
Norme internationale



4377

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

**Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts —
Déversoirs plats en V**

Liquid flow measurement in open channels — Flat-V weirs

Première édition — 1982-11-15

CDU 532.572

Réf. n° : ISO 4377-1982 (F)

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

Prix basé sur 23 pages

Avant-propos

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

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

La Norme internationale ISO 4377 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 août 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	URSS
Espagne	Roumanie	USA

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

Belgique

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Déversoirs plats en V

1 Objet et domaine d'application

1.1 La présente Norme internationale traite de la mesure de débit dans les rivières et chenaux artificiels à régime permanent ou à variation lente, à l'aide de déversoirs plats en V. Le déversoir plat en V normalisé est une structure de contrôle dont la crête a la forme d'un «V» aplati lorsqu'on le regarde dans le sens de l'écoulement.

1.2 Le déversoir normalisé est de profil triangulaire et présente une pente amont de 1 (vertical):2 (horizontal) et une pente aval de 1:5. La pente transversale de la ligne de crête ne doit pas être supérieure à 1:10. La pente transversale doit se situer entre 0 et 1:10 et, quand elle est zéro, le déversoir devient un seuil à profil triangulaire à deux dimensions (voir ISO 4360).

1.3 Le déversoir peut être utilisé pour mesurer aussi bien des débits modulaires que des débits noyés. Dans un régime modulaire, le débit ne dépend que du niveau d'eau amont et une seule mesure de la hauteur de charge amont suffit. Dans un régime noyé, le débit dépend à la fois des niveaux amont et aval et deux mesures de charge séparées sont nécessaires. Avec un déversoir plat en V normalisé, les deux hauteurs à mesurer sont

- a) la hauteur de charge amont;
- b) la hauteur de charge dans la poche de cavitation qui se forme juste en aval du seuil.

1.4 Le déversoir plat en V peut mesurer une gamme assez large de débits et a l'avantage d'une grande sensibilité aux faibles débits. Son fonctionnement, en régime noyé, minimise les remous à très forts débits. Les déversoirs plats en V ne doivent pas être utilisés dans les rivières à forte déclivité, notamment lorsqu'elles charrient un fort pourcentage de sédiments.

1.5 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.

1.6 Aucune limite supérieure n'est spécifiée en ce qui concerne la taille de cette structure. Les gammes de débit pour trois déversoirs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1

Élévation de la crête au-dessus du lit m	Pente transversale de la crête	Largeur m	Gamme de débit m ³ /s
0,2	1:10	4	0,015 à 5
0,5	1:20	20	0,030 à 180 (à une hauteur de charge maximale de 3 m)
1,0	1:40	80	0,055 à 630 (à une hauteur de charge maximale de 3 m)

2 Définitions et symboles

Dans le cadre de la présente Norme internationale, les définitions données dans l'ISO 772¹⁾ sont applicables. Une liste complète de symboles avec les unités de mesure correspondantes est donnée dans l'annexe B.

3 Unités de mesure

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

4 Installation

4.1 Choix de l'emplacement

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

4.1.2 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 construit ou rendu conforme) 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 4.2.2.2).
- b) Uniformité de la répartition des vitesses existantes (voir annexe C).

1) ISO 772, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Vocabulaire et symboles.

- c) Chenal à forte pente à éviter (mais voir 4.2.2.6).
- d) Effets de l'augmentation des niveaux de l'eau en amont, due au dispositif de mesurage.
- e) Conditions 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 fuites.
- 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.
- j) Uniformité de la section du chenal d'approche.
- k) Effet du vent sur l'écoulement dans le déversoir ou le canal jaugeur, surtout lorsque celui-ci est large, la charge faible et lorsque le vent dominant est dans une direction transversale.

4.1.3 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 faut l'abandonner 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.

4.2 Conditions d'installation

4.2.1 Spécifications générales

4.2.1.1 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 globale des mesurages. Les conditions exigées pour l'installation comprennent des caractéristiques telles que l'état de surface du déversoir, la forme de la section transversale du chenal, la rugosité du chenal et l'influence des appareils de contrôle en amont ou en aval du dispositif de jaugeage.

4.2.1.2 La répartition et la direction des vitesses peuvent avoir une influence importante sur le fonctionnement du déversoir (voir 4.2.2 et annexe C).

4.2.1.3 Une fois le déversoir installé, tout changement matériel apporté à l'installation modifie les caractéristiques de débit; un réétalonnage sera alors nécessaire.

4.2.2 Chenal d'approche

4.2.2.1 Si l'écoulement dans le chenal d'approche est perturbé par des irrégularités de la couche limite telles que des gros cailloux ou des 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 précision du jaugeage. L'écoulement dans le chenal d'approche doit avoir une répartition symétrique des vitesses (voir annexe C) et la meilleure manière de respecter cette condition est de prévoir un long chenal d'approche rectiligne de section uniforme.

4.2.2.2 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.

4.2.2.3 La longueur du chenal d'approche uniforme indiquée en 4.2.2.2 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 pourrait 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 4.2.2.1 et 4.2.2.2.

