
Norme internationale



4359

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

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U

Liquid flow measurement in open channels — Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes

Première édition — 1983-07-01

ITeH STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 4359:1983](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ee583472-5874-4bba-9bc4-9b16663f762a/iso-4359-1983)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ee583472-5874-4bba-9bc4-9b16663f762a/iso-4359-1983>

CDU 532.532.8

Réf. n° : ISO 4359-1983 (F)

Descripteurs : écoulement de liquide, écoulement d'eau, écoulement en canal découvert, mesurage de débit, débitmètre, tube de Venturi.

Prix basé sur 51 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 4359 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 novembre 1980.

Les comités membres des pays suivants l'ont approuvée : [ISO 4359:1983](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ee583472-5874-4bba-9bc4-9b166630-4359-1983)

Allemagne, R.F.
Australie
Chine
Égypte, Rép. arabe d'
Espagne

France
Inde
Irlande
Italie
Pays-Bas

[9b166630-4359-1983](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ee583472-5874-4bba-9bc4-9b166630-4359-1983)
Suisse
Tchécoslovaquie
USA

Les comités membres des pays suivants l'ont désapprouvée pour des raisons techniques :

Belgique
Royaume-Uni

Sommaire

	Page
1 Objet et domaine d'application	1
2 Références	1
3 Définitions et symboles	1
4 Unités de mesure	1
5 Choix du type de canal jaugeur	1
6 Installation	2
6.1 Choix de l'emplacement	2
6.2 Conditions d'installation	2
6.3 Structure du canal jaugeur	3
6.4 Conditions en aval	3
7 Entretien 762 Spécifications générales	3
8 Mesure de la hauteur de charge	3
8.1 Caractéristiques générales	3
8.2 Puits de mesurage	4
8.3 Réglage du zéro	4
9 Calcul du débit	4
9.1 Équations générales du débit	4
9.2 Calcul du débit à partir de la hauteur de charge observée	5
9.3 Calcul des relations hauteur/débit	6
9.4 Vitesse d'approche	6
10 Canal jaugeur à col rectangulaire	6
10.1 Description	6
10.2 Emplacement de la section de mesure de la charge	7
10.3 Dispositions intéressant les écoulements modulaires	7
10.4 Calcul du débit	7
10.5 Calcul de la relation hauteur/débit	8
10.6 Limites d'application	8
10.7 Erreur limite des mesures	8

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)
ISO 4359:1983
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ee583472-5874-4bba-9bc4-762>

11	Canaux jaugeurs à col trapézoïdal	9
11.1	Description	9
11.2	Emplacement de la section de mesure de la charge	9
11.3	Dispositions intéressant les écoulements modulaires	9
11.4	Calcul du débit	9
11.5	Calcul de la relation hauteur/débit	10
11.6	Procédure graphique	11
11.7	Limites d'application	11
11.8	Erreur limite des mesures	12
12	Canaux jaugeurs à col en U (à fond arrondi)	12
12.1	Description	12
12.2	Emplacement de la section de mesure de la charge	13
12.3	Dispositions intéressant les écoulements modulaires	13
12.4	Calcul du débit	13
12.5	Calcul de la relation hauteur/débit	14
12.6	Limites d'application	15
12.7	Erreur limite des mesures	16
13	Erreur sur la mesure de débit	16
13.1	Généralités	16
13.2	Sources d'erreur	16
13.3	Types d'erreur	16
13.4	Erreurs sur les valeurs des coefficients	17
13.5	Erreurs de mesure	17
13.6	Combinaison des erreurs limites donnant l'erreur limite globale sur la mesure de débit	17

Annexes

A	Guide pour le choix des déversoirs et des canaux jaugeurs pour la mesure de débit de l'eau dans les canaux découverts	19
B	Symboles et unités	22
C	Distribution des vitesses	24
D	Calcul du débit suivant la théorie de la couche limite	25
E	Exemples illustrant les méthodes de calcul du débit	28
F	Exemple de calcul de l'erreur limite globale d'une mesure de débit	32
G	Détermination de la hauteur de dénivellation pour les canaux jaugeurs à col rectangulaire	33

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U

1 Objet et domaine d'application

La présente Norme internationale traite de la mesure de débit dans les rivières et canaux artificiels à régime permanent ou à variation lente, au moyen de certains types de canaux jaugeurs à ressaut. Un grand nombre de canaux jaugeurs a été mis au point, mais la présente Norme internationale ne considère que ceux qui jouissent d'une reconnaissance unanime s'appuyant sur des travaux de recherche adéquats et des essais *in situ*, et n'ont par conséquent pas besoin d'être étalonnés sur place. Trois types de canaux jaugeurs couvrant une grande gamme d'utilisations sont recommandés, à savoir :

- a) les canaux jaugeurs à col rectangulaire (voir figure 1);
- b) les canaux jaugeurs à col trapézoïdal (voir figure 4);
- c) les canaux jaugeurs à col en U, c'est-à-dire à fond arrondi (voir figure 5).

Les conditions d'écoulement considérées ne dépendent que de la hauteur de charge amont; il faut donc qu'il existe un écoulement tranquille (régime fluvial) en amont du canal jaugeur, puis que l'écoulement s'accélère en passant par la contraction et atteigne sa profondeur critique et enfin que le niveau d'eau au-delà de la structure soit assez bas pour ne pas influencer sur les caractéristiques de celle-ci.

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

2 Références

ISO 748, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Méthodes d'exploration du champ des vitesses.*

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

ISO 1438, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de déversoirs en mince paroi et canaux venturi.*

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 Choix du type de canal jaugeur

5.1 Le type de canal jaugeur à utiliser dépend de plusieurs facteurs dont la gamme des débits à mesurer, la précision requise, la charge disponible et le fait que l'écoulement charrie ou non des sédiments.

5.2 Le canal jaugeur à col rectangulaire est le plus simple à construire. Pour respecter les proportions, c'est-à-dire pour éviter tant une élévation qu'un abaissement de la surface dans le chenal d'approche lorsque le débit varie, il est nécessaire de prévoir sur le lit une surélévation formant le ressaut pour les débits supérieurs ou inférieurs au débit théorique (voir figure 2).

