

**Guide d'échantillonnage
à des fins d'analyse
environnementales**

CAHIER 7

**MÉTHODES DE MESURE
DU DÉBIT EN CONDUIT OUVERT**



Note au lecteur : Les renseignements relatifs aux marques déposées ou aux produits commerciaux ne sont donnés qu'à titre indicatif et des produits équivalents peuvent être substitués.

Le Centre d'expertise en analyse environnementale est le nouvel éditeur du Cahier du Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Cette version n'est pas une révision de la 1^{re} édition (1998), publiée jusqu'en juillet 2008 par le Groupe Modulo inc.

Pour information complémentaire sur les activités du **Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec** ou pour vous procurer nos documents, veuillez consulter notre site Internet à l'adresse suivante : www.ceaeq.gouv.qc.ca

ou communiquer avec nous :

Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

2700, rue Einstein, bureau E.2.220

Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-1301

Télécopieur : 418 528-1091

Courriel : ceaeq@mddep.gouv.qc.ca

ISBN : 978-2-550-53932-2

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2008

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2008

AVANT-PROPOS

Le *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* décrit un ensemble de bonnes pratiques qui régissent la planification et la réalisation des travaux d'échantillonnage. Il vise à assurer la qualité des prélèvements d'échantillons et la validité de l'information scientifique qui en découle.

Conçu à des fins d'information, ce guide de référence essentiellement descriptif s'adresse aux travaillant dans le cadre d'une campagne de caractérisation environnementale. Il a été amorcé par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, après que l'on eût constaté que les préleveurs n'avaient pas à leur disposition les instruments nécessaires pour acquérir rapidement une connaissance d'ensemble des pratiques d'échantillonnage au Québec.

Ce document a dès le début suscité beaucoup d'intérêt au sein des préleveurs. Les informations du guide ne sont toutes inédites, mais on trouvait intéressant et utile d'avoir une synthétisées des informations contenues dans des ouvrages techniques ou issues de l'expérience pratique en échantillonnage au Québec.

Le *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* regroupe une série de cahiers qui traitent de façon spécifique de l'échantillonnage de divers milieux. Le Cahier 1 – Généralités du *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales*, doit accompagner chacun des cahiers subséquents. Il présente le cadre général de la planification d'une campagne d'échantillonnage et décrit des procédés techniques sur les plans de la qualité, de la légalité, de la santé et de la sécurité. Il propose enfin différentes modalités pour une rationalisation optimale des programmes d'échantillonnage.

Ce 7^e cahier, intitulé « Méthodes de mesure du débit du conduit ouvert », traite des techniques d'évaluation du volume des effluents rejetés par des procédés utilisant d'importantes quantités d'eau.

Nous remercions sincèrement toutes les personnes qui ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce document.

Août 2008

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS	3
LISTE DES TABLEAUX	13
LISTE DES FIGURES	15
1. INTRODUCTION.....	17
2. GÉNÉRALITÉS	18
2.1. Définition de débit.....	18
2.2. But de la mesure de débit.....	20
2.3. Types de mesure de débit.....	20
2.3.1. Mesure de débit ponctuelle.....	20
2.3.2. Mesure de débit en continu.....	21
2.4. Système d'écoulement	21
2.4.1. Conduits fermés	21
2.4.2. Conduits ouverts.....	22
2.5. Principes d'écoulement en conduits ouverts.....	22
2.6. Principes de mesure de débit en conduit ouvert.....	23
2.7. Méthodes de mesure avec élément primaire.....	24
2.7.1. Canal de mesure.....	24
2.7.2. Déversoirs	25
2.8. Système de mesure	28
2.8.1. L'élément secondaire.....	28
2.9. Unités de mesure.....	28
2.10. Mesure de référence.....	29
2.11. Point de mesure.....	29
2.11.1. Emplacement	29
2.11.2. Chambre de mesure	30
2.12. Choix d'une méthode de mesure	35
2.12.1. Critères de choix.....	35
2.12.2. La présence de solides.....	35

2.12.3.	Débit maximal.....	36
2.12.4.	Tolérance aux variations de débit.....	36
2.12.5.	Largeur du canal de mesure	37
2.12.6.	Pertes de charge	37
2.12.7.	La précision	38
2.12.8.	Amplitude de la mesure	39
2.12.9.	Chiffres significatifs	39
2.12.10.	Fidélité et fiabilité.....	41
2.12.11.	Particularités d'installation	41
2.12.12.	Entretien	42
2.12.13.	Étalonnage	43
3.	Description des canaux de mesure.....	44
3.1.	Canal parshall.....	44
3.1.1.	Description	44
3.1.2.	Principe de fonctionnement	46
3.1.3.	Applications	46
3.1.4.	Dimensions.....	46
3.1.5.	Gamme de mesures.....	49
3.1.6.	Équation de débit en écoulement libre	49
3.1.7.	Précision.....	52
3.1.8.	Sources d'erreur	52
3.1.9.	Critères de sélection.....	53
3.1.10.	Particularités d'installation	54
3.1.11.	Écoulement noyé.....	57
3.1.12.	Équation de débit en écoulement noyé	60
3.1.13.	Pertes de charge	60
3.1.14.	Modification au canal.....	64
3.1.15.	Étalonnage.....	65
3.2.	Canal Palmer-Bowlus.....	65
3.2.1.	Description	65
3.2.2.	Principe de fonctionnement	65
3.2.3.	Applications	66
3.2.4.	Dimensions.....	66
3.2.5.	Gammes de mesure.....	67
3.2.6.	Équation de débit en écoulement libre	67
3.2.7.	Capacité de mesure d'un canal	73

3.2.8.	Précision.....	73
3.2.9.	Sources d'erreur	74
3.2.10.	Critères de sélection	75
3.2.11.	Particularités d'installation	76
3.2.12.	Écoulement noyé.....	77
3.2.13.	Perte de charge.....	77
3.2.14.	Modification au canal.....	77
3.2.15.	Étalonnage	77
3.3.	Canal Leopold-Lagco.....	78
3.3.1.	Description	78
3.3.2.	Principe de fonctionnement	79
3.3.3.	Applications	79
3.3.4.	Dimensions	80
3.3.5.	Gamme de mesures.....	80
3.3.6.	Équation de débit en écoulement libre	80
3.3.7.	Capacité de mesure d'un canal	84
3.3.8.	Précision.....	84
3.3.9.	Sources d'erreur	84
3.3.10.	Critères de sélection	86
3.3.11.	Particularités d'installation	86
3.3.12.	Écoulement noyé.....	87
3.3.13.	Pertes de charge	87
3.3.14.	Modifications au canal	87
3.3.15.	Étalonnage	88
3.4.	Canal tronqué (Cutthroat)	88
3.4.1.	Description	88
3.4.2.	Principe de fonctionnement	89
3.4.3.	Applications	89
3.4.4.	Dimensions	89
3.4.5.	Gamme de mesures.....	92
3.4.6.	Équation de débit en écoulement libre	92
3.4.7.	Précision.....	94
3.4.8.	Sources d'erreur	94
3.4.9.	Critères de sélection.....	99
3.4.10.	Particularités d'installation	99
3.4.11.	Écoulement noyé.....	101
3.4.12.	Équation de débit en écoulement noyé	102

3.4.13.	Perte de charge.....	102
3.4.14.	Modifications au canal	105
3.4.15.	Étalonnage	105
3.5.	Canal en H	106
3.5.1.	Description	106
3.5.2.	Principe de fonctionnement	107
3.5.3.	Applications	111
3.5.4.	Dimensions	111
3.5.5.	Gammes de mesure.....	116
3.5.6.	Équation de débit en écoulement libre	116
3.5.7.	Précision.....	119
3.5.8.	Sources d'erreur	119
3.5.9.	Critères de sélection.....	120
3.5.10.	Particularités d'installation	121
3.5.11.	Écoulement noyé.....	121
3.5.12.	Équation de débit en écoulement noyé	122
3.5.13.	Modification au canal.....	122
3.5.14.	Étalonnage	123
4.	Description spécifique des déversoirs à paroi mince	123
4.1.	Généralités.....	123
4.1.1.	Principe de fonctionnement	123
4.1.2.	Applications générales	123
4.1.3.	Particularités d'installation	124
4.1.4.	Perte de charge	127
4.1.5.	Écoulement noyé.....	127
4.1.6.	Équation de débit en écoulement noyé	127
4.1.7.	Critères de sélection.....	128
4.1.8.	Sources d'erreur	128
4.1.9.	Entretien.....	129
4.1.10.	Étalonnage	129
4.1.11.	Classification	130
4.2.	Déversoir rectangulaire sans contractions.....	132
4.2.1.	Description	132
4.2.2.	Dimensions	132
4.2.3.	Gamme de mesures.....	134
4.2.4.	Équation de débit en écoulement libre	134

4.2.5.	Précision.....	136
4.2.6.	Corrections	137
4.3.	Déversoir rectangulaire avec contractions	137
4.3.1.	Description	138
4.3.2.	Dimensions	138
4.3.3.	Gamme de mesures.....	140
4.3.4.	Équation de débit en écoulement libre	140
4.3.5.	Précision.....	142
4.3.6.	Corrections	142
4.4.	Déversoir trapézoïdal (Cipolletti)	144
4.4.1.	Description	144
4.4.2.	Dimensions	144
4.4.3.	Gamme de mesures.....	146
4.4.4.	Équation de débit en écoulement libre	146
4.4.5.	Précision.....	147
4.4.6.	Corrections	148
4.5.	Déversoir triangulaire.....	149
4.5.1.	Description	149
4.5.2.	Dimensions	149
4.5.3.	Gamme de mesures.....	151
4.5.4.	Équation de débit en écoulement libre	151
4.5.5.	Précision.....	153
4.5.6.	Corrections	153
4.6.	Déversoir combiné	154
4.6.1.	Description	154
4.6.2.	Dimensions	154
4.6.3.	Gamme de mesures.....	156
4.6.4.	Équation de débit en écoulement libre	157
4.6.5.	Précision.....	158
4.6.6.	Corrections	158
4.7.	Déversoir à insertion.....	158
4.7.1.	Description	159
4.7.2.	Dimensions	159
4.7.3.	Gamme de mesures.....	161
4.7.4.	Utilisations	161
4.7.5.	Équation de débit en écoulement libre	162

4.7.6.	Écoulement noyé.....	162
4.7.7.	Précision.....	162
5.	Autres méthodes de mesure.....	163
5.1.	Utilisation d'éléments traceurs	163
5.1.1.	Généralités	163
5.1.2.	Méthode de la détermination du temps de parcours.....	168
5.1.3.	Méthode de mesure par dilution.....	186
5.2.	Méthode volumétrique	211
5.2.1.	Principe de la méthode	211
5.2.2.	Applications	211
5.2.3.	Avantages.....	211
5.2.4.	Désavantages	212
5.2.5.	Équipement requis	212
5.2.6.	Personnel.....	212
5.2.7.	Réalisation.....	212
5.2.8.	Précision.....	214
5.3.	Mesure du débit à l'aide des stations de pompage	214
5.3.1.	Principe de mesure.....	214
5.3.2.	Applications	215
5.3.3.	Étalonnage des pompes	215
5.3.4.	Personnel et équipements	215
5.3.5.	Renseignements à noter.....	216
5.3.6.	Avantages.....	216
5.3.7.	Désavantages	216
5.3.8.	Méthode d'étalonnage.....	216
5.4.	Méthode de détermination aire/vitesse.....	222
5.4.1.	Généralités	222
5.4.2.	Principe de la méthode	222
5.4.3.	Applications	222
5.4.4.	Avantages.....	222
5.4.5.	Désavantages	223
5.4.6.	Équipement de mesure de la vitesse.....	223
5.4.7.	Mesure de la hauteur d'eau	224
5.4.8.	Position du point de mesure.....	225
5.4.9.	Aire d'écoulement	225
5.4.10.	Mesure de la hauteur d'eau	226

5.4.11.	Mesure de la vitesse	226
5.4.12.	Calcul du débit.....	229
5.4.13.	Précision.....	229
5.4.14.	Causes d'erreur.....	229
6.	Comparaison de la précision et de l'exactitude des méthodes volumétriques, par dilution et au moulinet	230
6.1.	Précision et exactitude.....	230
6.2.	Méthode volumétrique	232
6.3.	Méthode par dilution.....	232
6.4.	Méthode du moulinet	233
	RÉFÉRENCES.....	235
	BIBLIOGRAPHIE	239

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 - Dimensions pour chambre type - Canal Palmer Bowlus	33
Tableau 2 - Dimensions pour chambre type - Canal Parshall	34
Tableau 3 - Abaque pour comparer la capacité de mesure des différents éléments primaires	40
Tableau 4 - Dimensions pour les puits de stabilisation	42
Tableau 5 - Canal Parshall – Dimensions normalisées.....	48
Tableau 6 - Canal Parshall - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre....	50
Tableau 7 - Canal Parshall - Équations de débit en écoulement libre	51
Tableau 8 - Coefficients et exposants - Canal Parshall en écoulement noyé.....	61
Tableau 9 - Canal Palmer-Bowlus - Dimensions normatives selon Ludwig.....	68
Tableau 10 - Canal Palmer-Bowlus - Dimensions normatives selon Plasti-Fab inc.	71
Tableau 11 - Canal Palmer-Bowlus - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre	72
Tableau 12 - Canal Leopold-Lagco - Dimensions normatives selon F.B. Leopold Company, Inc.	81
Tableau 13 - Canal Leopold-Lagco - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre	83
Tableau 14 - Canal Tronqué - Dimensions normalisées.....	91
Tableau 15 - Canal tronqué - Débits minimaux et maximaux recommandés en écoulement libre..	93
Tableau 16 - Canal tronqué - Valeurs des coefficients C et K en écoulement libre.....	95
Tableau 17 - Canal tronqué - Équations de débit en écoulement libre (système anglais)	96
Tableau 18 - Canal Tronqué - Équations de débit en écoulement libre (métrique)	97
Tableau 19 - Canal tronqué - Valeurs des coefficients C et K en écoulement noyé	103
Tableau 20 - Canal HS - Dimensions normalisées	112
Tableau 21 - Canal en H - Dimensions normalisées.....	113
Tableau 22 - Canal HL - Dimensions normalisées.....	114
Tableau 23 - Canal en H - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre....	115
Tableau 24 - Canal en H - Valeurs des coefficients et des exposants.....	118
Tableau 25 - Étalonnage des déversoirs - Méthode volumétrique - Dimensions limitatives	131
Tableau 26 - Déversoir rectangulaire sans contraction - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre	135

Tableau 27 - Déversoir rectangulaire avec contractions - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre	141
Tableau 28 - Déversoir rectangulaire avec contractions - Coefficients «a», «C» et «k».....	143
Tableau 29 - Déversoir trapézoïdal (Cipolletti) - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre	147
Tableau 30 - Déversoir triangulaire - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre	151
Tableau 31 - Déversoir triangulaire - Valeur du coefficient «C ¹ »	153
Tableau 32 - Déversoir à insertion - Capacité de mesure.....	162

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 - Déversoir - Composantes	27
Figure 2 - Chambre type - Canal Palmer-Bowlus	31
Figure 3 - Chambre type - Canal Parshall	32
Figure 4 - Canal de mesure - Arrangement du canal de mesure au canal d'écoulement.....	38
Figure 5 - Canal Parshall - Illustration du canal	45
Figure 6 - Canal Parshall - Caractéristiques physiques et d'écoulement.....	47
Figure 7 - Canal Parshall - Pente de la section d'approche	55
Figure 8 - Canal Parshall - Union des sections d'approche et de convergence.....	56
Figure 9 - Canal Parshall - Effets de l'écoulement noyé.....	58
Figure 10 - Canal Parshall - Rapport h_2/h_1	59
Figure 11 - Perte de charge - Canaux Parshall : 1 à 8 pieds	62
Figure 12 - Perte de charge - Canaux Parshall : 10 à 50 pieds	63
Figure 13 - Forme d'un canal Palmer-Bowlus - selon Ludwig	69
Figure 14 - Forme d'un canal Palmer-Bowlus - Plasti-Fab inc.	70
Figure 15 - Forme d'un canal Leopold-Lagco - F.B. Leopold Company Inc.....	82
Figure 16 - Canal tronqué - Caractéristiques physiques	90
Figure 17 - Canal Hs - Caractéristiques physiques.....	108
Figure 18 - Canal H - Caractéristiques physiques	109
Figure 19 - Canal HL - Caractéristiques physiques	110
Figure 20 - Déversoir rectangulaire sans contractions - Caractéristiques physiques.....	133
Figure 21 - Déversoir rectangulaire avec contractions - Caractéristiques physiques	139
Figure 22 - Déversoir trapézoïde (Cipolletti) - Caractéristiques physiques	145
Figure 23 - Déversoir triangulaire - Caractéristiques physiques.....	150
Figure 24 - Déversoir combiné - Caractéristiques physiques	155
Figure 25 - Déversoir à insertion - Caractéristiques physiques	160
Figure 26 - Exemple de distributions des vitesses de courant dans une aire d'écoulement.....	227

1. INTRODUCTION

Plusieurs procédés industriels utilisent de grandes quantités d'eau lors d'opérations de fabrication ou de transformation. L'industrie pétrochimique, métallurgique et la transformation du bois en papier sont des exemples typiques de tels procédés. La mesure des quantités d'eau utilisées pour la production représente souvent un élément indispensable pour la gestion des procédés. La mesure des quantités d'eau utilisées pour la production représente souvent un élément indispensable pour la gestion des procédés. De plus, dans le contexte environnemental, la mesure des volumes d'effluents rejetés dans le système aquatique est une donnée essentielle pour l'application de plusieurs règlements. Cette évaluation est notamment requise lorsque les normes de rejets sont exprimées sur la base de la quantité de produit fabriqué ou encore sur une base périodique.