4.2.2.4 Les parois latérales verticales ménageant la contraction des chenaux naturels doivent être disposées symétriquement par rapport à l'axe du chenal et doivent, de préférence, être incurvées sur un rayon d'au moins $2 H_{max}$ comme indiqué sur la figure 1. Le point de tangence de ce rayon le plus proche du déversoir doit se situer à au moins H_{max} en amont de la section de mesure de la charge. La hauteur des parois latérales doit être choisie de manière à contenir le débit théorique maximal.

4.2.2.5 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 fois H_{max} .

4.2.2.6 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 fois 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.

4.2.2.7 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 peut s'obtenir au moyen d'un moulinet. La répartition des vitesses doit alors être vérifiée par référence à l'annexe C.

4.3 Structure du déversoir

4.3.1 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 doit correspondre aux dimensions données dans les chapitres qui s'y rapportent.

Le déversoir doit être enfermé entre des parois latérales verticales et sa largeur de crête ne doit pas excéder la largeur du chenal d'approche (voir figure 1). Les blocs formant le déversoir peuvent être tronqués, mais leurs dimensions horizontales dans la direction de l'écoulement ne doivent jamais être réduites à moins de H_{\max} en amont et $2 H_{\max}$ en aval de la ligne de crête.

4.3.2 Le déversoir et le chenal d'approche immédiatement voisin (la partie avec des parois latérales verticales) peuvent être construits en béton, recouvert d'une couche de finition lisse en ciment 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 au voisinage du seuil, mais moins sévère sur le profil sur une distance de $1/2 H_{\max}$ en amont et en aval de la ligne de crête.

4.3.3 Pour minimiser les erreurs limites sur la mesure du débit, il convient de respecter les tolérances suivantes lors de la construction :

- Sur la largeur de la crête, 0,2 % de cette largeur avec un maximum de 0,01 m.
- Sur les pentes amont et aval, 0,5 %.
- Sur la pente transversale de la crête, 0,1 %.
- Sur les écarts ponctuels par rapport à la ligne de crête moyenne, 0,05 % de la largeur de crête.

Les installations de laboratoire doivent normalement avoir une précision plus élevée.

4.3.4 La structure doit être mesurée dès son achèvement et un calcul doit être fait sur les valeurs moyennes des dimensions importantes et leurs écarts-types pour des limites de confiance de 95 %. Les valeurs moyennes servent au calcul du débit et l'écart-type au calcul de l'erreur limite globale sur une seule détermination du débit (voir 9.6).

4.4 Conditions en aval

4.4.1 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.

5 Entretien — Spécifications générales

5.1 L'entretien du dispositif de mesurage 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 4.2.2.2. 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 l'on doit prendre soin, au cours du nettoyage, de ne pas endommager la crête du déversoir.

6 Mesure de la (des) hauteur(s) de charge

6.1 Spécifications générales

6.1.1 En cas de mesures ponctuelles, la charge peut être mesurée à l'aide d'échelles limnimétriques verticales, de pointes limnimétriques recourbées ou droites, de sondes limnimétriques visuelles ou électriques. En cas d'enregistrements en continu, on doit utiliser des limnigraphes. Les emplacements des mesures de charge sont indiqués en 6.4.1, 6.4.2 et 6.4.3.

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

6.2 Puits de mesurage

6.2.1 Il est préférable de mesurer la charge amont dans un puits de mesurage pour réduire les effets des irrégularités superficielles de l'eau. Dans ce cas, il est également préférable de vérifier de temps en temps la charge dans le chenal d'approche. Lorsque le déversoir est conçu pour fonctionner en régime noyé, il est nécessaire de prévoir un puits de mesurage séparé pour enregistrer la charge piézométrique engendrée dans la poche de cavitation qui se forme en aval de la crête.

6.2.2 Les puits de mesurage doivent être verticaux et de hauteur et profondeur suffisantes pour couvrir toute la gamme des niveaux d'eau. Dans les installations in situ, ils doivent avoir une hauteur minimale de 0,3 m au-dessus du niveau maximal escompté. Les puits de mesurage doivent être raccordés par des tuyauteries adéquates aux points de mesure de la charge.

6.2.3 Le puits et la tuyauterie de raccordement doivent tous deux être étanches à l'eau et, lorsque le puits est prévu pour loger le flotteur d'un limnigraphe, il doit être de taille et de profondeur suffisantes pour permettre la flottaison de ce 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.

6.2.4 Le radier de la tuyauterie doit se trouver à au moins 0,06 m en dessous du niveau le plus bas à enregistrer.

6.2.5 La tuyauterie de raccordement au point amont de mesure de la charge doit affleurer au ras de la paroi du chenal d'approche et perpendiculairement par rapport à celle-ci. La paroi du chenal d'approche doit être uniforme et lisse (finition équivalente à celle du béton soigneusement fini) sur une distance égale à 10 fois le diamètre de la tuyauterie à partir de l'axe du raccord. La tuyauterie ne peut être inclinée par rapport à la paroi que si elle est munie d'un couvercle ou d'une plaque de fermeture amovible affleurant la paroi et percée de trous, dont les bords ne doivent être ni arrondis ni ébarbés. Les plaques de fermeture perforées ne sont pas recommandées là où des mauvaises herbes ou du limon sont susceptibles d'être présents.

