e = \frac{v_{max}}{\bar{v}} - 1$

v_{max} étant la vitesse maximale observée dans la section où la hauteur de charge est mesurée.

9.1.4 On peut déduire des équations (2), (3) et (4) que

$$\frac{3\sqrt{3}(C_v^{2/3} - 1)^{1/2}}{C_v} = \frac{2C_D b h}{A} \quad \dots (5)$$

où A est l'aire de la section transversale du chenal d'approche en dessous du niveau d'eau observé à la station de jaugeage.

C_v peut donc être maintenu en fonction de $C_D b h/A$. La figure 2, qui donne la relation entre C_v et $C_D b h/A$, a été établie pour éviter d'avoir à résoudre l'équation compliquée (5) permettant de déterminer C_v . On peut obtenir la valeur de C_D au moyen de l'équation (6) ou (6a).

9.2 Calcul du débit

9.2.1 Il existe deux méthodes courantes de calcul du débit à partir des valeurs de jaugeage de la hauteur de charge. La première méthode opère par approximations successives et utilise les équations de base de la «hauteur totale». Cette méthode convient admirablement au traitement des données par ordinateur, celui-ci facilitant efficacement les calculs répétitifs nécessaires. La seconde méthode se fonde sur les rapports établis entre la hauteur de charge mesurée et la hauteur de charge totale pour différentes formes de déversoirs et d'écoulement. On détermine le coefficient de vitesse, C_v , de l'équation de débit à partir de tableaux et de graphiques.

9.2.2 L'équation de base du débit donnée en 8.1 met en jeu la hauteur de charge totale et la hauteur de charge mesurée. L'équation (2) peut être utilisée pour évaluer le débit, les valeurs appropriées de C_v étant tirées de la figure 2.

9.2.3 Pour l'eau à des températures ordinaires, C_D est fonction de la hauteur de charge, h , de la longueur du seuil dans le sens de l'écoulement, de la rugosité du seuil et du rapport h/b . Il peut s'exprimer par l'équation

$$C_D = \left(1 - \frac{2xL}{b}\right) \left(1 - \frac{xL}{h}\right)^{3/2} \quad \dots (6)$$

où

L est la longueur de la portion horizontale du seuil dans le sens de l'écoulement;

$x = \frac{\delta_*}{L}$ est un facteur tenant compte de l'influence de la couche limite du seuil,

où δ_* est l'épaisseur de la couche limite.

Dans la plupart des installations ayant un bon fini superficiel, la valeur de δ_*/L se trouve en pratique dans la gamme 0,002 à 0,004. Si $10^5 > L/k > 4\,000$ (k est la valeur de rugosité) et $Re > 2 \times 10^5$ (Re est le nombre de Reynolds), δ_*/L peut être considéré comme égal à 0,003 sans erreur appréciable. L'équation (6) devient donc :

$$C_D = \left(1 - \frac{0,006L}{b}\right) \left(1 - \frac{0,003L}{h}\right)^{3/2} \quad \dots (6a)$$

L'annexe D donne un exemple illustrant avec encore plus de précision une méthode de calcul de C_D en fonction de l'épaisseur du déplacement à la couche limite.

9.3 Limites d'application

9.3.1 La limite pratique inférieure de h dépend de l'importance de l'influence des propriétés du fluide et de la rugosité limite. La limite inférieure recommandée est, selon la valeur la plus élevée, 0,06 m ou 0,03 L .

9.3.2 Les limites de H/p dépendent des difficultés rencontrées lorsque le nombre de Froude dans le chenal d'approche dépasse 0,5 et lorsque, d'autre part, on ne dispose pas suffisamment de données expérimentales confirmant la théorie à des valeurs élevées de H/p . La limite supérieure recommandée est $H/p = 1,5$.

9.3.3 H/L ne doit pas dépasser 0,57. Cette limite est fixée du fait de la nécessité d'assurer un écoulement parallèle au niveau de la section critique sur le seuil.

9.3.4 La hauteur de pelle, p , ne doit pas être inférieure à 0,15 m. La largeur du seuil b ne doit être inférieure ni à 0,30 m, ni à H_{max} , ni à $L/5$.