5.3 Le canal jaugeur à col trapézoïdal est plus approprié dans le cas où la gamme des débits à mesurer est large et doit être mesurée avec une précision uniforme. Cette forme de col est particulièrement bien adaptée lorsqu'il s'agit de travailler sur une relation donnée hauteur/débit.

5.4 Le canal jaugeur à col en U est utile pour les installations dans les chenaux à fond arrondi ou pour la mesure de débit en conduite de section circulaire. On l'utilise en particulier dans les égouts et installations de traitement des eaux résiduaires.

6 Installation

6.1 Choix de l'emplacement

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

6.1.2 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 effectué au moyen d'un canal jaugeur. On doit faire particulièrement attention aux conditions suivantes pour choisir l'emplacement :

- a) Existence d'une longueur suffisante du chenal, à section droite régulière.
- b) Uniformité de la répartition de la vitesse existante (voir annexe C).
- c) Chenal à forte pente, à éviter (mais voir 6.2.2).
- 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 tels que la végétation 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.
- i) Uniformité de la section du chenal d'approche.
- k) Effet du vent; celui-ci 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.
- m) Croissance de mauvaises herbes aquatiques.
- n) Transport solide.

6.1.3 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 de y apporter les améliorations nécessaires. Le fonctionnement de l'installation doit également être vérifié par une mesure de débit séparée.

6.2 Conditions d'installation

6.2.1 Spécifications générales

6.2.1.1 L'installation complète de mesurage comprend un chenal d'approche, un canal jaugeur 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 canal jaugeur, 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.

6.2.1.2 La répartition et la direction des vitesses peuvent avoir une influence importante sur le fonctionnement du canal jaugeur (voir 6.2.2 et annexe C).

6.2.1.3 Une fois le canal jaugeur installé, tout changement matériel apporté à l'installation modifie les caractéristiques de débit.

6.2.2 Chenal d'approche

6.2.2.1 Si le débit dans le chenal d'approche est perturbé par des irrégularités de la couche limite, telles que, par exemple, 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.

6.2.2.2 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. Cependant, il y a intérêt à prévoir une plus grande longueur de chenal d'approche uniforme, si cela est possible.

6.2.2.3 La longueur de chenal d'approche uniforme indiquée en 6.2.2.2 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 6.2.2.1 et 6.2.2.2.

6.2.2.4 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 $2H_{\max}$. Le point de tangence en aval doit se situer à au moins H_{\max} en amont de la section de mesure de la charge et la portion revêtue du chenal d'approche comprise entre l'extrémité des parois latérales incurvées et la section de transition à l'entrée du canal jaugeur doit avoir une section en forme de prisme.

6.2.2.5 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 $10H_{\max}$.

6.2.2.6 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 $30H_{\max}$, on peut effectuer le mesurage du débit, sous réserve qu'il existe une répartition régulière des vitesses au niveau de la station de jaugeage.

6.2.2.7 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 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.

6.3 Structure du canal jaugeur

6.3.1 La structure doit être rigide, étanche et capable de résister aux écoulements de crue sans être endommagée par des débordements ou l'érosion aval. Son axe doit être aligné sur la direction de l'écoulement du chenal amont et sa géométrie doit correspondre aux dimensions données dans les chapitres qui s'y rapportent.

6.3.2 La surface du col du canal jaugeur et du tronçon immédiatement voisin du chenal d'approche doit être lisse. Elle peut 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. La finition superficielle est particulièrement importante sur la partie prismatique du col, mais moins importante sur le profil sur une distance de $0,5H_{\max}$ en amont et en aval du col proprement dit.

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

- a) Largeur à la base du col : 0,2 % de cette largeur avec un maximum absolu de 0,01 m.
- b) Défaut de planéité des surfaces planes du col : 0,1 % de L .
- c) Écartement des surfaces verticales du col : 0,2 % de l'écartement avec un maximum de 0,01 m.
- d) Pentés moyennes longitudinales et transversales de la base du col : 0,1 %.
- e) Pentés des surfaces obliques du col : 0,1 %.
- f) Longueur du col : 1 % de L .
- g) Défaut de cylindricité ou de conicité de la transition à l'entrée du col : 0,1 % de L .

h) Défaut de planéité des surfaces planes de la transition à l'entrée du col : 0,1 % de L .

j) Défaut de planéité des surfaces planes de la transition à la sortie du col : 0,3 % de L .

k) Défaut de planéité ou de courbure des autres surfaces verticales ou obliques : 1 %.

m) Défaut de planéité du lit dans la partie revêtue du chenal d'approche : 0,1 % de L .

La structure doit être mesurée dès son achèvement, et un calcul doit être fait sur les dimensions importantes et leurs écarts-types pour des limites de confiance de 95 %. Les dimensions servent au calcul du débit et l'écart-type au calcul de l'erreur limite globale sur une seule détermination du débit (voir 13.5).

6.4 Conditions en aval

Les conditions d'écoulement en aval de la structure sont importantes parce qu'elles contrôlent le niveau d'eau aval et peuvent influencer sur le fonctionnement du canal jaugeur. Le canal jaugeur doit être conçu de façon à ne pas pouvoir être noyé dans les conditions d'emploi (voir 10.3.1, 11.3.2 et 12.3.2). La construction d'un canal jaugeur dans une rivière ou un fleuve peut modifier les conditions d'écoulement et provoquer des affouillements en aval de la structure, d'où une accumulation de matériaux de lit plus en aval, ce qui, à la longue, pourrait faire suffisamment monter le niveau de l'eau pour noyer le canal jaugeur notamment à faibles débits. Toute accumulation de la sorte doit être éliminée avant qu'elle prenne des proportions excessives.

7 Entretien — Spécifications générales

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 du canal jaugeur 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 6.2.2.2. Le puits à flotteur et l'entrée du chenal d'approche doivent aussi être maintenus propres et exempts de dépôts.

Le col et le convergent d'un canal jaugeur doivent être maintenus propres et exempts d'algues.

8 Mesure de la hauteur de charge

8.1 Caractéristiques générales

8.1.1 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 utilisera des limnigraphes. Les emplacements des mesures de charge sont indiqués en 10.2, 11.2 et 12.2.

8.1.2 Plus la taille du canal jaugeur et la charge correspondante sont petites, plus les erreurs de construction, de réglage du zéro et de lecture du dispositif mesureur de charge, même petits, prennent d'importance relative.