6.2.6 La tuyauterie de raccordement au point de mesure de la charge dans la poche de cavitation doit aboutir dans un collecteur encastré dans le seuil du déversoir. Dans les grandes installations in situ, la sortie du collecteur doit comporter 10 trous de 10 mm de diamètre, espacés de 50 mm sur une droite parallèle à la ligne de crête mais située 20 mm en aval. Dans les installations de laboratoire et les petites installations in situ ($b < 2,5$ m), ces dimensions sont à réduire de moitié. Les trous doivent affleurer la face aval du déversoir et être percés dans une plaque de fermeture facilement démontable pour assurer l'entretien du système. Il est important de placer un joint d'étanchéité efficace tout autour de cette plaque. Les emplacements des points de mesure de la charge sont indiqués en 6.4.

6.2.7 Une profondeur de réserve doit être prévue dans les puits pour empêcher l'échouage des flotteurs sur le fond ou sur les limons ou les débris accumulés. Le puits de mesurage 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.

6.2.8 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.

6.2.9 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, etc. Il est préférable d'avoir un raccord plutôt trop large que trop étroit, car il est facile d'ajouter ultérieurement une restriction si l'amortissement des ondes à court cycle 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 de précision en régime permanent en laboratoire.

6.2.10 Les robinets d'isolement avec des tiges allongées doivent de préférence être fixés à la tuyauterie de raccordement à l'intérieur des puits de mesurage de sorte que les puits puissent être drainés ou asséchés et nettoyés. Si possible, le puits doit être relié à un système de drainage par la voie d'un robinet à biseau conique à boue et d'une canalisation.

6.3 Réglage du zéro

6.3.1 Il est essentiel, pour obtenir une bonne précision globale, d'une part d'avoir un réglage initial précis du zéro des dispositifs mesureurs de la charge par rapport au niveau du seuil du déversoir, d'autre part de vérifier régulièrement ces réglages dans la suite des opérations.

6.3.2 Un moyen précis doit être prévu pour vérifier le zéro à intervalles fréquents. Des repères de nivellement constitués par des plaques métalliques horizontales doivent être fixés au som-

met des parois verticales et dans les puits de mesurage. Ils doivent être nivelés avec précision de manière à connaître leur cote par rapport au niveau du seuil. Le zéro des instruments peut être vérifié par rapport à ces repères de nivellement sans qu'il soit nécessaire de faire à chaque fois un nouveau relevé de la cote du seuil. Un tassement de la structure remet cependant en cause tous les rapports entre le seuil et les repères de nivellement, et il est donc conseillé de procéder occasionnellement à des vérifications.

6.3.3 Une vérification du zéro fondée sur le niveau de l'eau (soit en fin d'écoulement, soit juste au début) est sujette à des erreurs sérieuses par suite des effets tensio-actifs et il faut donc l'éviter.

6.3.4 Les valeurs de la pente transversale du seuil, m , et du zéro de l'échelle peuvent être obtenues par mesure de la hauteur du seuil à intervalles réguliers sur la ligne de crête. On trace ensuite les droites optimales passant par les points de mesure de chaque côté du déversoir et l'intersection de ces deux droites donne le niveau du zéro de l'échelle. Dans les formules du débit, on prend pour m la moyenne des deux inclinaisons des parois latérales. Dans les installations in situ, il est recommandé d'utiliser les techniques de nivellement normalisées mais, pour les mesures en laboratoire, il est obligatoire d'utiliser des micro-mètres ou des verniers de précision.

6.4 Emplacement des sections de mesure de la charge

6.4.1 L'écoulement arrivant sur un déversoir plat en V est tri-dimensionnel. Le rabattement est plus prononcé au niveau le plus bas du seuil que dans les autres emplacements situés sur la largeur du chenal d'approche et cela provoque un abaissement de la surface de l'eau immédiatement en amont du point le plus bas du seuil. Cet abaissement est moins prononcé plus en amont et, à une distance de 10 fois la hauteur du triangle, $10 h'$, le niveau de l'eau reste sensiblement constant sur toute la largeur du chenal. Donc, pour évaluer de façon précise la charge amont, il convient de situer la prise à $10 h'$ en amont de la ligne de crête. $h' = b/2 n$ = différence entre le point le plus élevé et le point le plus bas du seuil du déversoir. Si, toutefois, cette distance est inférieure à $3 H_{max}$, la prise doit être située à $3 H_{max}$ en amont du seuil pour éviter le phénomène de rabattement.

6.4.2 Si d'autres considérations exigent que la prise soit située plus près du déversoir, et si $H_1/P_1 > 1$, des corrections devront être apportées aux coefficients de débit. Dans tous les cas, un accroissement du coefficient est nécessaire et le pourcentage d'accroissement dépend de l'emplacement de la prise et de la valeur de H_1/P_1 , suivant le tableau 2.