L'évaluation de la quantité d'effluents est généralement réalisée au moyen de canaux ouverts qui permettent la quantification du débit, c'est-à-dire du volume par unité de temps. Ce cahier traite des principales techniques utilisées pour cette mesure. Il s'agit d'un ouvrage essentiellement descriptif, dont le contenu peut être regroupé autour de quatre sujets majeurs :

- les éléments de mesure les plus couramment utilisés au Québec;
- les modes de fonctionnement et d'entretien des appareils;
- les tables et les équations permettant de calculer le débit;
- quelques méthodes d'étalonnage et de vérification des instruments de mesure.

Ce document s'adresse aussi bien aux experts qu'aux débutants dans le domaine. Il expose à la fois les principes des méthodes de mesure et les techniques de calcul en insistant sur plusieurs difficultés couramment rencontrées.

Les coûts importants reliés à l'installation permanente de ces équipements justifient pleinement de tenir compte des règles contenues dans ce cahier pour déterminer le type d'élément le mieux adapté aux besoins d'une entreprise. De plus, les informations présentées guideront le lecteur dans le choix des techniques d'entretien qui permettent de maintenir la fiabilité des mesures et un usage optimal de l'élément. Toutefois, l'utilisation de ces procédés peut, dans des circonstances particulières, nécessiter des adaptations. Même si le document présente de nombreuses mises en garde concernant plusieurs difficultés d'application, il n'est pas possible de toutes les prévoir. Par conséquent, la conception, l'installation et l'utilisation des ouvrages demeurent l'entière responsabilité de l'exploitant. De plus, la mention de marques de commerce et de modèles de produits ne constitue pas une recommandation de leur emploi.

2. GÉNÉRALITÉS

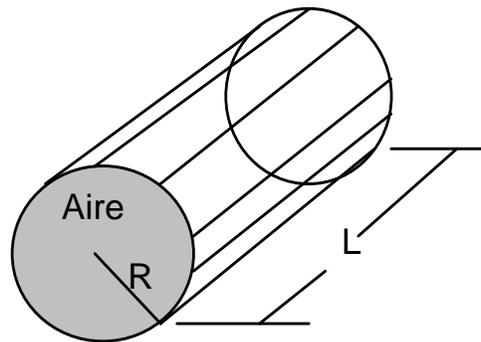
2.1. Définition de débit

En hydraulique, le débit (Q) est défini comme étant un volume (V) de liquide qui s'écoule à travers une section donnée d'un canal ou d'une conduite par une unité de temps (t).

$$Q = \Delta V / \Delta t \quad (1)$$

Le processus de résolution de l'équation précédente consiste donc à déterminer le volume (ΔV) en fonction du temps.

Par exemple, dans le cas d'une conduite cylindrique, la détermination du volume d'une section est obtenue en multipliant l'aire (A) par la longueur (L).

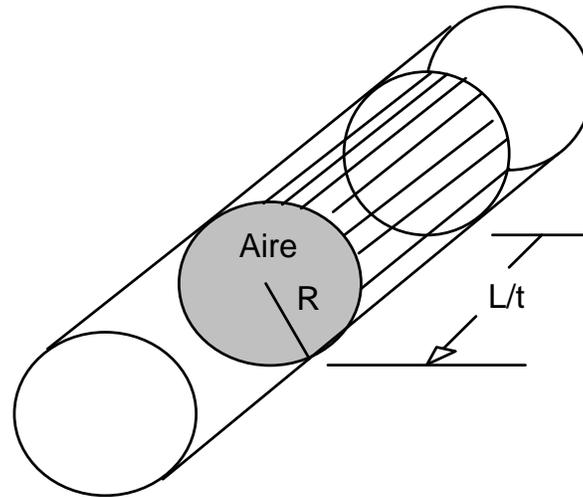


$$A = \pi R^2 \quad (2)$$

$$V = A \times L \quad (3)$$

Le volume du cylindre est le résultat du produit de l'aire (A) par la longueur (L).

Pour exprimer un débit, il est nécessaire que l'une des variables soit fonction du temps. En assumant que l'aire (A) est constante, l'autre variable (L) s'exprime en tant que distance de déplacement dans l'espace en fonction du temps. L'expression de la longueur de déplacement (ΔL) en fonction du temps (Δt) donne la vitesse (U).



$$U = \Delta L / \Delta t \quad (4)$$

où :

U est la vitesse d'écoulement au travers l'aire (A).

En remplaçant dans l'équation (3), la variable (L) par sa valeur établie à l'équation (4), l'équation devient :

$$V = AU \Delta t \quad (5)$$

De même, en remplaçant (V) dans l'équation (1), par sa valeur établie à l'équation (5), l'équation de débit peut alors s'exprimer comme suit :

$$Q = AU \quad (6)$$

Le débit est généralement exprimé en unité de volume par unité de temps. L'unité de mesure est le m^3/s ou le pi^3/s .

Pour exprimer le débit massique (Q_m), il est nécessaire de corriger l'équation (6) par le facteur de densité du liquide mesuré. Ainsi, l'équation devient :

$$Q_m = \rho AU \quad (7)$$

où

- ρ est la densité du liquide en kg/m^3 ;
- A est l'aire en m^2 ;
- U est la vitesse du fluide en travers de l'aire en m/sec .

Note : Pour des effluents dont la densité est variable, cette expression peut introduire une erreur importante de mesure. Il est donc préférable d'exprimer la valeur du débit en unités volumétriques par unité de temps.

2.2. But de la mesure de débit

Des méthodes de mesure de débit précises et uniformes sont nécessaires pour :

- établir la charge polluante des sources urbaines, industrielles et agricoles;
- dimensionner les équipements de transport et de traitement des effluents et des eaux d'alimentation;
- connaître les variations de débit et de charge par rapport au temps;
- mesurer, localiser, analyser et solutionner différents problèmes de réseau de collecte et de distribution de l'eau;
- évaluer la performance des équipements de traitement;
- déterminer la qualité des plans d'eau et quantifier la ressource d'eau disponible.

Dans le contexte environnemental, ces mesures sont aussi nécessaires pour l'application des lois et règlements.

2.3. Types de mesure de débit

2.3.1. Mesure de débit ponctuelle

Les mesures de débit ponctuelles ou instantanées sont effectuées à un moment précis dans le temps et couvrent généralement une période très courte (quelques minutes). Elles ne sont donc représentatives que du moment où elles sont réalisées.

Les mesures ponctuelles servent essentiellement à :

- vérifier l'étalonnage de certains ouvrages hydrauliques (ex. : pompes, canaux de mesure);

- établir le débit d'un écoulement stable (ex. : effluent d'étang d'aération prolongée);
- établir de façon rapide le débit d'un écoulement;
- déterminer les dimensions des équipements hydrauliques pour le transport ou le traitement.

Les méthodes généralement utilisées pour effectuer ce type de mesure sont :

- la méthode volumétrique (voir section 5.2);
- la méthode de dilution (voir section 5.1.3);
- la méthode aire/vitesse (voir la section 5.4);
- la lecture ponctuelle de la hauteur d'eau à l'aide d'un déversoir combiné portatif à insertion (voir la section 4.7).

Lors de la transmission des résultats, il importe de fournir l'information concernant l'endroit, la date, l'heure et la méthode de mesure utilisée, pour ne pas créer de confusion dans leur interprétation.

2.3.2. Mesure de débit en continu

Des mesures de débit en continu sont constituées d'un ensemble de mesures ponctuelles effectuées à des intervalles de temps très rapprochés (quelques secondes), par des appareils capables d'enregistrer les valeurs obtenues tout au long de l'événement. L'avantage de ce type de mesures provient du fait qu'elles peuvent s'étendre sur une période de temps donnée (quelques heures à plusieurs jours) et faire ressortir toutes les variations de débit survenues au cours de cette période; l'information obtenue est donc plus complète.

Ce type de mesure nécessite généralement la mise en place, sur une base temporaire ou permanente, d'un élément primaire de mesure.

2.4. Système d'écoulement

2.4.1. Conduits fermés

L'écoulement est dit en conduit fermé lorsque le liquide est confiné dans un conduit et soumis à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

2.4.2. Conduits ouverts

L'écoulement est dit en conduit ouvert lorsque la surface de l'eau, communément appelé ligne d'eau, est en contact avec l'atmosphère et soumise à la seule pression atmosphérique.

Les conduits peuvent être naturels, tels les ruisseaux ou les rivières, ou artificiels, tels les canaux de navigation, d'irrigation, les fossés de drainage, les réseaux d'égout, etc.

2.5. Principes d'écoulement en conduits ouverts

Les réseaux d'égout pluvial et domestique sont de type canaux ouverts. La surface de l'écoulement est en contact avec l'atmosphère et est soumise à l'unique pression atmosphérique. Puisqu'il est impossible d'exercer de la pression sur une extrémité du conduit de transport jusqu'à l'autre extrémité, la vitesse de l'écoulement dépend du gradient de la pente du conduit et de la résistance frictionnelle aux parois. Comme résultat, en écoulement stable et uniforme (laminaire), il y a toujours une baisse progressive du niveau de l'eau entre le début et la fin du conduit.

En conduit ouvert, l'énergie totale contenue dans l'écoulement est l'énergie cinétique présente sous forme de vitesse (Head Velocity) et l'énergie de pression qui résulte du différentiel de hauteur du niveau de l'eau. Ce qui donne l'équation suivante :

$$\text{Énergie totale} = \frac{V^2}{2g} + d \quad (8)$$

où

V est la vitesse de l'écoulement;

g est la constante gravitationnelle;

d est la hauteur d'eau mesurée à partir du fond du conduit.

Cette équation démontre que la hauteur d'eau varie en présence d'une variation de vitesse, contrairement aux conduits fermés où des changements de vitesse se traduisent en changement de pression. Lorsque l'écoulement s'accélère et que l'énergie se transforme en vitesse, la hauteur doit diminuer. Inversement, lorsque la vitesse diminue, la hauteur doit augmenter. La chute de la surface d'écoulement de l'eau s'appelle « drawdown ». Au contraire, dans des conduits fermés, les changements de pression se traduisent par une variation de la vitesse d'écoulement, alors que le niveau d'eau demeure constant.

Cet écoulement peut se manifester suivant trois catégories de régimes :

Régime uniforme : la pente de la ligne d'eau est parallèle à la pente du fond du conduit.

Régime graduellement varié : le fluide subit une accélération ou une décélération associée à un changement modéré de la section d'écoulement ou de la pente du fond du conduit.

Régime critique : ce régime est obtenu par une forte contraction provoquée par un rehaussement du fond et/ou un rétrécissement de la largeur du canal ou un changement brusque de la pente du fond du conduit.

Le canal de type Parshall est un excellent exemple d'un instrument de mesure qui utilise le phénomène du changement de hauteur lorsque la vitesse augmente. Lorsque l'eau entre dans le canal, elle accélère dans la section convergente (approche) pour atteindre une vitesse maximale lorsqu'elle passe dans l'étranglement dont la pente du plancher est descendante; ce qui provoque une baisse importante du niveau d'eau.

Cette variation de hauteur est directement reliée à la quantité d'eau (débit) de l'écoulement. C'est sur cette base que les courbes et les tables de débit sont rédigées pour les canaux Parshall de dimensions standard.

2.6. Principes de mesure de débit en conduit ouvert

Pour mesurer le débit d'un liquide en conduit ouvert, différentes approches sont possibles :

- tenir compte seulement de la cinématique, c'est-à-dire de la mécanique du mouvement du liquide sans chercher à connaître les forces qui la sous-tendent. C'est le principe de la méthode hauteur/vitesse;
- se baser sur les relations connues entre la gravité qui provoque l'écoulement et les forces d'inertie et de viscosité qui le freinent;
- analyser quantitativement les variations des propriétés physiques ou chimiques du liquide suite à l'ajout de substances solubles. C'est le principe de la méthode par dilution.

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer le débit :

- l'utilisation du principe de modification du régime d'écoulement, en provoquant un écoulement critique à l'aide d'un élément de mesure appelé « déversoir » ou « canal jaugeur »;
- la mesure du taux de dilution d'un traceur dont la concentration au point d'injection est connue;

- la méthode de type « capacité jaugée » qui consiste à déterminer le temps requis pour remplir un contenant dont le volume est connu;
- la relation $Q = AU$ utilise la section mouillée (A) et la vitesse moyenne (U).

Chacune de ces méthodes sera discutée en détails dans les sections suivantes.

2.7. Méthodes de mesure avec élément primaire

La mesure des débits en mode continu, dans le cas d'un écoulement libre, est effectuée au moyen d'une structure hydraulique qui permet d'établir une relation unique hauteur/débit. Ces structures hydrauliques sont appelées « éléments primaires de mesure » et peuvent être divisées en deux catégories, soit les canaux jaugeurs et les déversoirs.

Cette méthode, qui est la plus fréquemment utilisée, permet d'obtenir le débit par calcul, à partir de la seule mesure de la hauteur d'eau en amont de l'élément primaire.

Le choix d'un élément primaire de mesure de débit doit être évalué et conçu en tenant compte des éléments suivants :

- la connaissance précise des débits maximal et minimal susceptibles d'être canalisés à l'élément primaire. Ces débits doivent, selon l'élément primaire considéré, être compris à l'intérieur des limites recommandées au présent guide;
- la variation de la hauteur d'eau correspondant aux débits maximal et minimal, qui doit être le plus important possible, afin d'augmenter la précision de mesure, plus particulièrement lorsque les variations de débit sont faibles;
- la présence de solide et la possibilité d'obstruction;
- le respect des normes d'installation, les conditions d'approche à l'élément primaire et les pertes de charge occasionnées par la mise en place de l'élément;
- la facilité de l'étalonnage et de la vérification de l'équipement.

En pratique, l'utilisation de canaux est préférable à celle des déversoirs, en raison des avantages qu'ils présentent, soit les pertes de charge plus élevées et du facteur autonettoyant.

2.7.1. Canal de mesure

Les canaux de mesure sont généralement des éléments préfabriqués installés dans un système d'écoulement sur une base temporaire ou permanente.

Ils peuvent être de type à « fond plat ». Dans ce cas, c'est le profil des parois latérales qui crée la contraction de la veine liquide (ex. : canal tronqué). Ils peuvent également combiner des contractions à la fois verticales et latérales (ex. : canal Parshall).

2.7.1.1 Description générale

Un canal de mesure est essentiellement une section ouverte spécialement moulée qui provoque une restriction dans l'aire d'écoulement. Les canaux de mesure fonctionnent selon le principe du venturi. En diminuant l'aire d'écoulement, la vitesse augmente et la hauteur d'eau change⁽¹⁾.

Généralement un canal possède trois sections : la section convergente, l'étranglement et la section de dérive.

Les dimensions varient selon le type et la forme du canal. Dans la pratique, il est recommandé d'utiliser les courbes d'étalonnage fournies par les fabricants pour connaître le débit réel du canal.

2.7.1.2 Avantages

- Faibles pertes de charge.
- Permet de mesurer adéquatement une gamme importante de débit.
- La vitesse d'écoulement dans les canaux de mesure est généralement suffisamment élevée pour empêcher la sédimentation; ils sont donc autonettoyants.
- Donne une lecture fiable aussi bien en écoulement libre qu'en écoulement noyé.

2.7.1.3 Désavantages

- Installations généralement dispendieuses.
- La mise en place demande un travail soigné.
- Exige une base solide et étanche.
- L'écoulement à l'entrée doit être bien distribué avec peu de turbulence, afin d'obtenir des mesures précises.

2.7.2. Déversoirs

Le déversoir est l'une des plus simples et des plus anciennes structures utilisées pour la mesure du débit. Les parties importantes du déversoir peuvent être inspectées facilement, et toutes anomalies détectées et corrigées rapidement⁽²⁾.

2.7.2.1 Description générale

Un déversoir peut être défini comme étant une structure construite en travers d'un conduit ouvert, pour mesurer la quantité de liquide qui s'écoule.

Un déversoir à paroi mince est une plaque de 3 à 6 mm (1/8 à ¼ po) d'épaisseur ayant une bordure (arête) droite, ou une plaque épaisse ayant une bordure à angle de 45° servant à réduire l'épaisseur de l'arête aux dimensions précitées. Cette plaque est placée en travers de l'écoulement et force le liquide à passer par-dessus la plaque ou dans l'échancrure pratiquée dans celle-ci.