8.2 Puits de mesurage

8.2.1 Il est habituel de mesurer la charge dans un puits de mesurage séparé pour réduire les effets des irrégularités superficielles de l'eau. Dans ce cas il est souhaitable également de mesurer la charge dans le chenal d'approche à des fins de vérification.

8.2.2 Les puits de mesurage doivent être verticaux et de hauteur et/ou de 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. À l'endroit recommandé pour la mesure de la charge le puits doit être raccordé au chenal d'approche par une tuyauterie ou une fente.

8.2.3 Le puits, la tuyauterie de raccordement ou la fente doivent chacun être imperméables 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.

8.2.4 La radier de la tuyauterie doit se trouver à au moins 0,06 m en dessous du niveau le plus bas à enregistrer, affleurer au ras de la couche limite du chenal d'approche, perpendiculairement à celle-ci. 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 dix 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 température amovible affleurant la paroi et percée de trous, dont les bords ne doivent être ni arrondis ni ébarbés.

8.2.5 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 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.

8.2.6 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.

8.2.7 Il n'est pas possible de fixer de 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 en laboratoire.

8.3 Réglage du zéro

8.3.1 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 radier du col et, d'autre part, de vérifier régulièrement ces réglages dans la suite des opérations.

8.3.2 Un moyen précis doit être prévu pour vérifier le zéro. Le zéro de l'instrument doit être obtenu par référence directe au radier du col et une note du réglage doit être faite dans le chenal d'approche et dans le puits de mesurage. La vérification du zéro par rapport au niveau de l'eau (soit en fin d'écoulement ou juste au début) est sujette à des erreurs sérieuses par suite des effets tensio-actifs et il faut donc l'éviter.

9 Calcul du débit

9.1 Équations générales du débit

9.1.1 La théorie de la profondeur critique appuyée par des données expérimentales peut servir à définir les équations de base relatives à un écoulement libre dans une contraction profilée. La théorie simple s'applique à un écoulement de fluide idéal, sans frottement. Lorsqu'on considère un fluide réel comme l'eau, un coefficient supplémentaire doit être ajouté dans les mesures pratiques, qu'il soit déterminé par expérience ou dérivé par modification de la théorie simple, pour tenir compte de la formation d'une couche limite. La présente Norme internationale définit des méthodes de calcul manuelles permettant de déterminer le débit, mais, lorsqu'on considère un grand nombre de structures, il vaut mieux employer des ordinateurs.

9.1.2 L'énergie spécifique, E , d'un écoulement dans un chenal est donnée par :

$$E = \beta d + \alpha \bar{v}^2 / 2g \quad \dots (1)$$

où

d est la profondeur de l'écoulement;

\bar{v} est la vitesse moyenne dans la section;

α est le coefficient tenant compte de la non-uniformité du champ des vitesses;

β est le coefficient fonction de la courbure moyenne des lignes de courant.

L'équation de continuité est :

$$Q = A \bar{v} \quad \dots (2)$$

où

Q est le débit total;

A est l'aire de la section transversale d'écoulement.

D'où

$$E = \beta d + \alpha Q^2 / 2g A^2 \quad \dots (3)$$

On a écoulement critique lorsque E prend une valeur minimale pour un débit donné Q , la profondeur d et l'aire A correspondante pour une géométrie donnée de la section transversale étant prises comme variables. On peut démontrer que l'énergie spécifique est minimale quand

$$Q^2 = \frac{\beta g A^3}{\alpha w} \quad \dots (4)$$

où w est la largeur du plan d'eau.

9.1.3 Les profils des vitesses observées au cours des expériences indiquent que la distribution des vitesses est presque uniforme dans le col d'un canal jaugeur et on peut donc supposer que $\alpha = 1$. Si les lignes de courant sont suffisamment incurvées, condition observée lorsque le col est de longueur supérieure à un certain minimum, $\beta = 1$. L'équation de base définissant un écoulement critique à travers une contraction profilée est :

$$Q = (g A_c^3 / w_c)^{1/2} \quad \dots (5)$$

l'indice c indiquant que le débit est critique.

9.1.4 L'équation (5) n'est pas directement applicable à la dérivée de la relation hauteur/débit car :

- a) elle ne tient pas compte de la formation d'une couche limite se déplaçant moins vite dans le col;
- b) elle est fonction de l'aire et de la largeur de la surface de l'eau au niveau de la section critique dont l'emplacement est mal défini, ce qui rend difficile une mesure directe du niveau d'eau dans cette section.

L'équation de base doit donc être transformée en une équation plus pratique et corrigée pour tenir compte des effets de couche limite.

9.2 Calcul du débit à partir de la hauteur de charge observée

9.2.1 Si l'on considère l'écoulement d'un fluide réel dans une contraction rectangulaire profilée, on peut exprimer l'équation (5) en fonction de la hauteur de charge totale utile comme suit :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} b_e \sqrt{g} H_e^{3/2} \quad \dots (6)$$

où

b_e est la largeur utile du col du canal jaugeur;

H_e est la hauteur de charge totale utile.

9.2.2 On peut alors exprimer l'équation (6) en fonction de h_e , la hauteur de charge utile jaugée en amont de la structure. L'équation devient donc, pour les canaux jaugeurs à col rectangulaire :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C_v b_e h_e^{3/2} \quad \dots (7)$$

où

$$C_v = (H_e/h_e)^{3/2} \quad \dots (8)$$

C_v est un coefficient sans dimension tenant compte de l'influence de la vitesse d'approche sur le niveau mesuré en amont du canal jaugeur. Les hauteurs et largeurs utiles peuvent être déterminées à partir des valeurs relevées

a) par simple correction empirique (voir 10.4.1, 11.4.1 et 12.4.1), ou

b) après considérations théoriques sur la formation de la couche limite (voir annexe D).

9.2.3 Le même genre de relation peut être obtenu pour les canaux jaugeurs à col trapézoïdal :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C_s C_v b_e h_e^{3/2} \quad \dots (9)$$

où

C_s est un facteur numérique tenant compte de la non-rectangularité de la section d'écoulement

$$C_s = f(m H_{ce}/b_e) \quad \dots (10)$$

H_{ce} est la hauteur de charge totale utile à la section critique.