Tableau 2

L_1	H_1/P_1		
	1	2	3
$10 h'$	0,0	0,0	0,0
$8 h'$	0,0	0,3	0,6
$6 h'$	0,0	0,6	0,9
$4 h'$	0,0	0,8	1,2

où

H_1 est la hauteur de charge totale amont par rapport à la hauteur du point le plus bas du seuil;

P_1 est la hauteur du point le plus bas du seuil par rapport au niveau du lit amont;

L_1 est la distance entre le point de mesure de la charge à l'amont et la ligne de crête.

6.4.3 Les déversoirs plats en V peuvent être utilisés pour jauger des écoulements noyés si une prise est incorporée au seuil. Le trou central parmi les dix trous de prise au niveau du seuil (voir 6.2.6) doit être décalé sur le côté de 0,1 fois la largeur totale du seuil par rapport au point le plus bas de celui-ci (voir figure 1).

7 Relations intéressant le débit

7.1 Équations de débit

7.1.1 L'équation de base du débit exprimé en fonction de la hauteur de charge totale pour un déversoir plat en V en régime modulaire est la suivante :

$$Q = 0,8 C_{De} \sqrt{g} m Z_H H_{1e}^{5/2} \quad \dots (1)$$

où

Q est le débit total;

C_{De} est le coefficient utile de débit;

g est l'accélération due à la pesanteur;

m est la pente transversale du seuil (1 vertical/ m horizontal);

Z_H est le coefficient de forme;

H_{1e} est la hauteur de charge totale utile à l'amont par rapport à la hauteur du point le plus bas du seuil.

On peut également exprimer l'équation du débit en fonction de la hauteur jaugée, en utilisant un coefficient de vitesse en fonction de la forme géométrique du déversoir et de l'écoulement.

$$Q = 0,8 C_{De} C_v \sqrt{g} m Z_h h_{1e}^{5/2} \quad \dots (2)$$

où

C_v est le coefficient de vitesse;

Z_h est le coefficient de forme;

h_{1e} est la hauteur de charge jaugée utile à l'amont par rapport à la hauteur du point le plus bas du seuil.

7.1.2 Exprimée en fonction de la hauteur totale, l'équation de base du débit d'un déversoir plat en V en régime noyé est la suivante :

$$Q = 0,8 C_{De} f_v \sqrt{g} m Z_H H_{1e}^{5/2} \quad \dots (3)$$

où f_v est le facteur de réduction pour débit noyé.

L'équation correspondante de la hauteur jaugée est :

$$Q = 0,8 C_{De} C_v f_v \sqrt{g} m Z_h h_{1e}^{5/2} \quad \dots (4)$$

Les valeurs du coefficient de débit modulaire, C_{De} , sont données dans le tableau 5.

7.2 Hauteurs de charge utiles

7.2.1 Les hauteurs de charge utiles sont déterminées en diminuant les valeurs observées d'une petite quantité constante qui corrige les effets des propriétés du fluide. Ainsi :

$$h_{1e} = h_1 - k_h \quad \dots (5)$$

$$\text{et } H_{1e} = H_1 - k_h = h_1 + \frac{\alpha v^2}{2g} - k_h \quad \dots (6)$$

Les valeurs du facteur de correction de la charge, k_h , sont données dans le tableau 5.

Les valeurs du coefficient d'énergie de Coriolis, α , doivent être vérifiées in situ, en mesurant la distribution des vitesses dans la section où est mesurée la charge. Au niveau théorique, la valeur de α doit être prise égale à 1,2.

7.3 Coefficients de forme

7.3.1 Des coefficients de forme apparaissent dans les équations de débit des déversoirs plats en V, car la géométrie de l'écoulement change lorsque le débit dépasse la condition totale du triangle du déversoir. Ainsi :

quand $h_1 < h'$

$$Z_h = Z_H = 1,0 \quad \dots (7)$$

quand $h_1 > h'$

$$Z_h = 1 - (1 - h'/h_{1e})^{5/2} \quad \dots (8)$$

$$\text{et } Z_H = 1 - (1 - h'/H_{1e})^{5/2} \quad \dots (9)$$

où

$h' = b/2m$ est la différence de hauteur entre le point le plus haut et le point le plus bas du seuil;

b est la largeur du seuil.

Les valeurs de Z_h et Z_H sont données dans le tableau 6 en fonction de h_1/h' , et H_{1e}/h' .

7.4 Coefficient de vitesse

7.4.1 Le coefficient de vitesse, C_v , est lié au coefficient de débit modulaire, C_{De} , au rapport h'/P_1 et au rapport h_{1e}/h' .

7.4.2 Le coefficient de vitesse, C_v , apparaît dans les équations (2) et (4) avec le coefficient de forme, Z_h . Comme indiqué en 7.3.1, le coefficient de forme est fonction de h_{1e}/h' , un des facteurs jouant sur C_v . Il est donc pratique de présenter les données intéressant le produit $C_v Z_h$ en fonction de h'/P_1 et h_{1e}/h' , puisque C_v et Z_h ne jouent aucun rôle séparément. Les valeurs de ce produit sont données dans le tableau 7.

7.5 Conditions de débit modulaire/noyé

7.5.1 La limite modulaire des déversoirs plats en V n'a pas une valeur unique comme c'est le cas pour les déversoirs à deux dimensions, c'est-à-dire à seuil horizontal. La limite modulaire des déversoirs plats en V est de $(70 \pm 5 \%)$ selon le rapport H_{1e}/h' .