La bordure par-dessus laquelle l'eau s'écoule s'appelle l'**arête**.

La hauteur du déversoir entre l'arête et le fond du canal se nomme la **pelle**.

La hauteur de l'écoulement d'eau par-dessus l'arête se nomme la **nappe**.

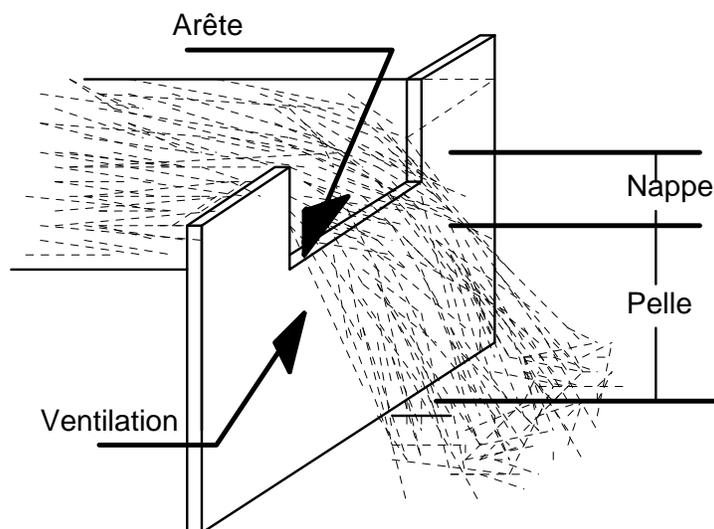
L'espace d'air situé sous la nappe, du côté aval du déversoir, se nomme la **ventilation**.

La Figure 1 - Déversoir - Composantes illustre les différentes composantes d'un déversoir.

Lorsque l'écoulement est suffisamment éloigné de la pelle pour qu'il y ait ventilation sous la nappe, l'écoulement est dit libre ou critique. Lorsque l'air ne peut passer librement sous la nappe, l'écoulement est dit fluvial. Une telle situation peut fausser la mesure puisque la pression en amont du déversoir n'est pas suffisante. En conséquence, la hauteur d'eau mesurée est trop grande et la vitesse est trop faible.

Généralement, le nom donné au déversoir découlera de la forme de l'échancrure du déversoir; ainsi une échancrure en forme de V sera un déversoir triangulaire, une échancrure en forme de |_| sera un déversoir rectangulaire, etc.

Figure 1 - Déversoir - Composantes



Le débit est déterminé en mesurant simplement la hauteur verticale, entre la base de l'échancrure (arête) et la surface de l'eau, à une distance déterminée en amont du déversoir, et en se servant de la formule de calcul ou de la table appropriée à la forme et à la dimension du déversoir.

Pour chaque type de déversoir, des formules empiriques et des tables de débits pour consultation rapide ont été conçues.

Les déversoirs sont des instruments de mesure fiables puisque, pour un déversoir de dimension et de forme spécifique, il existe en écoulement libre et stable une seule hauteur d'eau en amont pour un débit donné.

2.7.2.2 Avantages

- Permet une précision de l'ordre de 98 % en laboratoire. Pour obtenir ce genre de précision, il importe de respecter scrupuleusement toutes les dimensions recommandées lors de sa fabrication et de son installation.
- Peu coûteux à la fabrication.
- Permet la mesure d'une grande étendue de valeurs de débits.

2.7.2.3 Désavantages

- Importante perte de charge et refoulement en amont.
- Favorise le dépôt des solides en amont.
- Exige un entretien régulier et une vérification fréquente.

2.8. Système de mesure

Un système de mesure de débit comprend généralement deux composantes : l'élément primaire, tel que défini précédemment, et l'élément secondaire (ou débitmètre).

2.8.1. L'élément secondaire

Afin de pouvoir obtenir une valeur de débit à partir d'un élément primaire en place, il est nécessaire d'installer un second instrument que l'on nomme « élément secondaire ». Cet élément secondaire peut être des plus simples comme des plus sophistiqués.

Le plus simple est un indicateur de niveau à lecture ponctuelle, tel qu'un flotteur. La conversion de la hauteur en débit se fait à l'aide de la table hauteur/débit correspondant à l'élément primaire en place. Des instruments plus sophistiqués peuvent mesurer la hauteur, faire la conversion hauteur/débit, enregistrer en continu les valeurs et même les transmettre à distance.

2.9. Unités de mesure

Les unités de mesure les plus fréquemment employées sont :

gal _{US} /j	:	gallons américains par jour
gal _{US} /min	:	gallons américains par minute
gal _{UK} /j	:	gallons impériaux par jour
gal _{UK} /min	:	gallons impériaux par minute
m ³ /j	:	mètres cubes par jour
pi ³ /s	:	pieds cubes par seconde
l/min	:	litres par minute

Les unités suivantes sont également employées à l'occasion :

Mgal _{US} /j	:	millions de gallons américains par jour
gal _{US} /h	:	gallons américains à l'heure
gal _{US} /s	:	gallons américains par seconde
Mgal _{UK} /j	:	millions de gallons impériaux par jour
gal _{UK} /h	:	gallons impériaux à l'heure
gal _{UK} /s	:	gallons impériaux par seconde
m ³ /h	:	mètres cubes par heure
m ³ /min	:	mètres cubes par minute
l/h	:	litres par heure
l/s	:	litres par seconde

Il arrive parfois que des unités/jour soient utilisées pour exprimer des débits horaires.

Exemple : Le débit pour la période de 8 à 9 heures est de 42 000 m³/j. Pour obtenir le volume horaire réel, il faut diviser par 24; ainsi, les 42 000 m³/j deviennent 1 750 m³/h.

Dans le présent texte, sauf pour des cas très particuliers, les unités de mesure employées sont celles du système métrique.

2.10. Mesure de référence

L'installation d'un élément de mesure en conduit ouvert implique obligatoirement la mise en place d'un mode de mesure de référence. Cette référence de mesure est généralement une règle graduée en mètres ou en pieds, placée de façon permanente au point de mesure et elle sert à :

- étalonner l'élément secondaire (le débitmètre);
- obtenir une valeur ponctuelle de débit;
- vérifier facilement et rapidement et à comparer la valeur du débitmètre à la valeur de référence.

La valeur de référence est toujours considérée comme la valeur vraie.

2.11. Point de mesure

2.11.1. Emplacement

L'emplacement d'un point de mesure du débit des rejets liquides doit être déterminée en tenant compte des considérations suivantes :

- le nombre de points de mesure doit être minimal, compte tenu des coûts associés à sa construction et à son entretien;
- le point de mesure doit permettre la mesure du débit en continu de la totalité des rejets liquides;
- l'élément primaire doit permettre de mesurer les débits minimaux, moyens et maximaux;
- aucun raccordement ne doit être effectué en aval de la chambre de mesure;
- le site doit être accessible en toutes saisons.

2.11.2. Chambre de mesure

Les caractéristiques physiques de la chambre doivent permettre au personnel d'effectuer convenablement les travaux de mesure, d'entretien et de vérification nécessaires pour assurer la qualité des mesures. La chambre doit satisfaire à certaines exigences particulières :

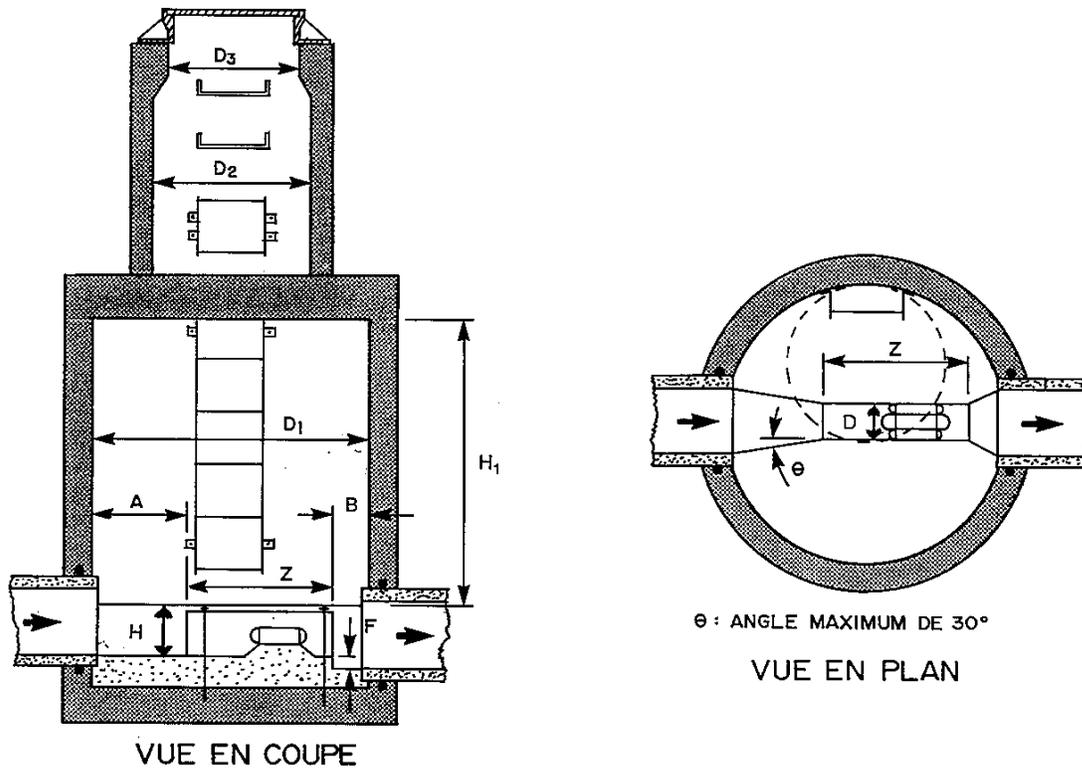
- selon les débits en présence et l'élément primaire installé, ses dimensions doivent permettre de vérifier chacune des sections de l'élément primaire et d'installer l'élément secondaire. L'espace requis pour l'installation temporaire ou permanente d'un échantillonneur automatique doit également être prévu;
- elle doit être équipée de systèmes d'éclairage et de chauffage adaptés aux exigences de ce type de construction;
- elle doit être équipée d'un système de ventilation pouvant être contrôlé à distance;
- si la chambre est localisée à une profondeur supérieure à 6 m, elle doit être équipée d'un palier de sécurité;
- le diamètre minimal du regard d'accès à la chambre doit être de 915 mm;
- le couvercle d'accès doit être d'un diamètre minimal de 750 mm, afin de permettre un accès facile au personnel et aux équipements;
- une échelle permettant l'accès à l'intérieur du regard doit être installée en permanence;
- les normes de sécurité en vigueur relativement à la construction et à l'accès aux endroits clos doivent être respectées.

La Figure 2 - Chambre type - Canal Palmer-Bowlus présente les principales composantes et caractéristiques physiques d'une chambre de mesure dont l'élément primaire est un canal Palmer-Bowlus. Aux fins de la présente démonstration, des regards préfabriqués en béton armé sont utilisés. On peut, si cela est plus opportun, construire cette chambre de mesure de forme carrée ou rectangulaire.

La Figure 3 - Chambre type - Canal Parshall présente les principales composantes et caractéristiques physiques d'une chambre de mesure dont l'élément primaire est un canal Parshall.

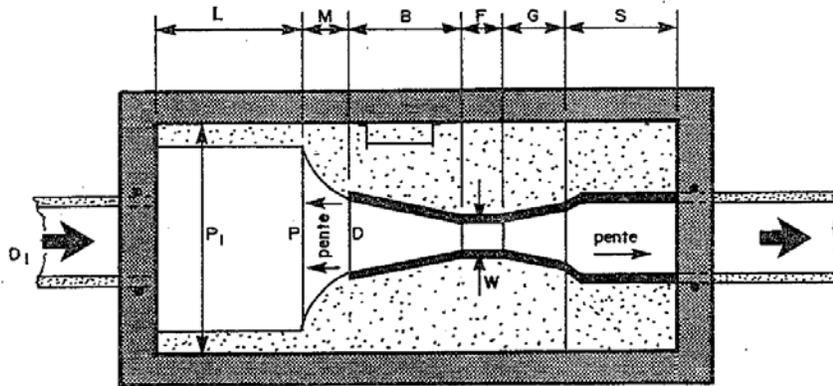
Les dimensions et les caractéristiques physiques des chambres de mesure présentées au Tableau 1 - Dimensions pour chambre type - Canal Palmer Bowlus et au Tableau 2 - Dimensions pour chambre type - Canal Parshall sont présentées à titre d'information, mais doivent être considérées comme moindres. L'évaluation des conditions particulières de l'écoulement permettra de déterminer les caractéristiques optimales.

Figure 2 - Chambre type - Canal Palmer-Bowlus



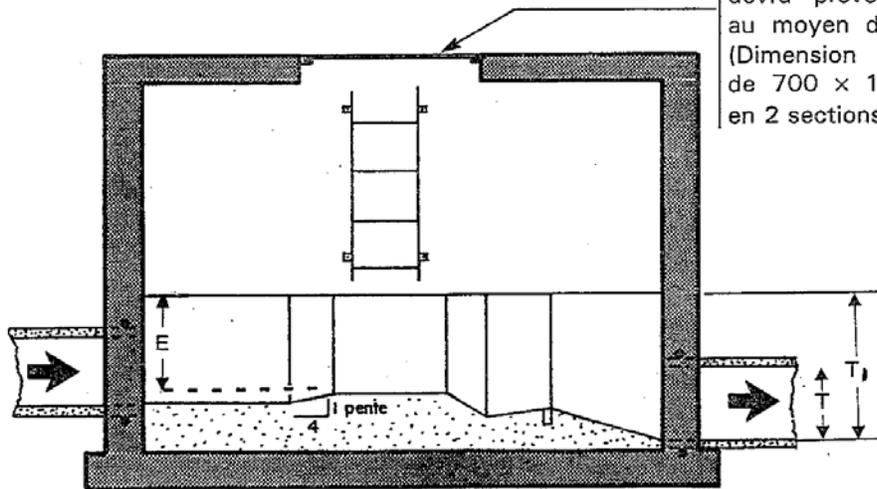
Note : Les dimensions correspondant aux lettres sont présentées au Tableau 1 - Dimensions pour chambre type - Canal Palmer Bowlus.

Figure 3 - Chambre type - Canal Parshall



VUE EN PLAN

Pour les chambres ne nécessitant pas de cheminée d'accès, on devra prévoir l'accès au moyen de trappes (Dimension minimale de 700 × 1400 mm) en 2 sections.



VUE EN COUPE

- Notes : - Les dimensions correspondant aux lettres indiquées sont présentées au tableau 2
 - D_1 = Diamètre de la conduite d'entrée

Tableau 1 - Dimensions pour chambre type - Canal Palmer Bowlus

Dimensions en millimètres et pouces

Diamètre (D) mm (po)	Dimensions minimales recommandées								
	H	Z	B	A*	F	D1	D2	D3	H1
102 mm 4 (po)	152 6	432 17	102 4	686 27	51 2	1219 48	914 36	762 30	1219 48
152 mm 6 (po)	203 8	635 25	152 6	813 32	76 3	1600 63	914 36	762 30	1219 48
203 mm 8 (po)	254 10	839 33	203 8	813 32	76 3	1600 63	914 36	762 30	219 48
254 mm 10 (po)	305 12	1042 41	254 10	839 33	76 3	2135 84	914 36	762 30	1524 60
305 mm 12 (po)	355 14	1244 49	305 12	889 35	76 3	2440 96	914 36	762 30	1828 72
381 mm 15 (po)	432 17	1549 61	381 15	965 38	76 3	2895 114	914 36	762 30	1828 72
457 mm 18 (po)	508 20	1854 73	457 18	1041 41	76 3	3352 132	914 36	762 30	1981 78
533 mm 21 (po)	584 23	2159 85	533 21	1117 44	76 3	3810 150	914 36	762 30	2100 84
610 mm 24 (po)	660 26	2463 97	610 24	1346 53	101 4	4419 174	914 36	762 30	2286 90
686 mm 27 (po)	736 29	2768 109	686 27	1422 56	101 4	4876 192	914 36	762 30	2591 102
762 mm 30 (po)	812 32	3099 122	762 30	1625 64	101 4	5486 216	914 36	762 30	2591 102
914 mm 36 (po)	965 38	3683 145	914 36	1955 77	101 4	6553 258	914 36	762 30	2895 114
1067 mm 42 (po)	1117 44	4292 169	1067 42	2260 89	152 6	7620 300	914 36	762 30	3048 120
1219 mm 48 (po)	1270 50	4902 193	1219 48	2565 101	152 6	8686 342	914 36	762 30	3200 126
1372 mm 54 (po)	1422 56	5511 217	1372 54	2870 113	152 6	9753 384	914 36	762 30	3352 132
1524 mm 60 (po)	1574 62	6121 241	1524 60	3175 125	152 6	10820 426	914 36	762 30	3505 138

* La distance minimale devra toujours être supérieure à 2 fois le diamètre de la conduite d'entrée.