9.4 Précision

Si l'on exerce un soin et une technicité raisonnables dans la construction et l'installation d'un déversoir horizontal à seuil arrondi, on peut déduire l'erreur limite sur le coefficient de débit (y compris C_v) de l'équation :

$$X_c = \pm 2(21 - 20 C_D) \% \quad \dots (7)$$

La méthode de combinaison des erreurs limites sur les coefficients et des autres sources d'erreurs limites est décrite en 10.6.

10 Erreurs sur la mesure de débit

10.1 Généralités

10.1.1 L'erreur limite sur une mesure de débit peut être estimée par la combinaison des erreurs limites provenant de plusieurs sources. L'évaluation de leur part respective dans l'erreur limite totale indiquera si le débit peut être mesuré avec une précision suffisante compte tenu des objectifs fixés. Le présent chapitre est censé donner à l'utilisateur de la présente Norme internationale des indications suffisantes pour pouvoir évaluer les erreurs limites probables des mesures du débit (voir ISO 5168).

10.1.2 Une erreur peut se définir comme la différence entre la valeur réelle du débit et sa valeur calculée suivant l'équation correspondant au déversoir considéré, normalement conçu et installé conformément aux indications de la présente Norme internationale. Le terme «erreur limite» est utilisé pour qualifier l'écart par rapport à la valeur vraie du débit, dans lequel la valeur mesurée est censée se trouver dix-neuf fois sur vingt (limites de confiance à 95 %).

10.2 Sources d'erreur

10.2.1 Les sources d'erreur sur la mesure de débit peuvent être identifiées par référence à la forme générale de l'équation du débit des déversoirs :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_D C_V b \sqrt{g} h^{3/2} \quad \dots (2)$$

où

$\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2}$ est une constante numérique non sujette à erreur;

g est l'accélération due à la pesanteur et varie selon le lieu, mais de façon si faible qu'elle est négligeable pour la mesure de débit.

10.2.2 Les seules sources d'erreur restant à considérer sont donc les suivantes :

- a) Le coefficient de débit C_D et le coefficient de vitesse d'approche C_V . Les estimations numériques et erreurs limites sur le coefficient $C_V C_D$ combinés sont données en 9.4.
- b) Les dimensions de la structure, par exemple la largeur du seuil, b .
- c) La hauteur mesurée, h .

10.2.3 Les erreurs limites sur b et h doivent être évaluées par l'utilisateur. Leur valeur dépend de la précision des mesures sur le dispositif une fois construit; en pratique, cette erreur limite peut s'avérer insignifiante par rapport aux autres erreurs limites. L'erreur limite sur la hauteur dépend de la précision de l'instrument de mesure de la hauteur, de la détermination du zéro et de la technique utilisée. Cette erreur limite peut être faible avec un vernier ou un instrument micrométrique déterminant le zéro avec une fidélité comparable.

10.3 Types d'erreurs

10.3.1 Les erreurs se classent en erreurs fortuites et erreurs systématiques, les premières affectant la reproductibilité (fidélité) de la mesure et les secondes sa précision vraie.

10.3.2 L'écart-type d'une série de mesures d'une variable Y en régime permanent est estimé avec l'équation :

$$s_Y = \left[\int_1^n \frac{(\bar{Y} - Y)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad \dots (8)$$

où \bar{Y} est la moyenne observée.

L'écart-type de la moyenne est alors donné par :

$$s_{\bar{Y}} = \frac{s_Y}{\sqrt{n}} \quad \dots (9)$$

et l'erreur limite sur la moyenne par deux fois $s_{\bar{Y}}$ (pour une probabilité de 95 %) si le nombre de mesures est grand.

Telle est la part des erreurs limites fortuites sur une série de mesures expérimentales dans l'erreur limite totale sur la moyenne.