7.6 Facteur de réduction pour débit noyé

7.6.1 Pour des raisons de commodité, le facteur de réduction pour débit noyé, f_v , peut être rapporté au rapport de charges h_{pe}/H_{1e} . La relation fonctionnelle est donnée par :

$$f_v = 1,078 [0,909 - (h_{pe}/H_{1e})^{3/2}]^{0,183} \dots (10)$$

où $h_{pe} = h_p - k_h =$ hauteur de charge utile dans la poche de cavitation par rapport à la hauteur du point le plus bas du seuil.

Les valeurs numériques obtenues grâce à l'expression ci-dessus sont données dans le tableau 8.

7.6.2 Dans l'équation (10), le facteur de réduction pour débit noyé est rapporté au rapport h_{pe}/H_{1e} , c'est-à-dire à une expression mettant en jeu la hauteur totale. Si l'on utilise l'équation (4) pour calculer le débit, il convient de rapporter f_v aux hauteurs jaugées. Les tableaux 9 à 13 en donnent un moyen pratique, le produit $C_v f_v$ étant donné en fonction de h_{1e}/h' et h_{pe}/h_{1e} . Chaque tableau correspond à une gamme différente du rapport h'/P_1 , comme suit :

- Tableau 9 : $0,0 < h'/P_1 < 0,5$
- Tableau 10 : $0,5 < h'/P_1 < 1,0$
- Tableau 11 : $1,0 < h'/P_1 < 1,5$
- Tableau 12 : $1,5 < h'/P_1 < 2,0$
- Tableau 13 : $2,0 < h'/P_1 < 2,5$

7.7 Limites d'application

7.7.1 La limite pratique inférieure de la hauteur de charge amont dépend de la grandeur de l'influence des propriétés du fluide et de la rugosité de la couche limite. Sur un déversoir bien entretenu à section de seuil lisse, la charge minimale recommandée est de 0,03 m. Si le seuil est en béton lisse ou en matériau de structure similaire, il est proposé d'adopter une limite inférieure de 0,06 m.

7.7.2 Il existe également une valeur limite de 2,5 pour le rapport h'/P_1 et certaines restrictions sur H_1/P_2 comme l'indique le tableau 5. Ces limites dépendent de l'ampleur de la vérification expérimentale et varient en fonction de la pente transversale.

P_2 est la hauteur du point le plus bas du seuil par rapport au niveau du lit aval, en mètres.

8 Calcul du débit

8.1 Généralités

8.1.1 Il existe deux méthodes habituelles pour calculer le débit à partir des mesures de charges jaugées. La première obtient des résultats par approximations successives et emploie les équations de base de la «charge totale». Cette méthode est particulièrement bien adaptée au traitement par ordinateur, car celui-ci constitue un moyen efficace pour effectuer les calculs répétitifs nécessaires. La seconde méthode se fonde sur les relations existant entre les hauteurs de charge jaugée et totale pour chaque géométrie de déversoir et d'écoulement. Les deux méthodes permettent d'évaluer le coefficient de vitesse, C_v , figurant dans l'équation du débit à partir de tableaux ou de graphiques.

8.2 Méthode des approximations successives

8.2.1 Calcul à partir de mesures de charge isolées

La méthode des approximations successives est une technique bien connue de conversion des charges jaugées en charges totales. Elle est applicable quelle que soit la géométrie du déversoir et peut être utilisée en régime modulaire comme en régime noyé.

La méthode est la suivante :

- a) Utiliser l'équation (1) si le débit est modulaire et l'équation (3) si le déversoir est noyé.
- b) Déterminer le coefficient de débit, C_{De} , et le facteur de correction de la charge, k_h , d'après le tableau 5.
- c) Calculer la charge jaugée utile $h_{1e} = h_1 - k_h$.
- d) Déterminer la valeur de $K_1 = 0,8 C_{De} \sqrt{g} m$.

D'où $Q = K_1 Z_H H_{1e}^{5/2}$ pour un écoulement modulaire

et $Q = K_1 f_v Z_H H_{1e}^{5/2}$ pour un écoulement noyé.

- e) Déterminer l'aire de la section mouillée de l'écoulement, $A = B (h_1 + P_1)$, et de là la hauteur de charge dynamique en fonction du débit :

$$\frac{\alpha v^2}{2g} = \frac{\alpha Q^2}{2g A^2} = K_2 Q^2 \dots (11)$$

où B est la largeur de la section de mesure amont, en mètres.

- f) Supposer, en première approximation, que $h_{1e} = H_{1e}$ et calculer le débit. À ce stade, la valeur de Z_H est obtenue dans le tableau 6 et, pour un écoulement noyé, la valeur de f_v figure dans le tableau 8.

g) Se servir de l'approximation de la valeur du débit pour déterminer la hauteur de charge dynamique, puis utiliser ces données pour calculer une valeur plus approchée de la charge totale dans la section de mesure.

h) Calculer une valeur plus précise du débit à partir de cette valeur de charge totale.

j) Répéter les opérations g) et h) jusqu'à ce que la différence entre deux valeurs successives du débit soit d'un ordre de grandeur inférieur à l'erreur limite requise.