Tableau 2 - Dimensions pour chambre type - Canal Parshall
Dimensions en millimètres et pouces (ou pieds)

W	L	D	M	B	E	F	G	S	P	P1	T	T1
25 1"	305 12"	168 6 19/32	---	356 12"	229 9"	76 3"	203 8"	305 12"	168 6 19/32"	914 36"	248 9 3/4"	257 10 1/8"
51 2"	457 18"	214 8 13/32	---	406 14"	305 12"	114 4 1/2"	254 10"	457 18"	214 8 13/32"	914 36"	327 12 7/8"	348 13 11/16"
76 3"	610 24"	259 10 3/16	---	457 16"	610 24"	152 6"	305 1'	610 24"	259 10 3/16"	914 36"	635 25"	667 26 1/4"
152 6"	914 36"	397 1' 3 5/8"	305 1'	610 2'	610 24"	305 1'	610 2'	610 24"	902 2' 11 1/2"	914 36"	686 27"	724 28 1/2"
229 9"	1372 54"	575 1' 10 5/8"	305 1'	864 2'10"	762 30"	305 1'	457 1'6"	762 30"	1080 3' 6 1/2"	1219 4'	838 33"	876 34 1/2"
305 12"	1829 6'	845 2' 9 1/4"	381 1'3"	1343 4' 4 7/8"	914 3'	610 2'	914 3'	914 36"	1492 4' 10 3/4"	1524 5'	991 3'3"	1143 45"
457 18"	2438 8'	1026 3' 4 3/8"	381 1'3"	1419 4' 7 7/8"	914 3'	610 2'	914 3'	1067 42"	1676 5' 6"	1829 6'	991 3'3"	1143 45"
610 24"	2438 8'	1207 3' 11 1/2"	381 1'3"	1495 4' 10 7/8"	914 3'	610 2'	914 3'	1067 42"	1854 6' 1"	2134 7'	991 3'3"	1143 45"
914 3'	3048 10'	1572 5' 1 7/8"	381 1'3"	1645 5' 4 3/4"	914 3'	610 2'	914 3'	1219 4'	2223 7' 3 1/2"	2438 8'	991 3'3"	1143 45"
1219 4'	3658 12'	1632 6' 4 1/4"	457 1'6"	1794 5' 10 5/8"	914 3'	610 2'	914 3'	1524 5'	2712 8' 10 3/4"	2769 9'	991 3'3"	1143 45"
1524 5'	4572 15'	1997 7' 6 5/8"	457 1'6"	1943 6' 4 1/2"	914 3'	610 2'	914 3'	1524 5'	3080 10' 1 1/4"	3353 11'	991 3'3"	1143 45"
1829 6'	4572 15'	2667 8' 9"	457 1'6"	2092 6' 10 3/8"	914 3'	610 2'	914 3'	1829 6'	3442 11' 3 1/2"	3657 12'	991 3'3"	1143 45"
2134 7'	4877 16'	3032 9' 11 3/8"	457 1'6"	2242 7' 4 1/4"	914 3'	610 2'	914 3'	1829 6'	3810 12' 6"	3962 13'	991 3'3"	1143 45"
2438 8'	5486 18'	3397 11' 1 3/4"	457 1'6"	2391 7' 10 1/8"	914 3'	610 2'	914 3'	2134 7'	4172 13' 8 1/4"	4267 14'	991 3'3"	1143 45"
3048 10'	6401 21'	4756 15' 7 1/4"	---	4267 14'	1219 4'	914 3'	1829 6'	2134 7'	---	4877 16'	1372 4' 6"	1562 5' 1 1/2"
3658 12'	7315 24'	5607 18' 4 3/4"	---	4877 16'	1524 5'	914 3'	2438 8'	2438 8'	---	6096 20'	1676 5' 6"	1867 6' 1 1/2"
4572 15'	9144 30'	7625 25'	---	7625 25'	1829 6'	1219 4'	3048 10'	2438 8'	---	7625 25'	2057 6' 9"	2286 7' 6"
6096 20'	11582 38'	9144 30'	---	7625 25'	2134 7'	1829 6'	3658 12'	2769 9'	---	9144 30'	2438 8'	2819 9' 3"
7625 25'	13716 45'	10668 35'	---	7625 25'	2134 7'	1829 6'	3962 13'	2769 9'	---	10668 35'	2438 8'	2819 9' 3"
9144 30'	14630 48'	12312 40' 4 3/4"	---	7925 26'	2134 7'	1829 6'	4267 14'	3048 10'	---	12802 42'	2438 8'	2819 9' 3"
12192 40'	16459 54'	15481 50' 9 1/2"	---	8230 27'	2134 7'	1829 6'	4877 16'	3048 10'	---	15850 52'	2438 8'	2819 9' 3"
15240 50'	18898 62'	18529 60' 9 1/2"	---	8230 27'	2134 7'	1829 6'	6096 20'	3353 11'	---	18898 62'	2438 8'	2819 9' 3"

2.12. Choix d'une méthode de mesure

2.12.1. Critères de choix

Pour mesurer précisément le débit d'un effluent, il convient de choisir la méthode la plus appropriée. Le grand nombre de méthodes disponibles pour la mesure du débit en conduit ouvert peut rendre le choix difficile. Pour orienter son choix, il faut donc définir ses besoins, évaluer les moyens disponibles et examiner les compromis possibles.

Il est nécessaire d'apprécier les critères suivants ⁽³⁾ :

- la présence de solides dans l'eau;
- la précision désirée et la précision possible avec différentes méthodes;
- le débit maximal à mesurer (Q_{\max});
- l'amplitude de mesure (Q_{\max}/Q_{\min});
- la tolérance aux variations de débit;
- la largeur du canal;
- les pertes de charge admissibles et résultantes des différentes méthodes;
- la fidélité et la fiabilité requises;
- le besoin de relier l'appareil de mesure à un système de saisie et de traitement de l'information;
- la précision acceptable produite par l'appareil de mesure en place;
- la sensibilité de l'appareil aux variations de débit;
- les coûts d'installation et d'entretien.

2.12.2. La présence de solides

Les effluents contiennent des solides en suspension de toutes natures, de toutes formes et dans des proportions très variables. Ces solides ont tendance à se déposer en amont de l'élément de mesure, à coller aux parois, à s'entremêler et à s'accrocher aux structures.

Les dépôts en amont peuvent obstruer l'écoulement ou modifier les vitesses d'approche, alors que l'adhésion aux parois de l'élément de mesure fausse la géométrie et les dimensions originales. Les valeurs mesurées avec de tels équipements sont erronées. C'est principalement le cas des déversoirs de mesure.

Par contre, certains éléments primaires de mesure sont peu affectés par la présence de solides en suspension, en particulier les canaux de mesure, puisqu'ils ont des parois lisses et un fond assez plat.

2.12.3. Débit maximal

Avant d'arrêter son choix sur une méthode de mesure quelconque, il est essentiel de contrôler l'ordre de grandeur du débit à mesurer. Cette information peut être obtenue de plusieurs façons :

- une bonne connaissance de l'entreprise (procédé, utilisation de l'eau, réseaux d'égout, etc.);
- une mesure de la consommation d'eau d'alimentation;
- la relation entre la consommation d'eau et le taux de fabrication pour un établissement similaire;
- la capacité de la conduite d'alimentation;
- une évaluation visuelle du débit de l'effluent par une personne d'expérience;
- une mesure instantanée du débit de l'effluent (ex. : hauteur/vitesse);
- la détermination du diamètre et de la pente approximative des conduits d'égout, indice de la capacité maximale du réseau.

Lorsque les activités de l'usine sont susceptibles de provoquer des variations importantes de débit et que le seul indice de débit disponible est une valeur de débit moyen, il est recommandé de majorer cette valeur de débit par un facteur de 2,5 pour établir le débit maximal à mesurer, afin de tenir compte des périodes de pointe.

2.12.4. Tolérance aux variations de débit

Une bonne installation de mesure doit conserver la même précision lors de variations du débit. Il importe donc de vérifier le comportement des installations lorsque surviennent ces variations.

Dans la section de contrôle de l'élément de mesure, une diminution ou une augmentation du débit ne doit pas engendrer de turbulence et faire varier la vitesse d'écoulement. Elle doit plutôt se traduire essentiellement par une variation de la hauteur d'eau dans l'élément primaire.

2.12.5. Largeur du canal de mesure

Si la dimension du canal d'écoulement est trop large ou trop étroite, il faut évaluer la possibilité de restreindre ou d'agrandir l'aire d'écoulement afin d'y installer l'équipement de mesure et de l'opérer adéquatement.

Règle générale, la largeur minimale du canal d'écoulement doit être égale à celle de l'élément de mesure et la largeur maximale, égale à la largeur de l'élément de mesure plus 10 m. La Figure 4 - Canal de mesure - Arrangement du canal de mesure au canal d'écoulement illustre ce type d'arrangement.

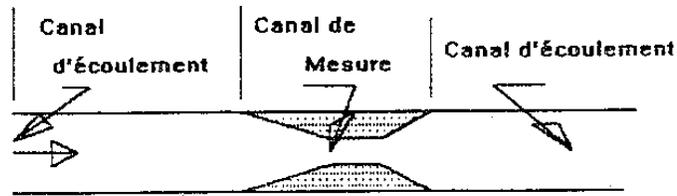
2.12.6. Pertes de charge

Avant de procéder à l'installation d'un élément de mesure, il importe de vérifier la perte de charge admissible.

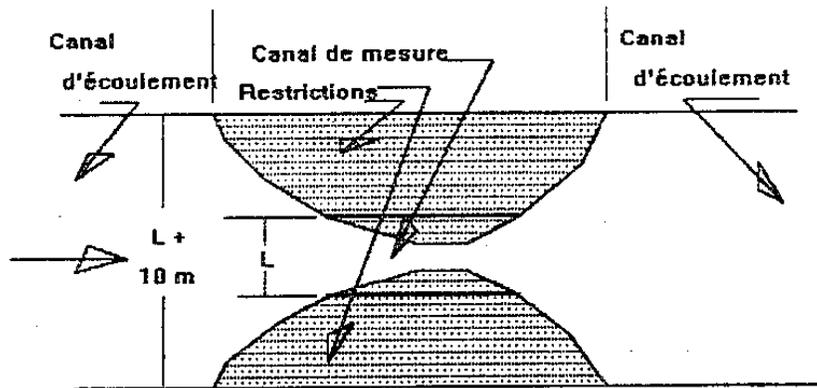
Les différentes méthodes de mesure occasionnent des pertes de charge diverses. Pour un même appareil de mesure, la perte de charge maximale correspond au débit maximal.

La perte de charge pour les canaux de mesure est généralement inférieure à celle provoquée par les déversoirs. Une différence de l'ordre de 30 % est observée.

Figure 4 - Canal de mesure - Arrangement du canal de mesure au canal d'écoulement



Situation où la largeur minimale du canal d'écoulement est égale à la largeur du canal de mesure.



Situation où la largeur maximale du canal d'écoulement est égale à la largeur du canal de mesure plus 10 mètres.

2.12.7. La précision

Il importe de ne pas chercher à obtenir un degré de précision trop élevé. Des mesures dont l'erreur est inférieure à 1 % peuvent s'avérer irréalisables et souvent très onéreuses, alors qu'une erreur de 3 % à 5 %, même 10 % est fort acceptable pour la grande majorité des cas ⁽³⁾.

Dans les conditions normales d'utilisation, avec une installation rigoureusement conforme et réalisée par un personnel compétent, la majorité des méthodes de mesure fourniront une erreur inférieure à 10 %.

2.12.8. Amplitude de la mesure

Lors de la sélection de la méthode de mesure, il importe d'examiner le rapport entre le débit maximal et le débit minimal, afin de choisir l'appareil qui provoque un différentiel optimal de la hauteur d'eau.

Il faut aussi s'assurer que la méthode retenue permet de mesurer avec la même précision toute la gamme des valeurs de débit susceptibles de se présenter.

Le Tableau 3 - Abaque pour comparer la capacité de mesure des différents éléments primaires présente un abaque permettant de comparer rapidement les nombreux dispositifs disponibles et de choisir ceux qui conviennent le mieux à la situation. Plusieurs publications présentent de tels abaques⁽⁴⁾.

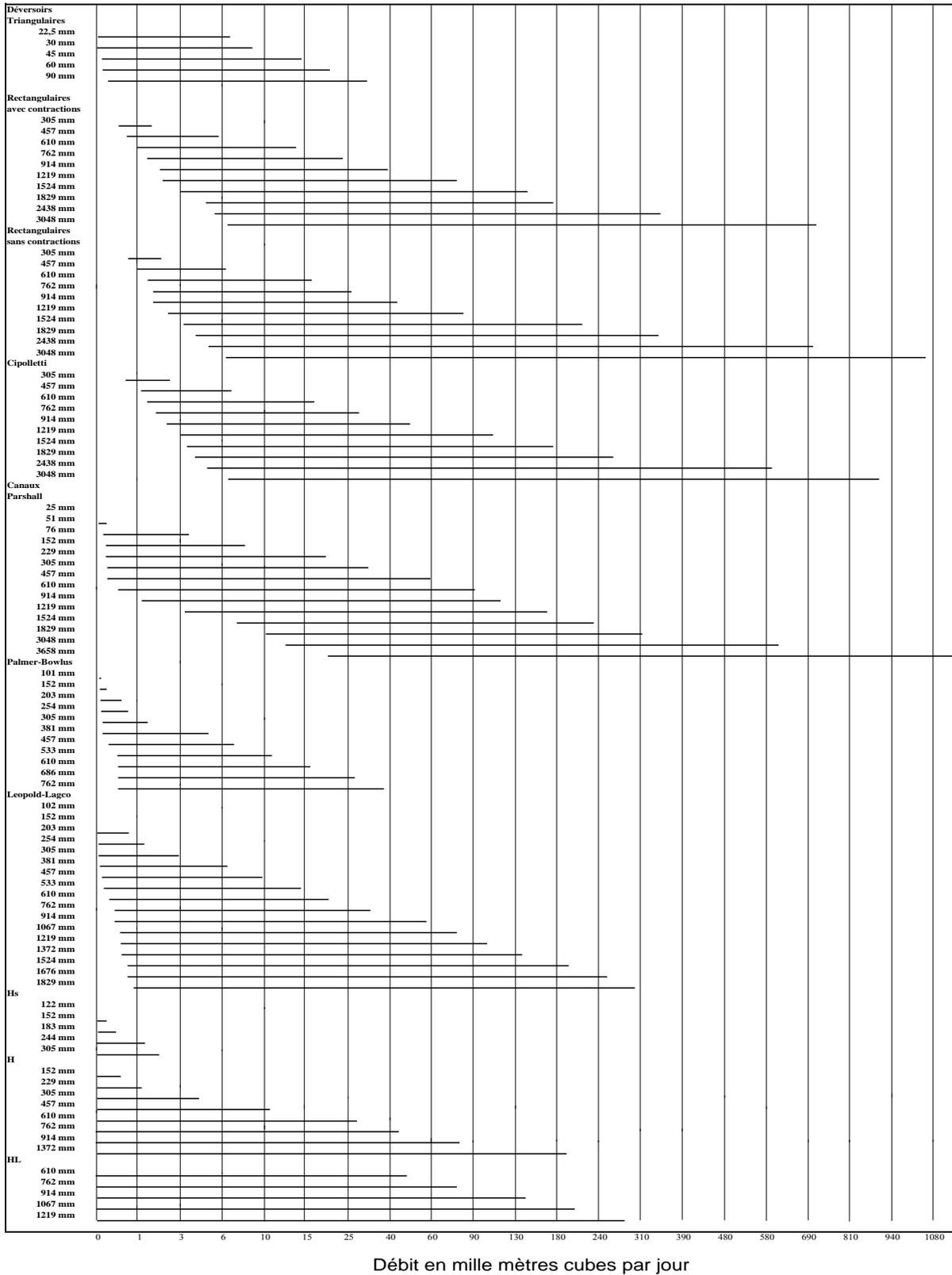
2.12.9. Chiffres significatifs

Bien que la précision soit nécessaire dans la compilation des données recueillies, celle-ci ne doit pas être estimée avec un nombre de chiffres significatifs supérieur à ce qui est permis par l'instrument le moins précis. Le faire implique une précision qui n'existe pas et peut, le cas échéant, mener à confusion⁽²⁾.

Règle générale, dans le calcul impliquant une multiplication ou une division avec des nombres provenant d'observations, le résultat doit contenir le même nombre de chiffres que celui contenu dans la valeur observée qui en a le moins.

L'application de cette règle sous-entend que le dernier chiffre ne représente pas nécessairement une valeur mais plutôt une valeur plus probable.

Tableau 3 - Abaque pour comparer la capacité de mesure des différents éléments primaires



2.12.10. Fidélité et fiabilité

La fidélité, pour un instrument de mesure, est la capacité de donner toujours le même résultat lorsqu'il est utilisé dans les mêmes conditions. La fiabilité est la capacité d'un instrument de fonctionner sans défaillance, dans des conditions déterminées et pour une période de temps définie.