10.3.3 La mesure peut également être sujette à des erreurs systématiques : la moyenne d'un très grand nombre de mesures diffère donc encore de la valeur vraie de la grandeur mesurée. Une erreur du réglage du zéro d'un limnimètre sur la crête du déversoir produit, par exemple, une différence systématique entre la valeur moyenne vraie de la hauteur mesurée et sa valeur réelle. La répétition de la mesure n'éliminant pas les erreurs systématiques, la valeur réelle ne peut être déterminée que par une mesure indépendante reconnue comme plus précise.

10.4 Erreurs sur les valeurs des coefficients

10.4.1 Toutes les erreurs de cette catégorie sont systématiques.

10.4.2 Les valeurs des coefficients de débit C_V et C_D mentionnées dans la présente Norme internationale sont fondées sur une estimation expérimentale censée avoir été effectuée soigneusement et sur un nombre de mesures suffisant pour garantir une bonne fidélité. Lorsque les mesures sont faites toutefois sur d'autres installations similaires, il se peut qu'on observe des écarts systématiques entre les coefficients de débit, qui peuvent être attribués aux variations de finition superficielle du dispositif, à son installation, aux conditions d'approche, etc.

10.4.3 L'erreur limite sur les coefficients mentionnés dans les paragraphes précédents de la présente Norme internationale est basée sur la considération des écarts entre les données expérimentales sur plusieurs sources sur les valeurs moyennes de ces coefficients. Les erreurs limites correspondent donc aux résultats pratiques et expérimentaux connus au moment de la publication.

10.5 Erreurs sur les mesures

10.5.1 Ces mesures sont sujettes aux erreurs fortuites et aux erreurs systématiques.

10.5.2 Aucune méthode de mesure ni aucun mode opératoire n'étant spécifiés, il n'est pas possible de donner des valeurs numériques des erreurs limites de cette catégorie. Celles-ci doivent être estimées par l'utilisateur. La connaissance de la méthode de mesure du déversoir permet, par exemple, à l'utilisateur de déterminer l'erreur limite probable sur cette grandeur.

10.5.3 Les débits obtenus à l'aide des équations sont exprimés en volume et la masse volumique du liquide n'affecte pas le débit-volume pour une hauteur donnée, si la hauteur est mesurée dans un liquide de masse volumique identique. Si le jaugage est effectué dans un puits séparé, une correction peut être nécessaire pour tenir compte de la différence de masse volumique lorsque la température dans le puits est sensiblement différente de celle de l'écoulement mesuré. On supposera toutefois ici que les masses volumiques sont égales.

10.5.4 L'erreur limite sur la hauteur mesurée doit être déterminée à partir d'une évaluation des diverses sources d'erreur

limite, par exemple erreur limite du zéro, sensibilité du limnimètre, jeu des mécanismes indicateurs, erreur limite fortuite résiduelle sur la moyenne d'une série de mesures, etc. L'erreur limite sur la hauteur mesurée est la racine carrée de la somme des carrés des diverses erreurs.

10.5.5 Les composantes ci-dessus de l'erreur limite doivent être calculées en pourcentage des écarts-types pour des limites de confiance de 95 %. Lorsque la valeur d'une composante de l'erreur limite est déterminée par une seule mesure, on dit que l'erreur limite a une distribution rectangulaire et elle peut être prise dans la présente Norme internationale aux limites (en plus ou en moins) de l'intervalle dans lequel la valeur vraie est censée se trouver avec certitude (c'est-à-dire la moitié de l'écart maximal évalué)¹⁾.

10.6 Combinaison des erreurs limites donnant l'erreur limite globale sur le débit

10.6.1 L'erreur limite totale est la résultante de plusieurs erreurs limites combinées qui peuvent elles-mêmes être des erreurs limites composites (voir 10.5.4).

10.6.2 L'erreur limite sur le débit doit être calculée par l'équation :

$$X = \pm \sqrt{X_c^2 + X_b^2 + 2,25 X_h^2}$$

où

X_c est le pourcentage d'erreur limite sur $C_v C_D$;

X_b est le pourcentage d'erreur limite sur b ;

X_h est le pourcentage d'erreur limite sur h .