La méthode ci-dessus permet de calculer les débits à partir de mesures isolées de la hauteur de charge jaugée.

8.2.2 Calcul de la fonction modulaire hauteur/débit

La méthode précédente ne constitue pas le moyen le plus rapide de calculer la courbe modulaire hauteur/débit d'un déversoir donné lorsque cette donnée est requise. Une méthode plus concise d'obtenir la courbe théorique d'étalonnage est de calculer avant tout le rapport entre la charge totale et le débit, puis de convertir la charge totale en charge jaugée. Cette conversion demande normalement moins de boucles du cycle d'approximations successives que la première méthode décrite en 8.2.1.

Le principe de la méthode est le suivant :

a) Calculer, à partir de l'équation de la hauteur de charge totale (1), une série de valeurs de Q correspondant à une série de valeurs supposées de H_{1e} , Z_H étant obtenu à partir de :

$$Z_H = 1 - (1 - h' / H_{1e})^{5/2} \quad \dots (12)$$

C_{De} et k_h sont donnés dans le tableau 5 et Z_H dans le tableau 6.

b) L'étape suivante consiste à convertir la série de valeurs de charge totale H_{1e} en valeurs correspondantes de charge jaugée.

c) Assumant en première approximation que le niveau d'eau amont est à la cote donnée par la hauteur de charge totale, en déduire l'aire de la section mouillée du chenal d'approche, puis la vitesse d'approche. Une valeur approchée de la hauteur de charge jaugée peut être déterminée à partir de :

$$h_1 = H_{1e} - \alpha v^2 / 2g + k_h \quad \dots (13)$$

d) On obtient ainsi une meilleure approximation du niveau d'eau qui sert à améliorer la valeur initiale correspondant à la vitesse d'approche et, donc, à définir une autre valeur de la hauteur jaugée h_1 . On répète la procédure jusqu'à ce que la différence entre deux estimations successives de la hauteur jaugée soit d'un ordre de grandeur inférieur à l'erreur limite requise.

e) Répéter les opérations c) et d) pour chaque couple de valeurs de H_{1e} et Q , ce qui donne une courbe complète de la relation hauteur/débit de la structure en régime modulaire.

8.3 Méthode du coefficient de vitesse

8.3.1 Régime modulaire

Cette méthode utilise l'équation (2) pour calculer le débit à partir des grandeurs connues P_1 , m , h' et h_1 . La méthode est la suivante :

a) Calculer $h_{1e} = h_1 - k_h$ à partir des valeurs convenables de k_h se trouvant dans le tableau 5.

b) Noter la valeur correspondante de C_{De} dans le tableau 5.

c) Calculer les rapports h' / P_1 et h_{1e} / h' . Relever la valeur correspondante de $C_v Z_h$ dans le tableau 7.

d) Calculer $h_{1e}^{5/2}$.

e) Le report des valeurs ainsi obtenues dans l'équation (2) donne alors directement le débit.

8.3.2 Régime noyé

Cette méthode utilise l'équation (4) pour calculer le débit à partir des grandeurs connues P_1 , m , h' , h_1 et h_p . Le calcul se déroule comme suit :

a) Calculer $h_{1e} = h_1 - k_h$ et $h_{pe} = h_p - k_h$ en utilisant le tableau 5 pour la valeur de k_h .

b) Noter la valeur correspondante de C_{De} dans le tableau 5.

c) Évaluer h_{pe} / h_{1e} , h_{1e} / h' et h' / P_1 . Relever les valeurs correspondantes de $C_v f_v$ sur les tableaux 9 à 13 selon le cas correspondant à la valeur calculée de h' / P_1 ;

d) Déterminer la valeur de Z_h à partir du tableau 6.

e) Calculer $h_{1e}^{5/2}$.

f) Le report des valeurs ainsi obtenues dans l'équation (4) donne le débit.

Des exemples chiffrés de ces méthodes de calcul sont donnés dans le chapitre 10.

8.4 Précision

8.4.1 La précision globale des mesures dépend de :

- la précision de construction et de finition du déversoir;
- la précision des mesures de charge;
- la précision des autres dimensions mesurées;
- la précision des valeurs des coefficients;
- la précision de la forme des équations de débit.

Le chapitre 9 indique comment les valeurs estimées de ces erreurs limites individuelles peuvent être combinées pour donner l'erreur limite globale sur le débit calculé.

8.4.2 Le tableau 5 donne les erreurs limites (pour une limite de confiance de 95 %) sur les coefficients de débit modulaire. Celles-ci tiennent compte des erreurs aléatoires et systématiques survenant en cours d'étalonnage ainsi que des variations réelles, bien que marginales, des valeurs des coefficients provoquées par les variations de débit.

9 Erreurs de la mesure de débit

9.1 Généralités

9.1.1 L'erreur limite d'une mesure de débit s'estime en combinant les erreurs limites provenant des différentes sources. L'évaluation de ces composantes de l'erreur limite totale indique si l'on peut mesurer le débit avec une précision suffisante pour l'objectif recherché. Le présent chapitre donne un certain nombre d'informations permettant d'évaluer les erreurs limites des mesures de débit.