Des méthodes théoriques de calcul et d'étalonnage existent qui emploient les équations ci-dessus, mais elles sont lourdes à manipuler, du fait surtout que C_s dépend de H_{ce} qui diffère de façon significative de la hauteur jaugée h . Le paragraphe 11.5 donne une autre méthode pour calculer le débit d'après l'équation (5).

9.2.4 La relation correspondante pour les canaux jaugeurs à col en U est :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C_u D_e h_e^{3/2} \quad \dots (11)$$

où

C_u est une constante numérique tenant compte de la non-rectangularité de la section d'écoulement

$$C_u = f(H_{ce}/D_e) \quad \dots (12)$$

D_e est le diamètre utile de la base du col en U.

9.3 Calcul des relations hauteur/débit

9.3.1 Dans le cas d'un canal jaugeur à col rectangulaire, on doit utiliser l'équation (7) pour calculer la relation hauteur/débit de la structure. Les équations (9) et (11) ne sont pas pratiques pour calculer la relation correspondante pour les canaux jaugeurs à col trapézoïdal et en U. On peut alors employer une autre méthode.

9.3.2 Il est possible d'étalonner de façon théorique une structure de jaugeage sur la totalité d'une gamme de débit en considérant les conditions d'écoulement au col du canal jaugeur et en déduisant les hauteurs de charge et les débits. Le principe de la méthode est de choisir une série de valeurs de d_c , profondeur critique au niveau du col, et de calculer les valeurs correspondantes de Q et H_e à l'aide des expressions

$$Q = (g A_c^3 / w_c)^{1/2} \dots (13)$$

et

$$H_e = d_c + \frac{A_c}{2w_c} \dots (14)$$

On peut convertir la hauteur de charge totale utile H_e en hauteur totale H de la manière indiquée en 11.5 et 12.5, puis convertir cette hauteur totale H en hauteur jaugée h comme indiqué en 11.5 et 12.5.

9.4 Vitesse d'approche

9.4.1 La hauteur de charge totale varie en fonction de la hauteur jaugée, suivant l'équation :

$$H_e = h_e + \alpha \bar{v}_a^2 / 2g \dots (15)$$

où

\bar{v}_a est la vitesse moyenne dans le chenal d'approche au niveau de la station de jaugeage;

α est un coefficient (d'énergie cinétique, dit de Coriolis), tenant compte du fait que la charge cinétique dépasse $\bar{v}_a^2 / 2g$ si la distribution des vitesses n'est pas uniforme dans la section.

Si l'on utilise les équations données dans la présente Norme internationale, α peut être pris égal à 1, compte tenu des tolérances données en 10.7.2, 11.8.2 et 12.7.2 et des dispositions de 6.2.2 et de l'annexe C.

9.4.2 Le rapprochement des équations (8) et (15) d'une part, et (7), (9) et (11) d'autre part, permet de définir une relation générale pour C_v comme suit :

$$(C_v^{2/3} - 1)^{1/2} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \times \frac{b_e h_e}{A} C_v C_{s \text{ ou } u} \dots (16)$$

où A est l'aire de la section transversale d'écoulement dans le chenal d'approche.

9.4.3 Pour un chenal d'approche rectangulaire :

$$A = B(h + p) \dots (17)$$

où

B est la largeur du chenal d'approche;

p est la hauteur du radier du canal jaugeur par rapport au radier du chenal d'approche.

9.4.4 Pour un chenal d'approche trapézoïdal :

$$A = (h + p) [B + m_a(h + p)] \dots (18)$$

où

B est fonction de la largeur du lit du chenal d'approche;

m_a est l'inclinaison des parois du chenal d'approche.

9.4.5 Pour un chenal d'approche en U :

$$A = \frac{\pi}{4} D_a^2 f [(h + p) / D_a] \dots (19)$$

où D_a est la largeur (diamètre) du chenal d'approche.

10 Canal jaugeur à col rectangulaire

ISO 4359:1983

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cist/c583472-5874-4bba-9bc4-9b16663f762a/iso-4359-1983>

10.1 Description

10.1.1 Un canal jaugeur à col rectangulaire comporte une contraction de section rectangulaire disposée de façon systématique par rapport à l'axe du chenal d'approche.

C'est le type le plus courant de canal jaugeur et le plus facile à construire. Mais il n'est pas adaptable aux chenaux non rectangulaires où la perte de charge est importante.

10.1.2 Il existe trois types de canaux jaugeurs à col rectangulaire :

- a) à contraction latérale uniquement;
- b) à contraction verticale (dénivellation) uniquement;
- c) à contractions latérale et verticale combinées.

Le type à utiliser est fonction des conditions aval, des divers débits, du débit maximal, de la perte de charge admissible, des limites du rapport h/b et du fait que le cours d'eau charrie ou non des sédiments.

10.1.3 Le radier du col doit être plan sur toute sa largeur et toute sa longueur. Les côtés du col doivent être verticaux, parallèles entre eux et perpendiculaires au radier, de manière à donner une largeur de col précise de haut en bas et d'un bout à l'autre du canal jaugeur. La surface du col et de la section de transition à l'entrée doit être lisse; on peut utiliser du béton recouvert d'une finition lisse ou revêtu d'un matériau lisse non

sujet à la corrosion. L'axe du col doit coïncider avec l'axe du chenal d'approche. Dans le cas des canaux jaugeurs à dénivellation (contraction verticale), le lit du chenal d'approche doit être plan et jamais plus élevé que le radier du col sur une distance d'au moins $2h_{\max}$ en amont de la section de mesure de la charge.

10.1.4 La géométrie du canal jaugeur doit correspondre aux indications de la figure 1. Les rayons de la courbure de transition avec le lit d'une part et les parois du col d'autre part, doivent être respectivement de $4p$ et $2(B - b)$ au moins. L'évasement de 1:6 après le col peut être tronqué comme l'indique la figure 1 lorsqu'il n'est pas important de retrouver la même hauteur de charge.