Ci-dessus, $X_b = 100 \times \frac{\varepsilon_b}{b}$

et
$$X_h = \frac{\pm 100 \left[1\varepsilon_h^2 + 2\varepsilon_h^2 + \dots (2s_h)^2 \right]^{1/2}}{h}$$

où

ε_b est l'erreur limite sur la mesure de la largeur;

$1\varepsilon_h^2, 2\varepsilon_h^2, \text{ etc.},$ sont les erreurs limites sur les mesures de hauteur (voir 10.5.4);

$2s_h$ est l'erreur limite sur la moyenne d'une série de mesures de la hauteur (voir 10.3.2).

10.6.3 L'erreur limite X ¹⁾ n'a pas une valeur unique pour un dispositif donné mais varie avec le débit. Il peut donc s'avérer

nécessaire de définir l'erreur limite à plusieurs valeurs de débit couvrant la gamme des mesures requises.

10.6.4 Exemple

Ce qui suit est un exemple d'application de la formule à une source unique à l'aide d'un déversoir de hauteur de pelle p égale à 1 m et de hauteur de charge de 0,67 m, dont la crête a une largeur b de 10 m et une longueur L de 2 m. Dix mesures successives de la hauteur de charge donnent un écart-type de la moyenne $s_{\bar{h}}$ égal à 1 mm.

$$\begin{aligned} C_D &= \left(1 - \frac{0,006 L}{b} \right) \left(1 - \frac{0,003 L}{h} \right)^{3/2} \\ &= \left(1 - \frac{0,006 \times 2}{10} \right) \left(1 - \frac{0,003 \times 2}{0,67} \right)^{3/2} \\ &= 0,998 8 \times (0,991)^{3/2} \\ &= 0,998 8 \times 0,986 5 \\ C_D &= 0,985 3 \end{aligned}$$

L'erreur limite sur le coefficient est donnée en 9.4 :

$$X_c = \pm 2 (21 - 20 C_D) \%$$

$$X_c = \pm 2 (21 - 19,71) \%$$

$$X_c = \pm 2,58 \%$$

Un dispositif numérique de mesure de la hauteur est utilisé et est censé fonctionner à intervalles de 1 mm, mais avec une précision réelle de ± 3 mm, le réglage du zéro ayant une précision de ± 5 mm.

Donc

$$X_b = \frac{\pm 100 [0,003^2 + 0,005^2 + (2 \times 0,001)^2]^{1/2}}{0,67}$$

$$X_b = \pm 0,92 \%$$

Si la largeur du seuil, b , a été mesurée *in situ* à 0,01 m près sur un total de 10 m

$$X_b = 100 \times \frac{0,01}{10} = 0,10 \%$$

Donc

$$X = \pm (2,58^2 + 0,1^2 + 2,25 \times 0,92^2)^{1/2}$$

$$X = \pm 2,93 \%$$

1) L'écart-type d'une distribution rectangulaire entre des limites $\pm X$ est $X/\sqrt{3}$ et les limites de l'intervalle de confiance à 95 %, si l'on traite cet écart-type comme rapporté à une loi normale, sont $\pm 2 X/\sqrt{3}$ ou $\pm 1,15 X$. Il est alors suffisant de prendre la tolérance égale à $\pm X$.

Annexe A

Guide pour le choix des déversoirs et des canaux jaugeurs pour la mesure de débit de l'eau dans les canaux découverts

(Cette annexe fait partie de la norme.)

A.1 Objet et domaine d'application

La présente annexe spécifie les critères de choix des déversoirs et des canaux jaugeurs pour la mesure de débit de l'eau dans les canaux découverts. Les conditions d'écoulement considérées se limitent aux débits constants et uniformes aux températures ambiantes (5 à 30 °C environ).

Malgré le grand nombre de types de déversoirs et de canaux jaugeurs disponibles, dont certains peuvent être avantageux pour des utilisations spécifiques, seulement les types suivants sont actuellement normalisés. Les critères de choix parmi les types normalisés sont donnés au chapitre A.3.