9.1.2 L'erreur sur le résultat est la différence entre la valeur vraie du débit et la valeur calculée à partir des équations de débit indiquées dans la présente Norme internationale. L'erreur est donc par définition inconnue, mais on peut évaluer l'erreur limite de la mesure. Le terme erreur limite dénote, en effet, l'écart par rapport à la valeur vraie du débit dans les limites duquel la mesure de débit est censée se trouver 19 fois sur 20 environ (limites de confiance de 95 %).

9.2 Sources d'erreur

9.2.1 Les sources d'erreur sur la mesure de débit peuvent être définies après examen de la forme de l'équation (4), c'est-à-dire :

$$Q = J C_{De} C_v f_v \sqrt{g} m Z_h h_{1e}^{5/2} \quad \dots (14)$$

où J est une constante numérique non sujette à erreur.

On peut ne pas tenir compte des erreurs sur g , accélération due à la pesanteur. Les seules sources d'erreur à considérer sont donc :

a) Le coefficient de débit modulaire C_{De} dont le tableau 5 donne les valeurs numériques et l'estimation des erreurs limites correspondantes.

b) Le coefficient de vitesse, C_v . L'expression approchée suivante peut être utilisée pour déterminer l'erreur limite sur C_v :

$$X_{C_v} = 0,5 h_1 / P_1 (\%) \quad \dots (15)$$

c) La pente transversale du seuil, m . Les valeurs numériques dépendent de la précision de la construction et des mesures ultérieures effectuées sur celle-ci.

d) Le coefficient de forme, Z_h . Lorsque l'écoulement est enfermé entre les deux côtés du triangle, la valeur de Z_h est égale à l'unité et il n'y a pas d'erreur limite sur cette valeur. Lorsque l'écoulement déborde du V , la valeur de Z_h dépend de la hauteur du triangle, h' , et de la hauteur de charge amont jaugée, h_{1e} , voir équation (8). Ces deux grandeurs

sont d'un ordre de grandeur satisfaisant et les erreurs sur les hauteurs de charge ne seront normalement pas significatives à ce stade. On a donc à nouveau une erreur limite négligeable sur Z_h , soit $X_{Z_h} = 0$.

e) La hauteur utile, h_{1e} . L'erreur limite sur h_{1e} dépend des erreurs limites sur la mesure de la charge, sur la remise à zéro de l'échelle, sur les facteurs de correction de la charge et des erreurs limites associées au nombre de mesures. Ainsi :

$$X_{h_{1e}} = \pm \frac{100 \sqrt{eh_1^2 + eh_{1e}^2 + ek_h^2 + (2S_{h_1}^-)^2}}{h_1} \quad \dots (16)$$

où

eh_1 est l'erreur limite sur la mesure de la charge amont. Toute erreur limite qui ne varie pas de façon aléatoire au cours d'une série de mesures, comme le jeu des mécanismes ou le frottement doit être incluse;

eh_{1e} est l'erreur limite sur la détermination du zéro de l'échelle;

ek_h est l'erreur limite sur k_h ;

$2S_{h_1}^-$ est l'erreur limite sur la moyenne de n mesures de la hauteur de charge amont (voir 9.3); elle est associée aux fluctuations aléatoires d'une série de mesures.

L'erreur limite sur le facteur de correction de la charge, ek_h , doit être prise égale à 0,2 mm. Les erreurs limites eh_1 et eh_{1e} dépendent d'une évaluation des erreurs limites probables par l'utilisateur.

f) La hauteur de charge dans la poche de cavitation, h_{pe} . Les erreurs limites sur h_{pe} dépendent des erreurs limites sur la mesure de la charge, le zéro de l'échelle, les facteurs de correction de la charge et des erreurs limites associées au nombre de mesures. Ainsi :

$$X_{h_{pe}} = \pm \frac{100 \sqrt{eh_p^2 + eh_{pe}^2 + ek_h^2 + (2S_{h_p}^-)^2}}{h_p} \quad \dots (17)$$

où

eh_p est l'erreur limite sur la mesure de la charge dans la poche de cavitation; les sources d'erreurs sont systématiques (jeu des mécanismes et frottement);

eh_{pe} est l'erreur limite sur la détermination du zéro de l'échelle;

$2S_{h_p}^-$ est l'erreur limite sur la moyenne de n mesures de la charge dans la poche de cavitation (voir 9.3); elle est associée aux fluctuations aléatoires d'une série de mesures.

Les erreurs limites eh_p et eh_{pe} dépendent d'une évaluation des erreurs probables par l'utilisateur. Si l'on ne fait qu'une mesure de charge, il convient d'évaluer les erreurs limites aléatoires, $2S_{h_1}^-$ ou $2S_{h_p}^-$ (voir 9.5.4).

g) Le facteur de réduction pour un débit noyé, f_v . Il existe trois facteurs qui influent sur l'erreur limite sur f_v :

- les erreurs limites de la détermination en laboratoire de la relation f_v par rapport à h_{pe}/H_{le} ;
- les erreurs limites sur la mesure de la charge utile amont, h_{le} ;
- les erreurs limites sur la mesure de la charge dans la poche de cavitation, h_{pe} .