Il est essentiel que les informations recueillies soient exactes et que les variations de mesure soient attribuables au procédé industriel et non aux appareils. Ce critère est d'autant plus important que le contrôle des appareils est souvent centralisé et que l'opérateur ne peut vérifier sur-le-champ leur bon fonctionnement. Le délai entre la vérification visuelle et l'enregistrement de la lecture soulève souvent des interrogations lors de l'interprétation des résultats.

2.12.11. Particularités d'installation

Il est préférable de fabriquer une installation conforme, plutôt que d'essayer d'estimer les effets de conditions non conformes et de tenter de corriger les valeurs obtenues dans ces conditions.

Les éléments primaires de mesure doivent être localisés dans une section droite de l'écoulement et doivent être parfaitement alignés avec le sens de l'écoulement.

Les canaux et déversoirs doivent être placés de niveau dans tous leurs axes : longitudinal et transversal, c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement, et être perpendiculaire à celui-ci. Dans la section d'approche, il ne devrait y avoir de branchement, de courbe, de chute ou changement rapide du radier.

Pour éviter la formation d'un écoulement noyé, causé par un refoulement d'eau, la capacité du conduit d'évacuation devrait être suffisante pour permettre une évacuation immédiate de l'eau, et ce, au débit le plus élevé.

Il est recommandé d'installer des éléments primaires de mesure munis de puits de stabilisation. Ces puits sont reliés à l'élément de mesure à l'aide de conduits de faibles diamètres. Ceux-ci doivent être positionnés aux endroits où se font les mesures de la hauteur d'eau dans le canal. Les dimensions des puits et des conduits doivent correspondre aux normes prescrites au Tableau 4 - Dimensions pour les puits de stabilisation.

La dimension des puits doit être suffisante pour permettre l'installation et l'opération sans interférence du détecteur de niveau du débitmètre et le nettoyage du puits.

Une mesure de référence (règle) doit être placée en permanence au point de mesure.

Tableau 4 - Dimensions pour les puits de stabilisation

Diamètre du puits de stabilisation		Diamètre du conduit	
mm	po	mm	po
203	8	12,70	1/2
254	10	12,70	1/2
305	12	12,70	1/2
406	16	12,70	1/2
508	20	15,90	5/8
610	24	19,00	3/4
762	30	31,80	1 1/4

2.12.12. Entretien

Bien que certains types de canal soient conçus pour laisser passer les solides, des débris lourds peuvent se déposer et provoquer des erreurs de mesure. Pour tous les éléments primaires de mesure, il est recommandé de procéder à une inspection périodique. Les points à vérifier et les travaux à effectuer, le cas échéant, sont :

- la présence de solides ou de débris;
- les niveaux longitudinal et transversal;
- la présence de fissures dans la structure;
- le nettoyage du puits de stabilisation et du conduit de raccordement;
- l'étalonnage du détecteur du niveau d'eau.

2.12.13. Étalonnage

L'étalonnage d'un élément primaire peut être requis lorsque :

- l'installation n'est pas conforme aux normes indiquées au présent guide;
- une détérioration importante des installations est notée.

L'étalonnage consiste à déterminer, pour différents degrés d'écoulement, la relation entre le débit et la hauteur d'eau mesurée dans l'élément primaire. Cela permet d'établir une nouvelle relation empirique hauteur/débit pour toute la place des flux de liquides susceptibles d'être mesurés par l'élément.

Puisqu'un élément de mesure fournit, dans des conditions rigoureuses d'installation, une variation de l'ordre de 5 %, il peut être difficile de trouver une méthode suffisamment précise et exacte pour réaliser l'étalonnage. En principe, la méthode utilisée devrait avoir un biais nul. En pratique, il est plus réaliste de tolérer un biais inférieur à 1 % ou 2 %. Quant à la précision (qui peut s'améliorer par la répétition des mesures), celle-ci devrait être de l'ordre de 95 %. La section 6 porte sur l'exactitude et la précision des différentes méthodes. Il appartient à l'utilisateur de démontrer que la ou les méthodes utilisées satisfont aux objectifs d'exactitude et de précision précités ou à tout autre objectif stipulé par l'administration publique ou par règlement.

En général, la méthode volumétrique est utilisée seulement si les conditions suivantes peuvent être respectées ⁽⁵⁾ :

- Un réservoir de forme régulière, dont la capacité à différents niveaux peut être mesurée avec une précision de 99 %, est disponible.
- La hauteur d'eau dans l'élément primaire au point de mesure, pour chacun des essais, est stable. Les limites de variation permises sont indiquées dans la description de chaque élément primaire.
- Le temps de remplissage du réservoir jaugeur est supérieur à 90 secondes.

La méthode par dilution qui utilise un sel ou un traceur chimique est employée lorsque :

- l'élément primaire de mesure est de trop grande dimension pour utiliser la méthode volumétrique;
- la hauteur d'eau dans l'élément primaire au point de mesure est stable, pour chacun des essais. Les limites de variation permises sont indiquées dans la description de chaque élément primaire;
- il n'y a pas de réservoir de forme régulière, dont la capacité à différents niveaux puisse être étalonnée précisément.

Lors de l'étalonnage de l'élément primaire, tous les renseignements pertinents à son installation et à son état doivent être consignés. La procédure d'étalonnage et la méthode de mesure de la hauteur d'eau et du débit qui en découle doivent être décrites en détail. Ces renseignements doivent être conservés comme documents de référence, durant toute la période d'utilisation de l'élément primaire.

3. Description des canaux de mesure

Les sections suivantes traitent des canaux de mesure susceptibles d'être rencontrés sur les sites permanents et temporaires de contrôle.

3.1. Canal parshall

Le canal Parshall a été conçu vers la fin des années vingt pour mesurer le débit des eaux d'irrigation. De nos jours, ce canal est souvent employé pour la mesure du débit des eaux usées, soit pour des installations permanentes soit pour des installations temporaires⁽²⁾.

3.1.1. Description

Le canal Parshall comprend une section convergente, une section de contrôle et une section de dérive⁽⁶⁾.

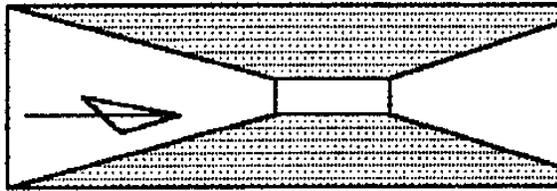
Le radier de la section de contrôle est incliné vers l'aval. C'est donc dire qu'il y a une arête entre le radier horizontal de la section convergente et le radier de la section de contrôle.

Pour les canaux de moins de 2,44 m (8 pi), l'entrée de la section convergente peut être arrondie, alors que pour les canaux de plus grande taille, elle peut présenter des parois verticales orientées à 45° de l'axe.

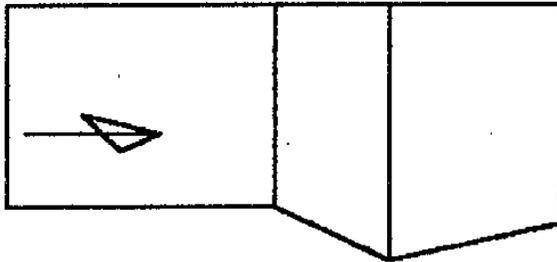
Afin de prévenir l'érosion provoquée par la chute d'eau, la dérive sera généralement prolongée au moyen de parois verticales, et l'angle d'orientation de ces parois sera supérieur à celui des parois de la dérive (voir Figure 5 - Canal Parshall - Illustration du canal et Figure 8 - Canal Parshall - Union des sections d'approche et de convergence).

Ces canaux ont été normalisés pour des largeurs allant de 25 mm (1 po) jusqu'à 15,2 m (50 pi). Les dimensions standardisées en millimètres et en pouces sont : 25 (1), 51 (2), 76 (3), 152 (6), 229 (9), 305 (12), 457 (18), 610 (24), 914 (36), 1 219 (48), 1 524 (60), 1 829 (72), 2 134 (84), 2 438 (96), 3 048 (120), 3 658 (144), 4 572 (180), 6 096 (240), 7 620 (300), 9 144 (360), 12 192 (480) et 15 240 (600) mm (po). Ce type de canal est illustré à la Figure 5 - Canal Parshall - Illustration du canal.

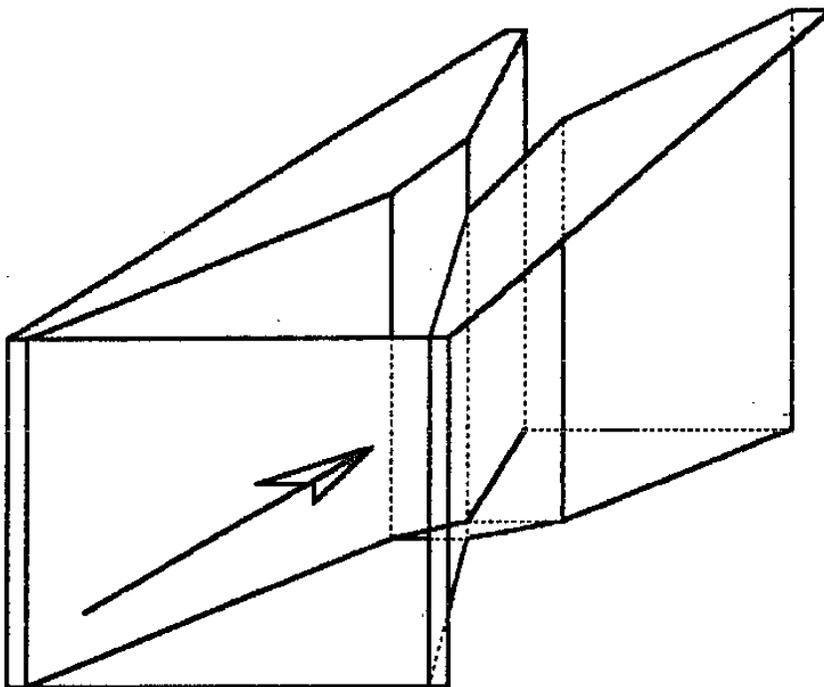
Figure 5 - Canal Parshall - Illustration du canal



Vue en plan



Vue de profil



Vue isométrique

3.1.2. Principe de fonctionnement

Le canal Parshall fonctionne selon le principe du venturi. En raison de ses restrictions latérales, le canal restreint l'aire d'écoulement, ce qui provoque un rehaussement du niveau d'eau en amont de la section de contrôle. La chute soudaine et importante du niveau d'eau dans la section de contrôle est accompagnée d'une augmentation de la vitesse d'écoulement.

Le débit peut être obtenu en mesurant simplement la hauteur d'eau, puisqu'il est établi que la hauteur varie proportionnellement avec le débit.

Bien qu'il soit possible d'utiliser ce canal en écoulement noyé, il est fortement recommandé de l'utiliser en écoulement libre. En écoulement libre, la mesure du débit peut être obtenue avec un seul point de mesure, alors qu'en écoulement noyé, il est nécessaire de mesurer également la hauteur en aval de la section de contrôle.

3.1.3. Applications

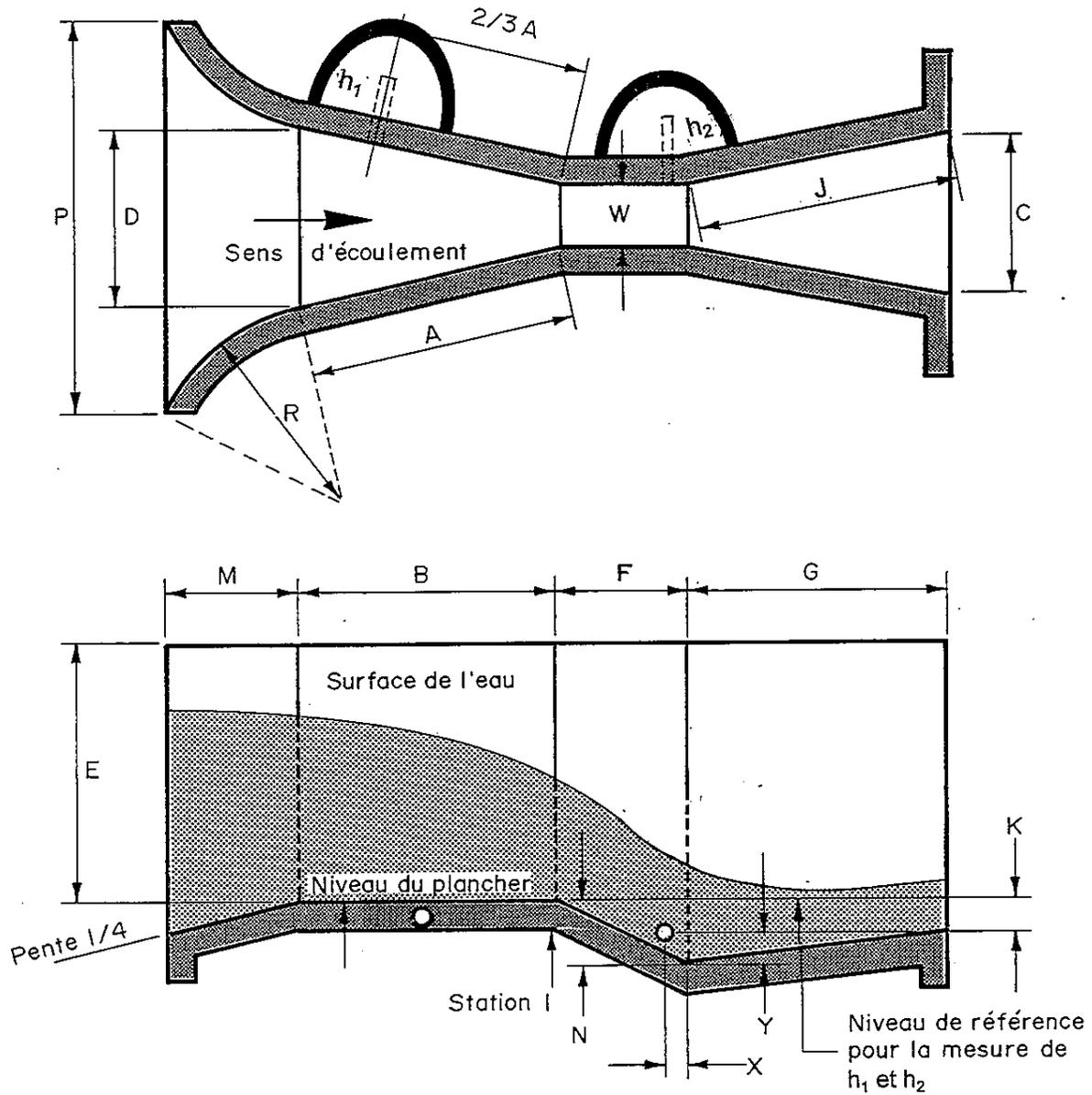
Bien qu'il fut développé pour mesurer le débit dans des canaux ouverts naturels tels les rivières, ruisseaux, fossés de drainage, etc., le canal Parshall est de plus en plus utilisé pour la mesure de débit dans des conduits ouverts fabriqués, tels que les réseaux pluvial et domestique, la sortie ou l'entrée d'usines de traitement, etc.

Par sa géométrie et son principe fonctionnement, le canal Parshall est un très bon outil pour mesurer le débit des eaux contenant des solides. De plus, comme il offre une faible perte de charge, il est assez facile à adapter aux réseaux d'égout existants.

3.1.4. Dimensions

Les dimensions d'un canal Parshall sont définies par la largeur de l'étranglement. La Figure 6 - Canal Parshall - Caractéristiques physiques et d'écoulement présente les caractéristiques physiques du canal Parshall et le Tableau 5 - Canal Parshall – Dimensions normalisées, ses dimensions normalisées.

Figure 6 - Canal Parshall - Caractéristiques physiques et d'écoulement



Pour les dimensions normalisées, se référer au Tableau 5.