A.2 Types de déversoirs et de canaux jaugeurs normalisés

A.2.1 Déversoir en mince paroi

Déversoir réalisé de façon que la lame déversante ne soit en contact avec la crête que suivant une ligne, le débit étant mesuré par la charge sur le déversoir et la largeur de la crête (ou l'angle de l'échancrure).

Les types suivants sont inclus :

- déversoir rectangulaire sans contraction latérale;
- déversoir à échancrure rectangulaire;
- déversoir à échancrure triangulaire.

A.2.2 Déversoir à seuil épais

Déversoir dont la crête a une dimension suffisante dans la direction de l'écoulement (largeur) pour que le régime critique se produise en un point de la crête, le débit étant mesuré par la charge sur le déversoir et la largeur de la crête.

Les types suivants sont inclus :

- déversoir à profil rectangulaire à arêtes vives;
- déversoir à profil rectangulaire à extrémités arrondies.

A.2.3 Déversoir à profil triangulaire

Déversoir à profil triangulaire dans la direction de l'écoulement, le débit étant mesuré par la charge sur le déversoir et la largeur de la crête.

Le type suivant est inclus :

- déversoir à profil triangulaire à pentes 1/2 à l'amont et 1/5 à l'aval.

A.2.4 Canal jaugeur à ressaut (écoulement libre)

Dispositif à contraction latérale et avec ou sans contraction de fond, dans lequel l'écoulement passe du régime fluvial au régime torrentiel, le débit étant mesuré par la section transversale et la vitesse d'écoulement à la profondeur critique dans le col du canal jaugeur.

Les types suivants sont inclus :

- à col rectangulaire;
- à col trapézoïdal;
- à col en U.

A.2.5 Déversement dénoyé

Chute brusque du fond d'un chenal rectangulaire, le débit étant mesuré par la profondeur au bord de la chute et par la largeur du chenal au niveau de la section de bord.

A.3 Critères de choix des déversoirs ou des canaux jaugeurs normalisés

Les critères essentiels permettant de fixer un choix parmi les déversoirs et les canaux jaugeurs normalisés sont donnés ci-après.

A.3.1 Différence de niveaux d'eau disponible

Les déversoirs en mince paroi et les déversements dénoyés nécessitent une différence suffisante entre les niveaux de l'eau à l'amont et à l'aval, pour assurer un écoulement libre aéré dans des conditions de débit maximal.

Les déversoirs à seuil épais sont utilisables lorsque la différence entre les niveaux de l'eau est relativement faible; les déversoirs à profil triangulaire ainsi que les canaux jaugeurs à ressaut sont utilisables lorsque la différence entre les niveaux de l'eau est beaucoup plus faible.

Pour tous les types de déversoirs et de canaux jaugeurs qui font l'objet de la présente Norme internationale, le débit doit être libre ou indépendant du niveau de l'eau à l'aval.

A.3.2 Précision de la mesure

La précision d'une mesure unique de débit dépend de l'évaluation des erreurs limites composantes en jeu, mais les gammes approximatives de l'erreur limite sur le débit pour les déversoirs et les canaux jaugeurs (probabilité de 95 %) sont les suivantes :

- déversoirs rectangulaires en mince paroi (sans contraction latérale et à échancrure) 1 à 4 %;
- déversoirs à échancrure triangulaire (angles d'échancrure compris entre $\pi/9$ et $5\pi/9$ radians) 1 à 2 %;
- déversoirs à seuil épais 3 à 5 %;
- déversoirs à profil triangulaire 2 à 5 %;
- canaux jaugeurs à ressaut 2 à 5 %;
- déversement dénoyé 5 à 10 %.

Des écarts par rapport aux conditions normalisées d'installation ou d'emploi peuvent produire des erreurs de mesure plus importantes. Les valeurs les plus élevées susmentionnées sont des valeurs prudentes, qui sont recommandées pour être utilisées dans des conditions strictes de conformité avec les spécifications normalisées. Les plus petites valeurs ne peuvent être obtenues que dans le cas de déversoirs rigoureusement contrôlés, tels que les déversoirs qui peuvent être construits et installés dans des laboratoires bien équipés. Dans les conditions rencontrées sur le terrain, les déversoirs en mince paroi sont tout particulièrement soumis aux erreurs dues aux risques naturels.