10.1.5 Lorsqu'il faut absolument retrouver au moins 80 % de la charge, on peut utiliser un canal jaugeur à contractions latérale et verticale de la géométrie représentée à la figure 2. La pente du coursier en aval du col doit être de 1:20 pour une longueur de $2H$ (où H est la hauteur totale au-dessus du point le plus haut de la dénivellation); elle peut être supérieure au-delà. Les parois latérales en aval du col doivent avoir une longueur de $4H$ et leur divergence doit être de 1:10. Pour récupérer un maximum de la charge, il faut que les parois latérales soient parallèles jusqu'au pied du coursier, l'évasement prenant ensuite une forme hyperbolique jusqu'au point où le chenal aval commence.

NOTE — Lorsque le rapport entre la hauteur d'eau aval au-dessus du point le plus haut du col et la hauteur d'eau amont au-dessus de ce même point est inférieur à 0,5, on doit utiliser un canal jaugeur à chute (voir figure 3) avec une plate-forme et des parois faisant écran, un bassin de tranquillisation et des déflecteurs pour dissiper efficacement l'énergie.

10.2 Emplacement de la section de mesure de la charge

La hauteur de lame doit être mesurée en un point suffisamment éloigné en amont de la contraction pour ne pas subir les effets d'abaissement de la surface, mais aussi suffisamment proche pour que la perte d'énergie entre la section de mesure et le col soit négligeable. Il est recommandé de situer la section de mesure à une distance comprise entre 3 et 4 fois h_{\max} en amont du bord d'attaque de la section de transition à l'entrée.

10.3 Dispositions intéressant les écoulements modulaires

10.3.1 L'écoulement est modulaire lorsqu'il est indépendant des variations du niveau aval; pour cela il faut que la vitesse soit la vitesse critique au niveau du col. Le niveau du radier doit donc être à une hauteur telle qu'il se produise un écoulement modulaire sur toute la gamme des débits théoriques. Les dimensions du canal jaugeur doivent par ailleurs être telles que la hauteur de charge totale à l'amont (par rapport au radier du col) soit au moins égale à 1,25 fois la hauteur de charge totale à l'aval pour tous les débits (dans l'hypothèse d'un régime fluvial tranquille à l'aval). Il est néanmoins possible de réduire la différence en cas de débit libre constaté. Si par contre l'évasement est tronqué, le rapport doit être au moins 1,33.

10.3.2 Sans les chenaux artificiels, il est souvent possible de déterminer avec une précision raisonnable la profondeur aval pour divers débits en utilisant, par exemple, une formule tenant compte du frottement si le chenal est assez long et à pente constante ou en se référant aux caractéristiques des pressions de contrôle à l'aval.

Si le canal jaugeur doit être installé dans un chenal ou un cours d'eau existant, il convient de recueillir sur l'emplacement les renseignements suivants :

- a) la profondeur maximale enregistrée, avec une estimation du débit à cette profondeur;
- b) les profondeurs approximatives à deux débits intermédiaires au moins;
- c) le niveau d'eau morte dans le cours d'eau, c'est-à-dire le niveau à débit nul.

10.4 Calcul du débit

10.4.1 L'équation de base du débit des canaux jaugeurs à resaut à col rectangulaire est donnée en 9.2.2. Elle peut être réécrite comme suit :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C_v C_D b h^{3/2} \dots (20)$$

où

$$C_D = \left(\frac{b_e}{b}\right) \left(\frac{h_e}{h}\right)^{3/2} \dots (21)$$

mais

$$b_e = b - 2\delta_* \dots (22)$$

$$h_e = h - \delta_* \dots (23)$$

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

Le remplacement des valeurs de (22) et (23) dans (21) donne :

$$C_D = \left(1 - 2\frac{\delta_*}{L} \times \frac{L}{b}\right) \left(1 - \frac{\delta_*}{L} \times \frac{L}{h}\right)^{3/2} \dots (24)$$

où L est la longueur de la section prismatique de la contraction du canal jaugeur.

Dans la plupart des installations ayant une bonne finition superficielle, la valeur de δ_*/L se situe en pratique à l'intérieur de la gamme 0,002 à 0,004. Si $10^5 > L/k_s > 4\ 000$ et $Re > 2 \times 10^5$, δ_*/L peut être considéré égal à 0,003.

L'équation (24) devient donc :

$$C_D = \left(1 - \frac{0,006 L}{b}\right) \left(1 - \frac{0,003 L}{h}\right)^{3/2} \dots (25)$$

Le tableau 1 donne diverses valeurs de C_D dérivées de cette équation; ces valeurs sont celles qui s'appliquent aux installations bien construites décrites ci-dessus.

10.4.2 L'annexe D donne une méthode plus élaborée qui tient compte de la formation d'une couche limite dans le col du canal jaugeur. Cette méthode permet à l'utilisateur de tenir compte du caractère variable de δ_v/L et d'employer l'expression plus générale définissant C_D donnée dans l'équation (24).

10.4.3 La valeur de C_v peut être calculée à l'aide des équations (16), (17), (22) et (23) ou, plus facilement, relevée sur la figure 6 ou dans le tableau 2 avec une approximation satisfaisante. La figure 6 est établie en fonction de b_e , h_e et A , mais, en pratique, il suffit de tenir compte dans le diagramme de B et h (et non plus de b_e et h_e). Le tableau 2 est établi implicitement dans cette hypothèse. Dans le cas où le chenal d'approche n'est pas parfaitement rectangulaire au niveau de la section de mesure de h , B doit être déterminée à partir de l'expression :

$$B = \frac{\text{aire de la section transversale}}{h + p} \dots (26)$$

10.4.4 L'étalonnage doit être effectué selon les indications de 10.4.3. Dans les calculs *préliminaires*, toutefois, pour les canaux jaugeurs représentés à la figure 2, on peut adopter l'équation de débit suivante :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C b H^{3/2} \dots (27)$$

où C est le coefficient global qui pour les calculs peut prendre une valeur comprise entre 0,97 et 1,00.

Lorsque la structure est combinée à un pont avec des piles de pont comprises dans le col, le terme b de l'équation (27) peut être remplacé par

$$(b - n_p b_p - 2C_c n_p H)$$

où

b_p est la largeur d'une pile;

n_p est le nombre de piles;

C_c est le coefficient de contraction
 = 0,045 pour les piles à nez rond
 = 0,040 pour les piles à nez pointu.