Tableau 5 - Canal Parshall – Dimensions normalisées

DIMENSIONS en mm et (pieds et pouces)

W	A	2/3A	B	C	D	E	F	G	H	K	M	N	P	R	X	Y
25 ± 0,4 1" ± 1/64"	363 1' 2-9/32"	242 9-17/32 "	356 1' 2"	93 3-21/32"	168 6-19/32"	152 à 229 6" à 9"	76 3"	203 8"	206 8-1/8"	19 3/4"		29 1-1/8 "			8 5/16"	13 1/2"
51 ± 0,4 2" ± 1/64"	414 1'4-5/16"	109 10-7/8	406 1' 4"	135 5-5/16"	214 8-13/32"	152 à 254 6" à 10"	114 4-1/2"	254 10"	257 10-1/8"	22 7/8"		43 1-11/16 "			16 5/8"	25 1"
76 ± 0,4 3" ± 1/64"	467 1'6-3/8"	311 1' 1/4"	457 1' 6"	178 7"	259 10-3/16"	304,8 à 457 1' à 1-1/2"	152 6"	305 1'	309 1' 5/32"	25 1"		57 2-1/4 "			25 1"	38 1-1/2"
152 ± 0,8 6" ± 1/32"	621 2' 7/16"	414 1' 4-5/16"	610 2'	394 1' 3-1/2"	397 1' 3-5/8"	610 2'	305 1'	610 2'	----	76 3"	305 1'	114 4-1/2 "	902 2' 11-1/2"	406 1' 4"	51 2"	76 3"
229 ± 0,8 9" ± 1/32"	880 2' 10-5/8"	587 1' 11-1/8"	864 2' 10"	381 1' 3"	575 1' 10-5/8"	762 2' 6"	305 1' 1'	457 1' 6"	----	76 3"	305 1'	114 4-1/2 "	1080 3' 6-1/2"	406 1' 4"	51 2"	76 3"
305 ± 0,8 12" ± 1/32"	1372 4' 6"	914 3'	1343 4' 4-7/8"	610 2'	845 2' 9-1/4"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	381 1' 3"	229 9"	1492 4' 10-3/4"	508 1' 8"	51 2"	76 3"
457 ± 0,8 18" ± 1/32"	1448 4' 9"	965 3' 2"	1419 4' 7-7/8"	762 2' 6"	1026 3' 4-3/8"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	381 1' 3"	229 9"	1676 5' 6"	508 1' 8"	51 2"	76 3"
610 ± 0,8 2' ± 1/32"	1524 5'	1016 3' 4"	1495 4' 10-7/8"	914 3'	1207 3' 11-1/2"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	381 1' 3"	229 9"	1854 6' 1"	508 1' 8"	51 2"	76 3"
914 ± 0,8 3' ± 1/32"	1676 5' 6"	1118 3' 8"	1645 5' 4-3/4"	1219 4'	1572 5' 1-7/8"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	381 1' 3"	229 9"	2223 7' 3-1/2"	508 1' 8"	51 2"	76 3"
1219 ± 0,8 4' ± 1/32"	1829 6'	1219 4'	1794 5' 10-5/8"	1524 5'	1937 6' 4-1/4"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	457 1' 6"	229 9"	2712 8' 10-3/4"	610 2'	51 2"	76 3"
1524 ± 0,8 5' ± 1/32"	1981 6' 6"	1321 4' 4"	1943 6' 4-1/2"	1829 6'	2302 7' 6-5/8"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	457 1' 6"	229 9"	3080 10' 1-1/4"	610 2'	51 2"	76 3"
1829 ± 0,8 6' ± 1/32"	2134 7'	1422 4' 8"	2092 6' 10-3/8"	2134 7'	2667 8' 9"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	457 1' 6"	229 9"	3442 11' 3-1/2"	610 2'	51 2"	76 3"
2134 ± 0,8 7' ± 1/32"	2286 7' 6"	1524 5'	2242 7' 4-1/4"	2438 8'	3032 9' 11-3/8"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	457 1' 6"	229 9"	3810 12' 6"	610 2'	51 2"	76 3"
2438 ± 0,8 8' ± 1/32"	2438 8'	1626 5' 4"	2391 7' 10-1/8"	2769 9'	3397 11' 1-3/4"	914 3'	610 2'	914 3'	----	76 3"	457 1' 6"	229 9"	4172 13' 8-1/4"	610 2'	51 2"	76 3"
3048 ± 0,8 10' ± 1/32"		1829 6'	4267 14'	3658 12'	4756 15' 7-1/4"	1219 4'	914 3'	1829 6'	----	152 6"		343 1' 1-1/2"			51 2"	305 1'
3658 ± 0,8 12' ± 1/32"		2032 6' 8"	4877 16'	4470 14' 8"	5607 18' 4-3/4"	1524 5'	914 3'	2438 8'	----	152 6"		343 1' 1-1/2"			229 9"	305 1'
4572 ± 0,8 15' ± 1/32"		2337 7' 8"	7620 25'	5588 18' 4"	7620 25'	1829 6'	4' 1219	3048 10'	----	229 9"		457 1' 6"			229 9"	305 1'
6096 ± 0,8 20' ± 1/32"		2845 9' 4"	7620 25'	7315 24'	9144 30'	2134 7'	1829 6'	3658 12'	----	305 1'		686 2' 3 "			229 9"	305 1'
7620 ± 0,8 25' ± 1/32"		3353 11'	7620 25'	8941 29' 4"	10668 35'	2134 7'	1829 6'	3962 13'	----	305 1'		686 2' 3 "			229 9"	305 1'
9144 ± 0,8 30' ± 1/32"		3861 12' 8"	26' 7925	10566 34' 8"	12313 40' 4-3/4"	2134 7'	1829 6'	4267 14'	----	305 1'		686 2' 3 "			229 9"	305 1'
12192 ± 0,8 40' ± 1/32"		4877 16'	8230 27'	13818 45' 4"	15481 50' 9-1/2"	2134 7'	1829 6'	4877 16'	----	305 1'		686 2' 3 "			229 9"	305 1'
15240 ± 0,8 50' ± 1/32"		5893 19' 4"	8230 27'	17272 56' 8"	18529 60' 9-1/2"	2134 7'	1829 6'	6096 20'	----	305 1'		686 2' 3 "			229 9"	305 1'

Il importe de respecter rigoureusement les dimensions standard si l'on veut utiliser les tables empiriques établies et obtenir des mesures précises.

3.1.5. Gamme de mesures

Les canaux Parshall peuvent mesurer des débits variant entre 70,7 m³ par jour pour un canal de 76 mm (3 po) jusqu'à 8 038 656 m³ par jour pour un canal de 15,24 m (50 pi). Le Tableau 6 - Canal Parshall - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre présente les débits minimal et maximal recommandés pour un canal Parshall en écoulement libre pour différentes dimensions. Pour les fins de ce document, seules les données s'appliquant aux canaux dont les dimensions se situent entre 76 mm (3 po) et 36,57 m (12 pi), ont été retenues.

3.1.6. Équation de débit en écoulement libre

L'équation de débit résultant de la hauteur/débit, associé à un écoulement libre, s'exprime comme suit :⁽⁸⁾

$$Q = KH^n \quad (9)$$

où :

- Q est le débit, dont la valeur est fonction de l'unité de mesure choisie (Tableau 7);
- H est la hauteur d'eau mesurée au point h₁, en pieds ou en mètres;
- K est la constante, fonction de la dimension de l'étranglement et de l'unité de mesure choisie (Tableau 7);
- n est la constante de l'exposant, dont la valeur est fonction de la dimension de l'étranglement, (sans unité).

Le Tableau 7 - Canal Parshall - Équations de débit en écoulement libre présente les équations de débit pour les canaux Parshall en écoulement libre pour des valeurs exprimées en m³ par seconde, en m³ par jour, en pi³ par seconde et en millions de gallons U.S. par jour.

Tableau 6 - Canal Parshall - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre

Largeur de la gorge mm (po)	Hauteur minimum mm (po)	DÉBIT MINIMUM		Hauteur maximum mm (po)	DÉBIT MAXIMUM	
		l/s	m ³ /j		l/s	m ³ /j
25 1	19 0,75	0,13	11,2	184 7,25	4,38	378,2
51 2	25 1	0,4	34,3	184 7,25	8,75	756,4
76 3	31 1,25	0,82	70,7	457 18	52,56	4541,1
152 6	31 1,25	1,58	136,2	457 18	110,6	9557,7
229 9	31 1,25	2,63	227,5	610 24	251,3	21 714,1
305 12	31 1,25	3,49	301,9	762 30	456,8	39 471,2
457 18	31 1,25	5,05	436,5	762 30	695,4	60 081,6
610 24	44 1,75	11,3	974,5	762 30	937,4	80 995
914 36	44 1,75	16,4	1417,2	762 30	1426,9	123 286,5
1219 48	64 2,5	38,6	3334,7	762 30	1923,6	166 199,4
1524 60	64 2,5	47,6	4110,2	762 30	2424,4	209 470
1829 72	76 3	74,16	6407,2	762 30	2930,7	253 213
2438 96	76 3	97,2	8401,7	762 30	3950,8	341 350
3048 120	90 3,5	158,4	13 683,6	1067 42	8278,7	715 280
3658 144	101 4	226,1	19 535,9	1372 54	14522,3	1254 725

Tableau 7 - Canal Parshall - Équations de débit en écoulement libre

Dimensions du canal	ÉQUATION DE DÉBIT				
	W	m³/s (**)	m³/j (**)	pi³/s (*)	Mgal_{US}/j (*)
1"		0,0604 H ^{1,55}	5 215 H ^{1,55}	0,338 H ^{1,55}	0,2185 H ^{1,55}
2"		0,1207 H ^{1,55}	10 430 H ^{1,55}	0,676 H ^{1,55}	0,4369 H ^{1,55}
3"		0,1765 H ^{1,547}	15 250 H ^{1,547}	0,992 H ^{1,547}	0,6412 H ^{1,547}
6"		0,3812 H ^{1,58}	32 937 H ^{1,58}	2,060 H ^{1,58}	1,3314 H ^{1,58}
9"		0,5354 H ^{1,53}	46 258 H ^{1,53}	3,070 H ^{1,53}	1,9842 H ^{1,53}
1'		0,6909 H ^{1,522}	59 696 H ^{1,522}	4,0 H ^{1,522}	2,5853 H ^{1,522}
18"		1,0563 H ^{1,538}	91 263 H ^{1,538}	6,0 H ^{1,538}	3,8779 H ^{1,538}
2'		1,4286 H ^{1,550}	123 432 H ^{1,550}	8,0 H ^{1,550}	5,1706 H ^{1,550}
3'		2,184 H ^{1,566}	188 701 H ^{1,566}	12,0 H ^{1,566}	7,7559 H ^{1,566}
4'		2,9539 H ^{1,578}	255 214 H ^{1,578}	16,0 H ^{1,578}	10,341 H ^{1,578}
5'		3,732 H ^{1,587}	322 448 H ^{1,587}	20,0 H ^{1,587}	12,926 H ^{1,587}
6'		4,5212 H ^{1,595}	390 632 H ^{1,595}	24,0 H ^{1,595}	15,512 H ^{1,595}
8'		6,1148 H ^{1,607}	528 322 H ^{1,607}	32,0 H ^{1,607}	20,682 H ^{1,607}
10'		7,4628 H ^{1,6}	644 782 H ^{1,6}	39,38 H ^{1,6}	25,452 H ^{1,6}
12'		8,8594 H ^{1,6}	756 453 H ^{1,6}	46,75 H ^{1,6}	30,216 H ^{1,6}
15'		10,955 H ^{1,6}	946 542 H ^{1,6}	57,81 H ^{1,6}	37,364 H ^{1,6}
20'		14,45 H ^{1,6}	1 248 466 H ^{1,6}	76,25 H ^{1,6}	49,282 H ^{1,6}
25'		17,944 H ^{1,6}	1 550 391 H ^{1,6}	94,69 H ^{1,6}	61,20 H ^{1,6}
30'		21,439 H ^{1,6}	1 852 315 H ^{1,6}	113,13 H ^{1,6}	73,118 H ^{1,6}
40'		28,426 H ^{1,6}	2 456 000 H ^{1,6}	150 H ^{1,6}	96,948 H ^{1,6}
50'		35,415 H ^{1,6}	3 059 848 H ^{1,6}	186,88 H ^{1,6}	120,785 H ^{1,6}

(*) **H** exprimé en pieds

(**) **H** exprimé en mètres

3.1.7. Précision

L'erreur de mesure avec un canal Parshall est de l'ordre de $\pm 3\%$. Pour obtenir cette précision, il importe de respecter scrupuleusement toutes les dimensions recommandées lors de la fabrication du canal et de son installation.

3.1.8. Sources d'erreur

Les principales causes d'erreur qui réduisent la précision du canal sont les suivantes :

- modifications aux dimensions standard, effectuées lors de la fabrication du canal ou lors de son installation :

Déformation : vérifier toutes les sections du canal afin de s'assurer qu'il n'a pas été écrasé, ou tordu lors de l'installation;

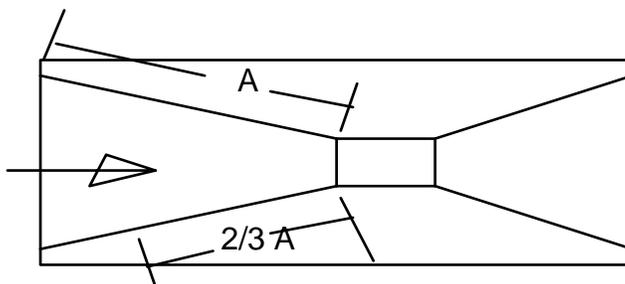
Largeur de la gorge : pour les canaux de petites dimensions, une tolérance de 4 mm (1/64 po) par rapport à la dimension standard, est acceptable. Pour les canaux de plus grandes dimensions, l'écart acceptable est de 8 mm (1/32 po), (voir Tableau 5 - Canal Parshall – Dimensions normalisées);

Longueur de la section convergente : cette section ne peut être réduite, mais rien ne semble interdire sa prolongation. Cependant, le point de mesure doit demeurer à la position standard;

Horizontalité : si la base du canal n'est pas de niveau par rapport à l'axe transversal, la hauteur moyenne doit être utilisée pour établir la relation hauteur/débit, c'est-à-dire que la hauteur doit être mesurée sur chacun des côtés du canal pour établir la hauteur moyenne.

- position erronée du point de mesure :

Pour toutes les dimensions, le point de mesure devrait être situé aux $2/3$ de la section convergente, laquelle distance doit être mesurée à partir du début de la gorge, le long de la paroi.



➤ approche inadéquate :

La section convergente du canal est trop courte pour corriger adéquatement toutes les distorsions importantes de vitesse d'approche et de distribution. Le lecteur peut se référer à la section 3.1.10 qui traite des conditions d'installation pour connaître les règles qui régissent l'approche.

➤ mauvaise technique de mesure en écoulement noyé :

Il arrive souvent que l'utilisateur, par manque de connaissances, ne sache reconnaître et évaluer un canal fonctionnant en écoulement noyé et mesure le débit en un seul endroit, au lieu des deux points de mesure prescrits pour cette situation.

➤ obstructions dans la gorge du canal :

Il importe de s'assurer que rien ne bloque l'écoulement dans la gorge du canal de mesure, principalement avec les canaux de petite dimension. Le liquide est alors forcé de passer par-dessus l'obstacle, ce qui augmente le niveau de l'eau au point de mesure.

3.1.9. Critères de sélection

Comme il a été mentionné à la section 2.7 du présent document, l'installation d'un canal Parshall devrait être privilégiée lorsque le débit quotidien est de 1 800 m³ ou plus.

Comme plusieurs dimensions de canaux Parshall sont disponibles pour mesurer la gamme de débit escomptée, d'autres critères sont à considérer lors du choix du canal tels que :

- l'écoulement : il importe de choisir un canal dont la dimension sera suffisante pour permettre un écoulement libre au régime de débit maximal, tout en considérant les contraintes d'installation;
- la perte de charge : pour un même débit, l'importance de la remontée du niveau d'eau associée à la mise en place de canaux de dimensions différentes;
- la sensibilité requise pour détecter et mesurer la variation du niveau de l'eau associée à une variation minimale de débit;

- la précision désirée;
- l'ensemble des travaux requis pour mettre en place des canaux de différentes dimensions;
- les coûts associés à l'installation des canaux de différentes dimensions.

3.1.10. Particularités d'installation

Le canal Parshall doit être localisé dans une section droite de l'écoulement ⁽⁸⁾.

Lors de la mise en place du canal, il importe d'assurer l'intégrité des caractéristiques physiques originales du canal (voir Tableau 5 - Canal Parshall – Dimensions normalisées).

Le radier (DR), c'est-à-dire la base de la section convergente du canal, doit être plus élevé que le radier du conduit d'amenée. Cette élévation doit être égale à la différence entre la hauteur d'eau dans le conduit au débit maximal (H_c), avant la mise en place du canal, et la hauteur d'eau escomptée au point de mesure h_2 ($DR = H_c - h_2$) dans des conditions d'écoulement noyé minimales. Le radier du conduit d'amenée doit être relié au radier de la section convergente par une section à pente inversée ayant un rapport 1 : 4 (vertical : horizontal) (voir Figure 6 - Canal Parshall - Caractéristiques physiques et d'écoulement).

La longueur de la section d'approche doit être équivalente à au moins vingt fois le diamètre du conduit d'amenée.

Dans la section d'approche, la pente devrait être inférieure à 1 %. Il importe d'éviter qu'une pente trop prononcée ne produise un ressaut dans la section convergente du canal, tel que démontré à la Figure 7 - Canal Parshall - Pente de la section d'approche. Elle ne doit pas provoquer une trop grande vitesse qui aurait pour effet d'amoinrir la remontée de la hauteur d'eau dans la section convergente.