L'erreur limite combinée s'exprime de façon adéquate comme suit :

$$X_{f_v} = \pm 5(1 - f_v) \sqrt{1 + X_{h_{le}}^2 + X_{h_{pe}}^2} \quad \dots (18)$$

9.3 Types d'erreur

9.3.1 Les erreurs peuvent se classer en erreurs aléatoires ou systématiques, les premières affectant la reproductibilité des mesures et les secondes leur précision vraie. L'écart-type d'un ensemble de n mesures d'une variable Y peut être évalué à l'aide de l'équation

$$S_Y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - Y)^2}{n - 1} \right]^{1/2} \quad \dots (19)$$

où \bar{Y} est la moyenne observée. L'écart-type de la moyenne est alors donné par

$$S_{\bar{Y}} = \frac{S_Y}{\sqrt{n}} \quad \dots (20)$$

et l'erreur limite sur la moyenne est égale à 2 fois $S_{\bar{Y}}$ (pour une probabilité de 95 %) si le nombre de mesures, n , est important.

9.3.2 Une mesure peut également être entachée d'une erreur systématique. La moyenne d'un grand nombre de valeurs mesurées diffère ainsi toujours de la valeur vraie de la grandeur mesurée. Une erreur sur le zéro de l'échelle produit, par exemple, une erreur systématique. La répétition de la mesure n'éliminant pas les erreurs systématiques, la valeur réelle ne peut donc être déterminée que par une mesure indépendante tenue pour plus précise.

9.4 Erreurs sur les grandeurs données dans la présente Norme internationale

9.4.1 Toutes les erreurs de cette catégorie sont systématiques. Les valeurs des coefficients de charge, etc., mentionnés dans la présente Norme internationale se fondent sur des évaluations expérimentales, les expériences étant effectuées avec soin en répétant suffisamment les mesures.

9.4.2 Lorsque les mesures sont faites sur d'autres installations similaires, toutefois, il peut survenir des différences systématiques entre les coefficients de débit par suite de variations de la finition de surface de l'appareil, de son installation, des conditions d'approche de l'écoulement, etc.

9.4.3 Les erreurs limites probables sur les coefficients et le terme correcteur k_h mentionné dans les chapitres précédents sont définis en fonction de l'examen de l'écart des données expérimentales par rapport aux équations de travail données et d'une comparaison des équations elles-mêmes.

9.5 Erreurs sur les grandeurs mesurées par l'utilisateur

9.5.1 Les mesures de cette catégorie sont affectées par des erreurs tant aléatoires que systématiques.

9.5.2 Aucune méthode de mesure n'étant spécifiée ni aucun mode opératoire, on ne peut donner aucune valeur numérique pour les erreurs limites de cette catégorie.

9.5.3 L'erreur limite sur la charge mesurée doit être déterminée à partir d'une évaluation des différentes sources d'erreur limite, par exemple la sensibilité de l'appareil de mesure, le réglage du zéro, les effets de la température, le jeu du mécanisme indicateur, l'erreur limite aléatoire résiduelle sur la moyenne d'une série de mesures, etc.

9.5.4 Les composantes de l'erreur limite indiquées ci-dessus doivent être calculées en pourcentage d'écart-type pour une limite de confiance de 95 %. Cependant, lorsque la valeur de l'erreur limite composante est définie à partir d'une seule mesure, l'erreur limite est dite distribuée suivant une loi rectangulaire et peut être prise dans la présente Norme internationale égale aux limites (en plus ou en moins) à l'intérieur desquelles la valeur vraie est censée se trouver avec certitude (c'est-à-dire la moitié de l'écart maximal estimé).

9.6 Combinaison des erreurs limites donnant l'erreur limite globale sur la mesure de débit

9.6.1 L'erreur limite sur le débit est donnée par l'expression

$$X_Q = \pm \sqrt{X_{C_{De}}^2 + X_{C_v}^2 + X_{f_v}^2 + X_m^2 + 6,25 X_{h_{le}}^2} \quad \dots (21)$$

où X_Q est l'erreur limite sur le débit calculé, en pourcentage.

9.6.2 Il faut noter que l'erreur limite sur le débit n'a pas une valeur unique pour un appareil donné mais varie avec le débit. Il peut donc s'avérer nécessaire de considérer l'erreur limite à plusieurs débits couvrant la gamme requise de mesures.

10 Exemples

10.1 Écoulement modulaire à faible débit ($h_{le} < h'$)

10.1.1 Soit un déversoir plat en V ayant une pente transversale de 1/20,30. La largeur de crête et la largeur du chenal d'approche sont toutes deux égales à 36,00 m et le niveau moyen de lit amont est de 0,82 m inférieur à la hauteur du point le plus bas du seuil.

Calculer le débit pour une hauteur de charge amont observée de 0,621 m. Dix mesures successives de cette charge donnent un écart-type de 0,5 mm par rapport à la moyenne et l'erreur