10.5 Calcul de la relation hauteur/débit

10.5.1 La relation hauteur/débit d'un canal jaugeur à col rectangulaire s'obtient à partir d'une série de valeurs de la hauteur de charge jaugée, h , en suivant pour chacune la méthode donnée en 10.4.1 à 10.4.3. On peut tracer ensuite les courbes des hauteurs de charge jaugées et des débits correspondants et on obtient ainsi la relation hauteur/débit du canal jaugeur considéré.

10.6 Limites d'application

10.6.1 La limite inférieure pratique de h dépend de la grandeur de l'influence des propriétés du fluide et de la rugosité de la

couche limite. La limite inférieure recommandée est la plus grande des deux valeurs suivantes : 0,05 m ou 0,05L.

10.6.2 Il existe aussi une limite au rapport des aires du chenal d'approche et du col imposée par les difficultés rencontrées lorsque le nombre de Froude dépasse 0,5 dans le chenal d'approche. La limite supérieure recommandée de

$$\frac{bh}{B(h + p)}$$

est 0,7.

10.6.3 D'autres restrictions résultent du manque de données expérimentales sûres pour les canaux jaugeurs de dimensions extrêmes :

- a) b ne doit pas être inférieur à 0,10 m.
- b) h/b ne doit pas être supérieur à 3.
- c) h ne doit pas être supérieure à 2 m.

10.6.4 h/L ne doit pas excéder 0,50. Cette restriction résulte de la nécessité de maintenir un écoulement parallèle dans le col au niveau de la section critique. h_{max}/L peut atteindre 0,67 avec une erreur limite supplémentaire sur le coefficient de 2 %.

10.7 Erreur limite des mesures

10.7.1 L'erreur limite globale dépend de :

- a) la norme de construction et de finition du canal jaugeur;
- b) l'erreur limite de la formule du coefficient de débit;
- c) l'erreur limite sur le coefficient de vitesse d'approche;
- d) l'application correcte des règles d'installation;
- e) l'erreur limite du réglage du zéro;
- f) l'erreur limite des mesures géométriques sur le canal jaugeur;
- g) la précision du limnimètre.

10.7.2 Avec un peu d'adresse et de soin dans la construction du canal jaugeur, on peut espérer avoir sur les coefficients une erreur limite voisine de 1 % dans des circonstances favorables, par exemple quand C_D et C_v ne sont pas très différents de 1. On peut obtenir une estimation du pourcentage d'erreur limite combinée (X_C) sur les coefficients à l'aide de l'équation :

$$X_C = \pm [1 + 20 (C_v - C_D)] \dots (28)$$

10.7.3 La méthode de combinaison des erreurs limites sur les coefficients avec les erreurs limites dues à d'autres sources d'erreur est expliquée au chapitre 13. [C_D dans l'équation (28) est obtenu par l'équation (25).]

11 Canaux jaugeurs à col trapézoïdal

11.1 Description

11.1.1 Les canaux jaugeurs à col trapézoïdal peuvent s'adapter à différentes conditions d'écoulement et la forme géométrique optimale de leur col (c'est-à-dire largeur du lit et inclinaison des parois) dépend de la gamme des débits à mesurer et des caractéristiques du cours d'eau ou du chenal dans lequel ils sont installés. Des méthodes de calcul permettant de choisir une géométrie adaptée à la relation hauteur/débit existante ou à une relation déterminée à l'avance sont brièvement décrites en 11.6.

11.1.2 Les canaux jaugeurs à col trapézoïdal doivent généralement avoir une géométrie comme il est indiqué à la figure 4. Dans certains cas cependant il est conseillé de mettre au même niveau le radier du col et le radier du chenal d'approche, et donc d'avoir $p = 0$. C'est notamment le cas lorsque le canal jaugeur charrie des sédiments. La présente Norme internationale ne traite que de la classe de canaux jaugeurs à col trapézoïdal dont les parois inclinées du col dépassent de l'eau.

11.1.3 Le canal jaugeur doit être installé avec l'axe du col dans l'axe du chenal d'approche. Un écoulement tranquille (fluvial) doit exister au voisinage du canal jaugeur et celui-ci doit être installé à une hauteur telle qu'il fonctionnera à débit libre sur toute sa gamme d'utilisation. Les surfaces du canal jaugeur doivent être en béton lisse, en acier galvanisé ou en autres matériaux lisses non sujets à la corrosion. La partie du col est d'une importance spéciale; elle doit avoir un radier plan et parfaitement prismatique, ses parois inclinées doivent être planes, symétriques et couper suivant un angle aigu le radier du col.

11.1.4 Les sections de transition à l'entrée et à la sortie peuvent être planes ou incurvées selon les besoins de la construction.

11.1.5 La convergence de la section de transition à l'entrée, si elle est plane, ne doit pas être de plus de 1:3 de chaque côté. Si ses parois sont incurvées, elles doivent être convenablement profilées et avoir par exemple la forme de cylindres inclinés, de cylindres obliques ou de cônes à axe vertical. Ces surfaces doivent se trouver entièrement contenues à l'intérieur des plans définissant de chaque côté la convergence 1:3 (c'est-à-dire du côté de l'axe du chenal), et, si elles sont incurvées, être absolument tangentées en leur extrémité aux plans formant le col.

11.1.6 Les surfaces formant la section de transition à la sortie doivent se trouver entièrement contenues à l'intérieur des plans définissant de chaque côté l'évasement 1:3. Un évasement de 1:6 donne une très bonne récupération de la charge et une limite modulaire élevée.

11.2 Emplacement de la section de mesure de la charge

La hauteur de charge du canal jaugeur doit être mesurée en un point suffisamment éloigné en amont de la contraction pour ne pas subir les effets d'abaissement de la surface, mais aussi suffisamment proche pour que la perte d'énergie entre la section

de mesure et le col soit négligeable. Il est recommandé de situer la section de mesure à une distance comprise entre 3 et 4 fois h_{\max} en amont du bord d'attaque de la section de transition à l'entrée.