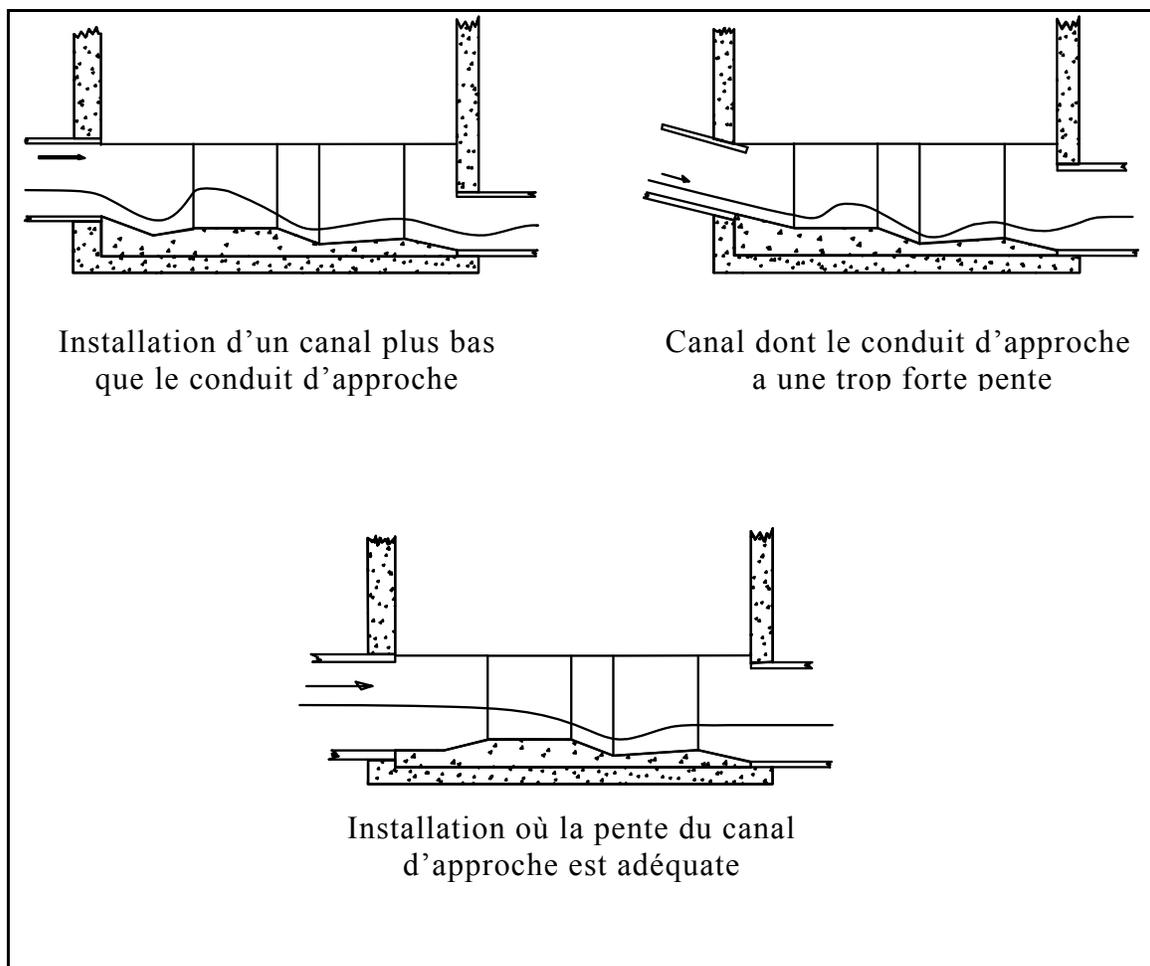
Le canal d'approche devrait avoir une largeur minimale conforme à la dimension « D » du Tableau 2 - Dimensions pour chambre type - Canal Parshall et une largeur maximale n'excédant pas la dimension « P » du même tableau (plus de 10 m). Il importe d'éviter d'introduire le conduit d'amenée des eaux directement dans la section convergente du canal, ainsi qu'il est démontré à la Figure 8 - Canal Parshall - Union des sections d'approche et de convergence.

À la sortie du canal, la pente devrait être suffisante pour permettre l'évacuation rapide de l'eau. Cette pente devrait être de l'ordre de 2 %.

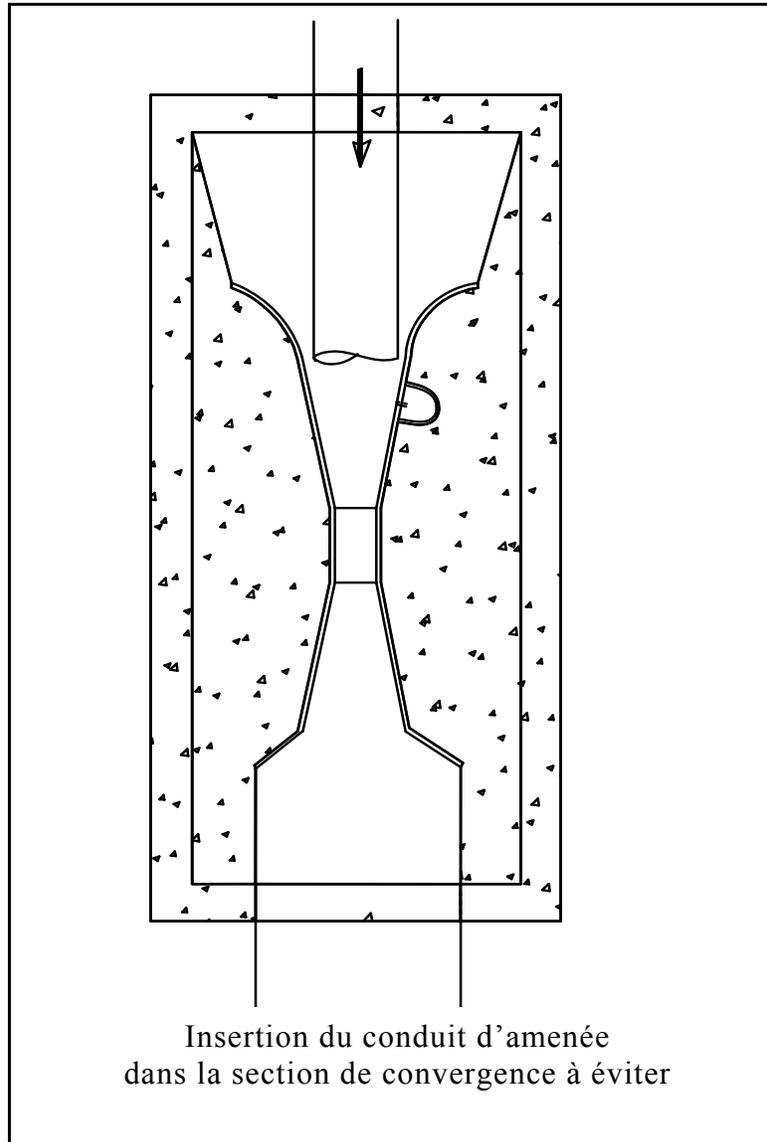
Après la section de dérive, il ne devrait y avoir aucune courbe prononcée qui puisse restreindre l'écoulement et causer un écoulement noyé.

Dans la section convergente, le conduit du puits de stabilisation doit être situé aux deux tiers (2/3) de la longueur de la paroi de la section et à angle droit avec la paroi. Le radier de ces conduits, c'est-à-dire leur base, doit être sous le niveau du radier de la section convergente, comme il est indiqué à la Figure 6 - Canal Parshall - Caractéristiques physiques et d'écoulement, et à ras avec la paroi du canal.

Figure 7 - Canal Parshall - Pente de la section d'approche



**Figure 8 - Canal Parshall - Union des sections d'approche et de convergence
(méthode à éviter)**



3.1.11. Écoulement noyé

On pourrait s'attendre à un écoulement noyé dès que l'eau atteint le seuil (niveau du plancher) de la section convergente; mais tel n'est pas le cas. Le débit n'est pas réduit tant que le rapport h_2/h_1 exprimé en pourcentage, n'excède pas les valeurs suivantes⁽²⁾ :

- 50 % pour les canaux de 25, 51 et 76 mm (1, 2 et 3 po);
- 60 % pour les canaux de 152 et 229 mm (6 et 9 po);
- 70 % pour les canaux de 305 à 2 438 mm (1 à 8 pi);
- 80 % pour les canaux de 2 438 à 15 240 mm (8 à 50 pi).

Lorsque la hauteur de l'eau en aval (h_2) est supérieure au seuil (niveau du plancher) de la section convergente, la mesure de la hauteur en amont (h_1) et de la hauteur en aval (h_2) doit être faite. Lorsque le rapport h_2/h_1 est supérieur à ces limites modulaires, l'écoulement est dit noyé, et le débit mesuré est fonction de la mesure simultanée des deux hauteurs h_1 et h_2 . Comme on ne dispose présentement d'aucun instrument commercial capable de faire simultanément ces mesures et les calculs correspondants, la mesure en écoulement noyé doit autant que possible être évitée.

Il est démontré que le rapport h_2/h_1 peut atteindre 67 % à 70 % avant que la réduction de débit soit significative. D'autre part, pour chaque pourcentage additionnel, la réduction de débit s'accroîtra de façon exponentielle, tel qu'il est démontré à la Figure 9 - Canal Parshall - Effets de l'écoulement noyé.

Lorsque le rapport h_2/h_1 atteint 100 %, il n'y a plus de débit. Cependant, 95 % est la valeur considérée comme la valeur limite où le canal Parshall devient inopérant, car la différence de hauteur entre h_1 et h_2 est si faible que la moindre erreur de mesure de hauteur résulte en de grandes imprécisions.

Il est exclu d'utiliser ce type de canal en écoulement noyé lorsque le rapport h_2/h_1 est supérieur à 0,95 (voir Figure 10 - Canal Parshall - Rapport h_2/h_1).

Figure 9 - Canal Parshall - Effets de l'écoulement noyé

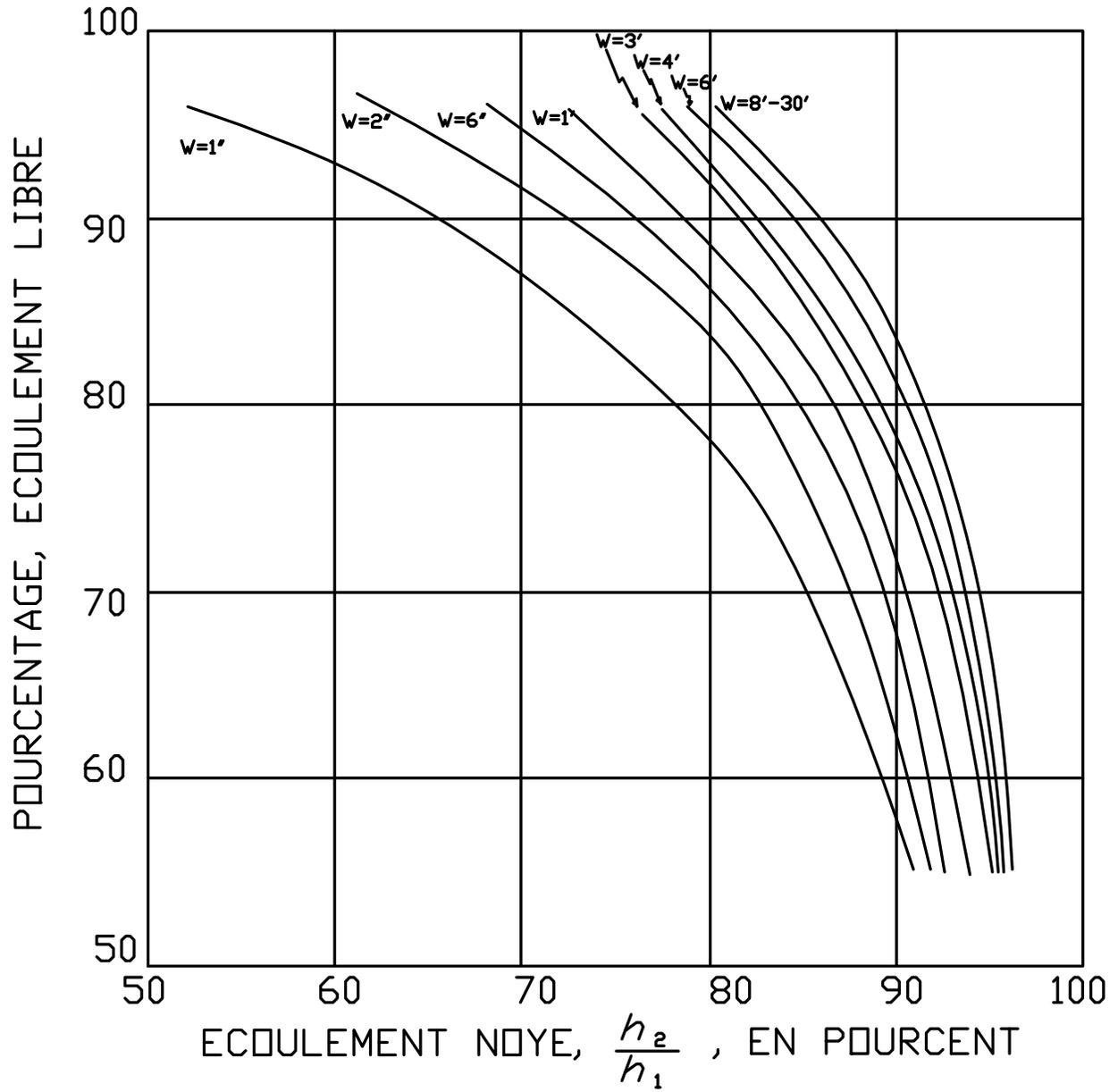
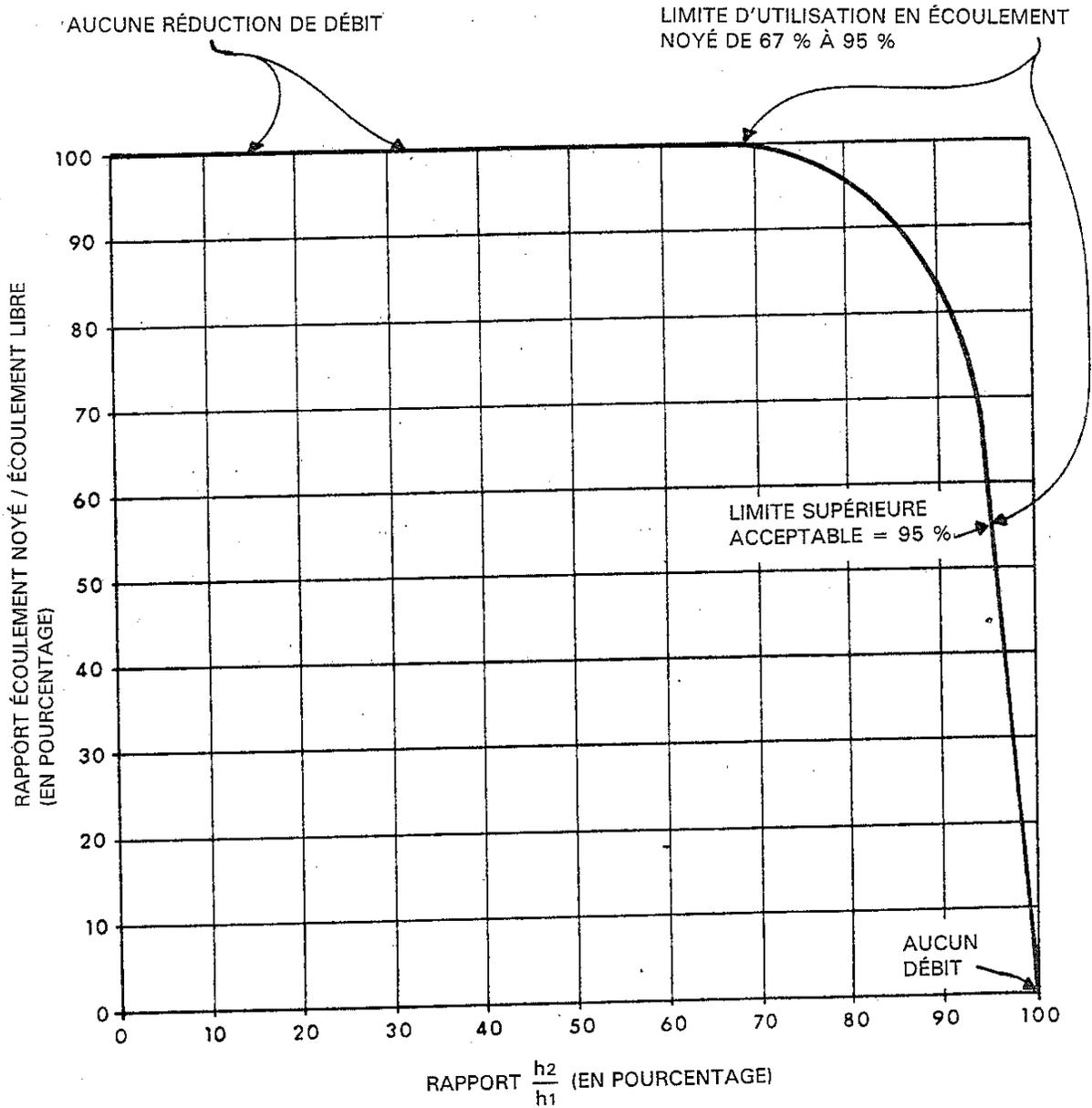


Figure 10 - Canal Parshall - Rapport h_2/h_1



3.1.12. Équation de débit en écoulement noyé

Pour ce type de régime hydraulique, l'équation de débit résultant de la mesure $h_1 - h_2$ s'exprime comme suit ⁽⁹⁾ :

$$Q = \frac{C_1 (h_1 - h_2)^{n_1}}{(-\log h_2 / h_1)^{n_2}} \quad (10)$$

où

Q est le débit en pi³/s;

C₁ est une constante sans unité;

h₁ et h₂ sont les hauteurs du niveau d'eau en pieds;

n₁ et n₂ sont des constantes sans unité.