A.3.3 Dimensions et forme du chenal

Les déversoirs rectangulaires sans contraction latérale et les déversoirs à échancrure (aussi bien rectangulaires que triangulaires) de dimensions relativement grandes par rapport à celles du chenal d'approche doivent être situés dans des chenaux rectangulaires à parois verticales et à fond uniforme, ou dans des boîtes de déversoirs à section rectangulaire s'étendant sur une distance en amont d'au moins dix fois la largeur de la lame déversante à la charge maximale. Dans le cas des déversoirs en mince paroi de petites dimensions par rapport à celles du chenal d'approche, surtout lorsque la vitesse d'approche est négligeable, les dimensions et la forme du chenal sont sans importance.

Les déversoirs à seuil épais peuvent être très avantageusement utilisés dans des chenaux rectangulaires, mais ils peuvent être utilisés avec une bonne précision dans les chenaux non rectangulaires, si un chenal d'approche lisse et rectangulaire s'étend en amont du déversoir jusqu'à une distance d'au moins deux fois la hauteur de lame maximale.

Les canaux jaugeurs peuvent être utilisés dans les chenaux de n'importe quelle forme, si les conditions d'écoulement dans le chenal d'approche sont raisonnablement uniformes et stables.

Dans le cas de tous les types de déversoirs et de canaux jaugeurs, les dimensions et la forme du chenal à l'aval sont sans importance, sauf qu'elles doivent permettre un écoulement libre et aéré dans toutes les conditions d'emploi.

A.3.4 Conditions d'écoulement dans le chenal d'approche

Dans le cas de tous les types de déversoirs, l'écoulement dans le chenal d'approche doit être du régime fluvial, uniforme et stable. Idéalement, surtout pour les vitesses d'approche relativement élevées, la répartition des vitesses doit se rapprocher de celle dans un chenal de longueur suffisante pour permettre un écoulement normal (à résistance contrôlée) dans les chenaux lisses rectilignes. Pour des vitesses d'approche relativement faibles et dans le cas des canaux jaugeurs, les conditions d'écoulement dans le chenal sont de moindre importance. Dans les petits chenaux et dans les boîtes à déversoir, des chicanes et des redresseurs d'écoulement peuvent être utilisés de façon à obtenir la répartition normale des vitesses. Des précautions doivent être prises pour que l'érosion et/ou les dépôts en amont du déversoir ou du canal jaugeur ne changent pas sensiblement la vitesse d'approche ou la répartition des vitesses jusqu'au dispositif de mesurage.

Le régime fluvial (subcritique) est obtenu lorsque

$$\bar{v} < \sqrt{\frac{g A}{B_s}}$$

où

\bar{v} est la vitesse moyenne, en mètres par seconde, dans le chenal d'approche;

g est l'accélération, en mètres par seconde carrée, due à la pesanteur;

A est la section transversale, en mètres carrés, du chenal d'approche;

B_s est la largeur, en mètres, du chenal d'approche à la surface de l'eau.

A.3.5 Écoulement chargé de transport solide

Dans le cas des écoulements chargés de matières en suspension, il faut éviter l'emploi des déversoirs en mince paroi dont l'arête risque d'être détériorée ou usée par ces matières. Sur les cours d'eau chargés de transport solide, l'emploi de dispositifs de mesurage qui diminuent sensiblement la vitesse du cours d'eau n'est pas recommandé, car cela peut faire varier les dépôts ou l'érosion qui dépendent du régime de l'écoulement. En général, les canaux jaugeurs s'acquittent mieux que les déversoirs sur les cours d'eau chargés de transport solide.

A.3.6 Écoulement chargé de débris flottants

Les déversoirs à seuil épais, les déversoirs à profil triangulaire, les canaux jaugeurs à ressaut et les déversements dénoyés passeront normalement les débris flottants plus efficacement que les déversoirs en mince paroi. L'emploi des déversoirs à échancrure triangulaire doit être surtout évité, à moins qu'un piège à débris soit installé en amont.