11.3 Dispositions intéressant les écoulements modulaires

11.3.1 L'écoulement est modulaire lorsqu'il est indépendant des variations du niveau aval; pour cela il faut que la vitesse passe par sa phase critique au niveau du col. Le niveau du radier doit donc être à une hauteur telle qu'il se produise un écoulement modulaire sur toute la gamme des débits théoriques. Les dimensions du canal jaugeur doivent également être telles que la hauteur de charge totale à l'amont rapportée au radier du col soit bien supérieure à la hauteur de charge totale à l'aval (dans l'hypothèse d'un régime fluvial tranquille à l'aval).

11.3.2 La limite modulaire dépendant de la récupération de la charge au-delà du col, le rapport nécessaire entre la charge amont et la charge aval dépend de l'angle d'évasement, comme suit :

de chaque côté 1:20 $H/H_d > 1,10$

de chaque côté 1:10 $H/H_d > 1,20$

de chaque côté 1:6 $H/H_d > 1,25$

de chaque côté 1:3 $H/H_d > 1,35$

où H_d est la hauteur de charge totale juste au-delà de la section de transition à la sortie, rapportée au radier du canal jaugeur.

11.3.3 Dans les chenaux artificiels, il est souvent possible de déterminer avec une précision raisonnable la profondeur aval pour divers débits en utilisant, par exemple, une formule tenant compte du frottement si le chenal est assez long et à pente constante ou en se référant aux caractéristiques des pressions de contrôle à l'aval.

11.3.4 Si le canal jaugeur doit être installé dans un chenal ou un cours d'eau existant, il convient de recueillir sur l'emplacement les renseignements suivants :

- la profondeur maximale enregistrée, avec une estimation du débit à cette profondeur;
- les profondeurs approximatives à deux débits intermédiaires au moins;
- le niveau d'eau morte dans le cours d'eau, c'est-à-dire le niveau à débit nul.

11.4 Calcul du débit

11.4.1 L'équation de base du débit des canaux jaugeurs à col trapézoïdal est donnée en 9.2.3. Elle peut être réécrite comme suit :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C_v C_s C_D b h^{3/2} \dots (29)$$

Le coefficient de débit modulaire C_D est donné par une expression analogue à celle qui vaut pour les canaux jaugeurs rectangulaires dans l'équation (24).

$$C_D = \left(1 - 2\eta \frac{\delta_*}{L} \times \frac{L}{b}\right) \left(1 - \frac{\delta_*}{L} \times \frac{L}{h}\right)^{3/2} \dots (30)$$

où

η est fonction de m ;

m est l'inclinaison des parois du canal jaugeur (m horizontal à 1 vertical).

Pour les installations ayant une bonne finition superficielle, δ_*/L peut être pris égal à 0,003, et l'équation (30) se réduit alors à

$$C_D = \left(1 - 0,006 \eta \frac{L}{b}\right) \left(1 - \frac{0,003 L}{h}\right)^{3/2} \dots (31)$$

La valeur de η est obtenue sur la figure 7 et la valeur du coefficient de débit modulaire est obtenue en remplaçant η , L , b et h de l'équation (31) par leurs valeurs connues.

11.4.2 L'annexe D indique une méthode permettant de déterminer C_D à partir de l'équation (30) en tenant compte du caractère variable de δ_*/L .

11.4.3 La valeur de C_V peut être calculée au moyen des équations (16) et (18) en supposant que $b_e = b$ et $h_e = h$. On peut également utiliser la figure 6 avec les valeurs calculées de A en l'équation (18).

11.4.4 La valeur de C_s à introduire dans l'équation (29) est fonction de mH_{ce}/be et est donnée à la figure 8. S'il était précis de supposer que $H_{ce} = h$, hauteur jaugée, on pourrait utiliser directement l'équation de base pour évaluer le débit, mais cette opération serait fastidieuse. Au début, on peut supposer que $H_{ce} = h$, mais pour un étalonnage précis ou pour une déduction précise du débit d'une mesure ponctuelle de la hauteur de charge, il est nécessaire de procéder par approximations successives en utilisant l'équation

$$\frac{mH_{ce}}{b_e} = \frac{mh_e}{b_e} \times C_v^{2/3} \dots (32)$$

Dans la pratique, il est suffisamment précis de prendre comme hypothèse que $h_e \approx h$ et $b_e \approx b$, ce qui donne une expression plus facile à utiliser

$$\frac{mH_{ce}}{b_e} = \frac{mh}{b} \times C_v^{2/3} \dots (33)$$

11.4.5 Le calcul du débit à la première approximation pour une hauteur de charge donnée sur un canal jaugeur à col trapézoïdal de géométrie connue se déroule donc comme suit :

- a) Faire la liste des valeurs de m , m_a , b , B , p , L et g .
- b) Calculer l'aire de la section transversale du chenal d'approche à l'aide de l'équation (17) ou (18) ou (19) selon la forme du chenal.

c) Calculer $\eta = \sqrt{(1 + m^2)} - m$, ou le relever sur la figure 7.

d) Calculer C_D à partir de l'équation (31) et des valeurs connues de η , L , b et h .

e) En 1^{ère} approximation, supposer que $mH_{ce}/b_e \approx mh/b$ et relever C_s sur la figure 8 pour la valeur donnée de h .

f) Relever la valeur initiale de C_v sur la figure 6 en supposant que $h_e \approx h$ et $b_e \approx b$ et en lisant le diagramme à $C_s bh/A$.

g) Calculer la valeur de première approximation de Q en utilisant l'équation (29) et les valeurs ci-dessus de C_D , C_s et C_v .

11.4.6 Comme suite à la première approximation en 11.4.5, les valeurs de C_s , C_v et Q demandent à être raffinées. C_D possède sa valeur définitive. L'approximation suivante s'effectue comme suit :

- a) Dériver mH_{ce}/b_e au moyen de l'équation (33).
- b) La figure 8 donne alors la nouvelle valeur de C_s .

c) Calculer alors $C_s b_e h_e/A$ (en supposant que $b_e \approx b$ et $h_e \approx h$) et relever sur la figure 6 la nouvelle valeur de C_v .

d) Introduire ensuite la valeur de C_D et les valeurs révisées de C_v et C_s dans l'équation (29) pour obtenir un chiffre plus précis pour Q .

11.4.7 Répéter les opérations de 11.4.6 jusqu'à ce qu'on obtienne une précision suffisante. Voir à l'annexe E un exemple de méthode de calcul du débit.

11.5 Calcul de la relation hauteur/débit

11.5.1 Choisir une gamme de valeurs de d_c , profondeur critique dans le col, (une série logarithmique grossière convient mieux qu'une série arithmétique) et pour chaque valeur procéder comme suit :

- a) $w_c = b + 2md_c \dots (34)$
- b) $A_c = (b + md_c) d_c \dots (35)$
- c) Calculer Q à l'aide de l'équation (13)
- d) Calculer H_e à l'aide de l'équation (14)

11.5.2 Deuxième étape : Calculer la correction de la hauteur de charge, $H_* = H - H_e$. Pour les installations ayant une bonne finition δ_*/L peut être pris égal à 0,003 et H_* peut être calculé en remplaçant δ_*/L par cette valeur dans l'expression :

$$H_* = \frac{P_c}{w_c} \times \frac{\delta_*}{L} \times L \dots (36)$$

où

$$P_c = b + 2d_c (1 + m^2)^{1/2} \dots (37)$$

Si la finition superficielle n'est pas lisse la valeur de δ_*/L s'obtiendra de la manière décrite à l'annexe D. En remplaçant δ_*/L par sa valeur calculée dans l'équation (36), on obtient la valeur de H_* , compte tenu du caractère variable de δ_*/L .

11.5.3 Pour chaque valeur de d_c , calculer la hauteur de charge totale $H = H_e + H_*$. Les valeurs de Q et de H déterminées en 11.5.1 et 11.5.2 donnent le rapport entre la hauteur de charge totale et le débit du canal jaugeur.

11.5.4 Pour convertir la hauteur de charge totale H , en hauteur jaugée, h , on utilise l'expression

$$h = H - \frac{\bar{v}_a^2}{2g} \quad \dots (38)$$

où \bar{v}_a est la vitesse moyenne dans le chenal d'approche au niveau de la section de jaugeage. Lorsqu'on utilise l'équation (38) la géométrie du chenal d'approche joue dans le calcul de l'aire de la section transversale A_a . Si la section est trapézoïdale, l'équation à utiliser est

$$A_a = (h + p) [B + m_a (h + p)] \quad \dots (39)$$

où

p est la hauteur de la dénivellation du col;

B est la largeur du lit du chenal d'approche;

m_a est l'inclinaison des côtés (m_a horizontal à 1 vertical).

11.5.5 h apparaissant implicitement dans le membre de droite de l'équation (38) il est nécessaire de procéder par approximations successives pour déterminer h .

1^{ère} approximation

Poser $h = H$ et calculer A_{a1} au moyen de l'équation (39). Introduire \bar{v}_{a1} dans l'équation (38), \bar{v}_{a1} étant égal à Q/A_{a1} ; on obtient ainsi h_1 .

2^{ème} approximation

Poser $h = h_1$ et calculer A_{a2} au moyen de l'équation (39). $\bar{v}_{a2} = Q/A_{a2}$ et $h_2 = \bar{v}_{a2}^2/2g$.

3^{ème} approximation et suivantes

Répéter la même opération jusqu'à ce que $h_n - h_{n-1}$ soit trop petit pour avoir une influence significative sur la précision.

11.5.6 À partir des paires de valeurs de Q et h ainsi trouvées pour une série de valeurs de d_c , tracer la courbe d'étalonnage du canal jaugeur à une grande échelle logarithmique. Les valeurs de débit correspondant aux valeurs intermédiaires de h peuvent être lues sur le graphique en cas de besoin. À noter que sur un papier log/log la courbe d'étalonnage n'est pas une droite.

11.5.7 L'annexe E donne un exemple de calcul de la relation hauteur/débit d'un canal jaugeur trapézoïdal (avec ou sans correction tenant compte de la couche limite).

11.6 Procédure graphique

11.6.1 La conception d'un canal jaugeur à col trapézoïdal permet une grande souplesse et laisse le projeteur libre de choisir les valeurs de m et de b lui donnant la relation hauteur/débit la plus proche d'une valeur prédéterminée pour deux débits différents. Pour ce genre de calcul une formule approchée supposant que $C_D = 1,0$ est parfaitement appropriée.

11.6.2 Une méthode graphique convenable a été mise au point qui utilise l'équation (29) sous la forme

$$\frac{Q}{\frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} bH^{3/2}} = f\left(\frac{mH}{b}\right) \quad \dots (40)$$

dans l'hypothèse de calcul où $H = H_c$.

11.6.3 On évalue les valeurs requises de Q et H d'après la relation hauteur/débit connue ou estimée existant à l'emplacement du jaugeage, compte tenu de la perte de charge engendrée par l'écoulement libre, des limites pratiques concernant la hauteur du col par rapport au lit du cours d'eau (on ne peut pas aller en dessous du niveau «zéro») et des autres restrictions rencontrées.

On détermine les deux valeurs de

$$\frac{Q}{\frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} bH^{3/2}} \quad \dots (41)$$

correspondant aux conditions aux limites et on les reporte sur un papier graphique transparent en fonction de H porté en abscisse sur la même échelle logarithmique que pour la figure 9.

11.6.4 On ajoute des lignes de guidage verticales et horizontales au papier calque et l'on y indique les coordonnées $x = 1$ et $y = 1$. On déplace le calque tout en maintenant ses axes parallèles à ceux de la figure 9 jusqu'à ce que les deux points qui y sont portés se trouvent sur la courbe. L'intersection de $y = 1$ sur le calque avec l'axe des y de la figure 9 donne $1/b$ et l'intersection de $x = 1$ sur le calque avec l'axe des x de la figure 9 donne m/b et donc m .

11.6.5 La figure représente un exemple de lignes à trait interrompu correspondant pour $Q/\left[\frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} bH^{3/2}\right]$ et H aux valeurs 3,07, 2,82m et 1,34, 0,21m, soit des débits de 24,8 m³/s et 0,22 m³/s respectivement. Ces conditions se rencontrent pour un canal jaugeur dont $b = 1,22m$ et $m = 0,90$.

11.7 Limites d'application

11.7.1 La limite pratique inférieure de h est fonction de l'importance de l'influence des propriétés du fluide et de la rugosité de la couche limite. La limite inférieure recommandée est la plus grande des deux valeurs suivantes : 0,05 m ou 0,05L.