Le Tableau 8 - Coefficients et exposants - Canal Parshall en écoulement noyé présente les valeurs pour les exposants et les coefficients de la formule précitée.

3.1.13. Pertes de charge

Avant d'installer un canal, il faut vérifier que la remontée du niveau d'eau dans le réseau d'évacuation ne cause pas de refoulement des égouts dans les sous-sols des bâtiments. Pour évaluer cette remontée, on utilise la formule suivante :

$$R = [(H_c - h_2) + h_1 + L] \quad (11)$$

où

R représente la remontée du niveau d'eau en pieds, dans la section en amont du canal;

H_c représente la hauteur d'eau en pieds dans le conduit, avant l'installation du canal, au débit maximal;

h₁ représente la hauteur du niveau d'eau anticipée en pieds, au point de mesure en amont du canal;

h₂ représente la hauteur du niveau d'eau anticipée en pieds, au point de mesure en aval du canal, en écoulement noyé.

L la perte de charge en pieds, selon la Figure 11 - Perte de charge - Canaux Parshall : 1 à 8 pieds et la Figure 12 - Perte de charge - Canaux Parshall : 10 à 50 pieds.

Tableau 8 - Coefficients et exposants - Canal Parshall en écoulement noyé

W	C ₁	n ₁	n ₂
(25 mm) 1"	0,299	1,55	1,000
(51 mm) 2"	0,612	1,55	1,000
(76 mm) 3"	0,915	1,55	1,000
(152 mm) 6"	1,66	1,58	1,080
(229 mm) 9"	2,51	1,53	1,060
(305 mm) 12"	3,11	1,52	1,080
(457 mm) 18"	4,42	1,54	1,115
(610 mm) 24"	5,94	1,55	1,140
(762 mm) 30"	7,22	1,555	1,150
(914 mm) 3'	8,60	1,56	1,160
(1219 mm) 4'	11,10	1,57	1,185
(1524 mm) 5'	13,55	1,58	1,205
(1829 mm) 6'	15,85	1,59	1,230
(2134 mm) 7'	18,15	1,60	1,250
(2438 mm) 8'	20,40	1,60	1,260
(3048 mm) 10'	24,79	1,59	1,275
(3658 mm) 12'	29,34	1,59	1,275
(4572 mm) 15'	36,17	1,59	1,275
(4572 mm) 15'	47,56	1,59	1,275
(6096 mm) 20'	58,95	1,59	1,275
(7620 mm) 25'	70,34	1,59	1,275
(9144 mm) 30'	93,11	1,59	1,275
(12192 mm) 40'	115,89	1,59	1,275
(15240 mm) 50'			

Figure 11 - Perte de charge - Canaux Parshall : 1 à 8 pieds

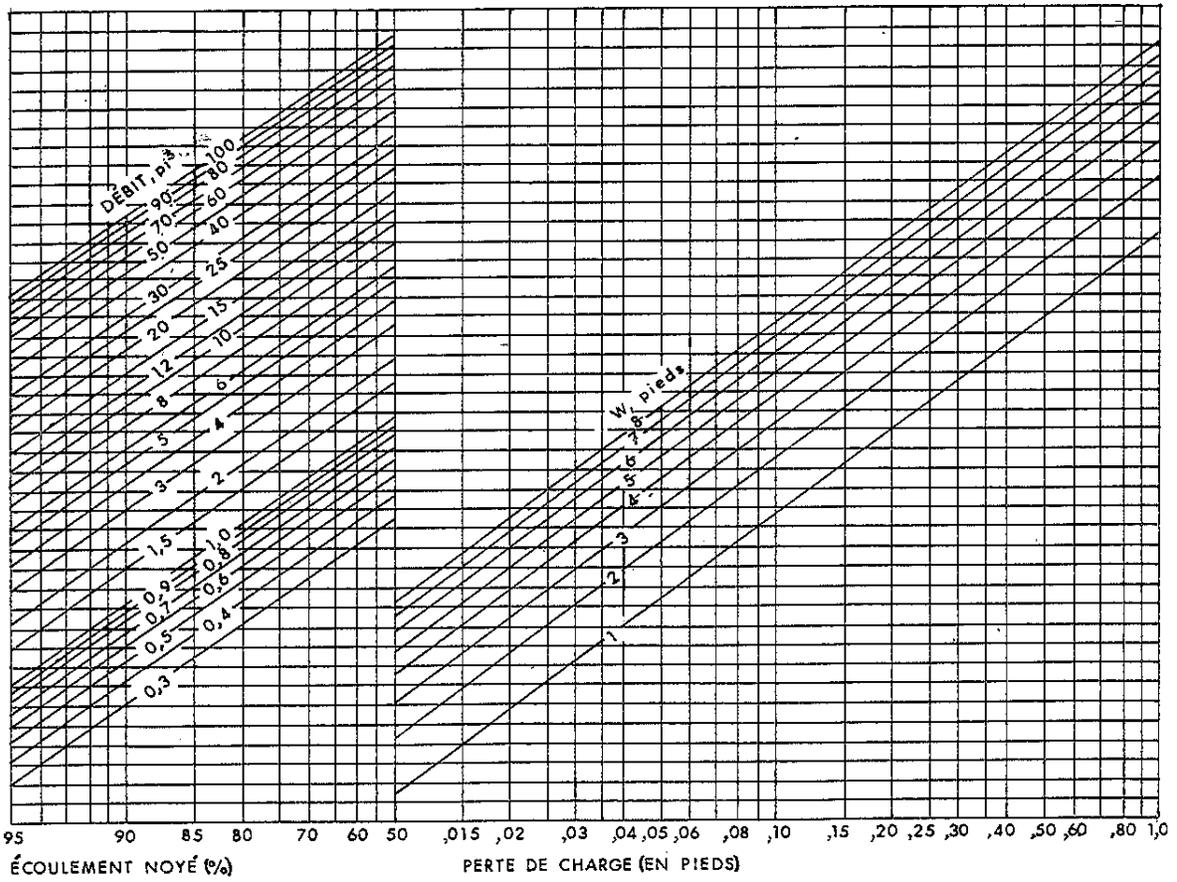
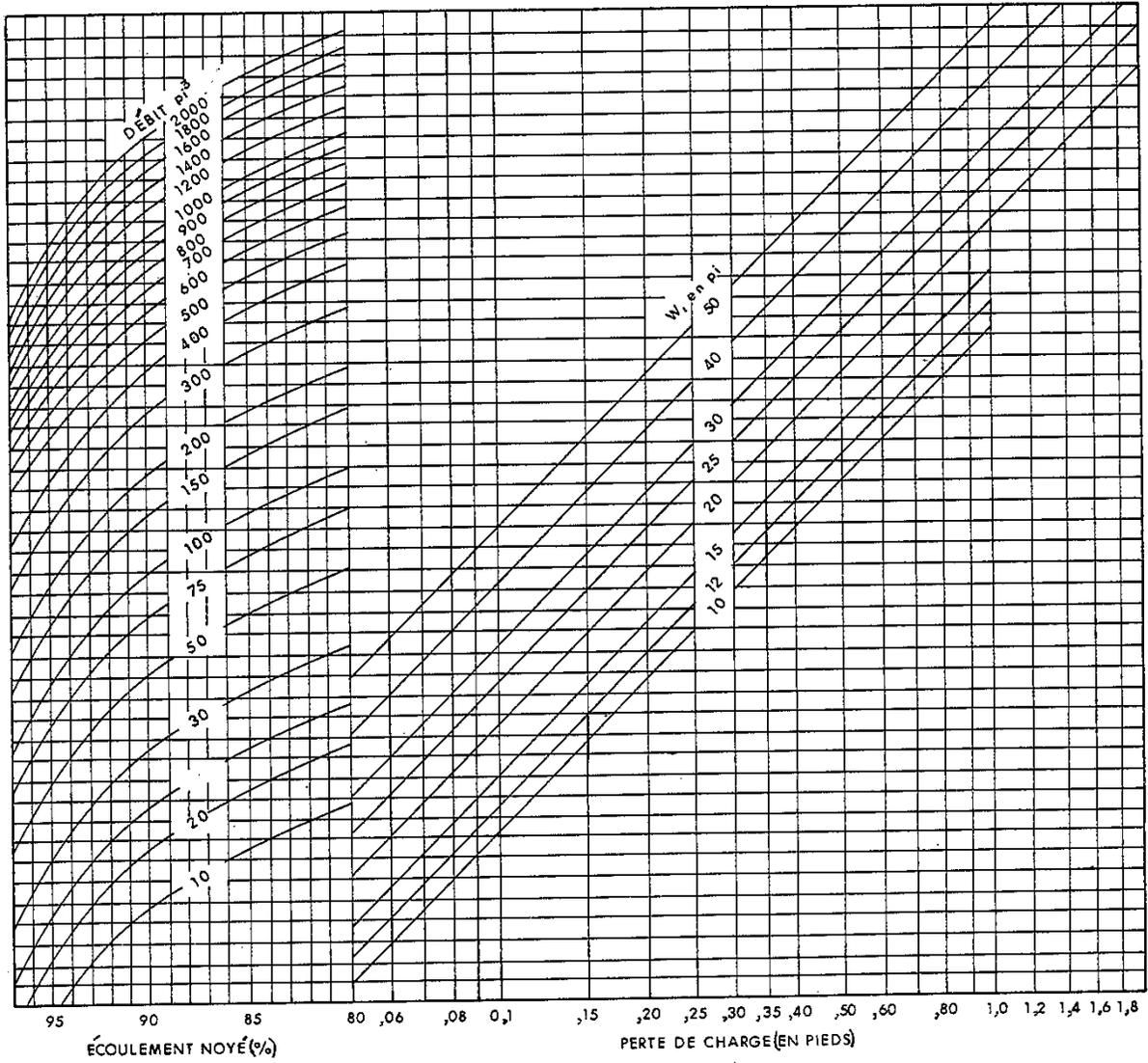


Figure 12 - Perte de charge - Canaux Parshall : 10 à 50 pieds



Si les données relatives aux pertes de charge ne sont pas disponibles, il est néanmoins possible d'évaluer la remontée d'eau en utilisant la formule empirique suivante :

$$R = (H_c - h_2) + (L, l * h_1) \quad (12)$$

Les termes R, HC, h2 et h1 sont définis à l'équation 11.

Les étapes à suivre pour déterminer la remontée totale sont :

- mesurer la hauteur dans le conduit alors que le débit est à son maximum (Hc);
- évaluer le plus précisément possible la valeur du débit maximal à mesurer (Q_{\max});
- établir quelle sera la hauteur d'eau en aval de la section de contrôle pour le débit maximal prévu (h_1);
- définir la grosseur du canal susceptible de mesurer le débit maximal attendu avec la plus faible condition d'écoulement noyé;
- définir le rapport entre les hauteurs, en écoulement noyé (h_2/h_1);
- établir à quelle distance du radier du conduit sera installé le radier de la section convergente du canal ($H_c - h_2$).

Lorsque cette évaluation est terminée, il est nécessaire de vérifier les radiers des bâtiments et des sous-sols, afin de s'assurer que l'installation choisie ne présente aucun risque d'inondation.

3.1.14. Modification au canal

Pour des applications particulières, quelques utilisateurs ont apporté des modifications à certaines parties du canal. Généralement, ces modifications touchent la dérive et n'affectent pas les valeurs obtenues. Ces canaux modifiés sont généralement utilisés en écoulement libre.

Une version de ce canal, sans section de dérive, est également utilisée pour les canaux de 76 mm (3 po), comme canal portatif et comme élément de mesure temporaire. Ce canal est utilisé uniquement dans des conditions d'écoulement libre.

Comme l'utilisation de canaux modifiés est fortement déconseillée, il n'est pas pertinent de traiter ce sujet en détail.

3.1.15. Étalonnage

En raison de la grosseur des réservoirs disponibles, l'utilisation de la méthode volumétrique est généralement limitée à des canaux de 305 mm (1 pi et moins).

Lors de l'étalonnage, la hauteur d'eau dans le canal au point de mesure ne doit pas varier de plus de 4 %, peu importe la méthode utilisée.

3.2. Canal Palmer-Bowlus

Le canal Palmer-Bowlus a été conçu dans les années trente afin d'être utilisé comme canal d'insertion dans un conduit existant dont la pente est inférieure à 2 %.

3.2.1. Description

Ce canal est de forme arrondie afin de créer une restriction dans le conduit et produire une plus grande vitesse d'écoulement dans la gorge du canal.

Le Palmer-Bowlus est un canal de type venturi dont la gorge est uniforme. La longueur de celle-ci est égale au diamètre du conduit auquel il correspond. Différentes formes de restriction ont été développées, mais la plus fréquemment employée est la forme trapézoïdale. La présente section fait toujours référence à un canal de cette forme.

Les canaux Palmer-Bowlus sont généralement préfabriqués en fibre de verre renforcé de plastique. Bien que rare, il est également possible de les obtenir en acier inoxydable.

Le canal Palmer-Bowlus est fabriqué dans des dimensions variant entre 102 mm (4 po) et 1 067 mm (42 po). Des canaux plus grands, jusqu'à 2 438 mm (96 po), peuvent être manufacturés sur commande spéciale. Les dimensions standard sont : 102 (4), 152 (6), 203 (8), 254 (10), 305 (12), 381 (15), 457 (18), 533 (21), 610 (24), 686 (27), 762 (30), 914 (36), 1 067 (42), 1 219 (48), 1 372 (54) et 1 524 (60) mm (po) (10).

3.2.2. Principe de fonctionnement

Les restrictions verticales et latérales du canal diminuent l'aire d'écoulement, ce qui provoque un rehaussement du niveau d'eau en amont de la section de contrôle, suivi d'une chute du niveau d'eau dans la section de contrôle, accompagnée d'une augmentation de la vitesse d'écoulement.

Le débit peut être obtenu en mesurant simplement la hauteur d'eau en amont du canal, puisqu'il est établi que la hauteur varie proportionnellement au débit.

Bien qu'il soit possible d'utiliser ce canal en écoulement noyé, il est fortement recommandé de l'utiliser en écoulement libre. Dans ces conditions, la mesure du débit peut être obtenue avec un seul point de mesure, alors qu'en écoulement noyé, il est nécessaire de mesurer également la hauteur d'eau en aval de la section de contrôle.

3.2.3. Applications

Bien qu'il soit conçu pour mesurer le débit dans des réseaux d'égout et des conduits existants, le canal Palmer-Bowlus n'est qu'un canal de mesure temporaire. En effet, l'écart de mesure entre le débit minimal et le débit maximal est assez faible. Souvent une croissance de réseau nécessite de changer la grosseur du canal.

Comme tous les canaux de mesure, le canal Palmer-Bowlus est un bon outil pour mesurer le débit des eaux contenant des solides. De plus, il est relativement facile à installer puisqu'il ne nécessite aucun différentiel de radier en aval et en amont.

En raison de leur volume relativement faible, les canaux Palmer-Bowlus, dont le diamètre est inférieur à 381 mm (15 po), peuvent être insérés dans un regard d'égout standard, sans qu'il soit nécessaire d'en modifier l'accès.

3.2.4. Dimensions

Les dimensions d'un canal Palmer-Bowlus sont fonction du diamètre du conduit dans lequel il doit être installé.

Contrairement au Parshall, les normes définissant les dimensions et la configuration de ce canal ne sont pas rigides. Il importe donc d'utiliser les tables de débit fournies par le fabricant du canal pour obtenir un débit précis.

Un canal Palmer-Bowlus, tel qu'expérimenté par Ludwig, devrait être conçu selon les dimensions présentées au Tableau 9 - Canal Palmer-Bowlus - Dimensions normatives selon Ludwig, et avoir la forme illustrée à la Figure 13 - Forme d'un canal Palmer-Bowlus - selon Ludwig⁽¹⁰⁾. Les canaux Palmer-Bowlus généralement rencontrés sur le marché québécois sont fabriqués selon les normes de la compagnie Plasti-Fab inc. Les dimensions et la forme sont présentées au Tableau 10 - Canal Palmer-Bowlus - Dimensions normatives selon Plasti-Fab inc. et à la Figure 14 - Forme d'un canal Palmer-Bowlus - Plasti-Fab inc.⁽⁹⁾.

3.2.5. Gammes de mesure

Les canaux Palmer-Bowlus (Plasti-Fab inc.) peuvent mesurer des débits variant entre 2,4 m³ par jour, pour un canal de 102 mm (4 po) et 49 200 m³ par jour, pour un canal de 762 mm (30 po).

Le Tableau 11 - Canal Palmer-Bowlus - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre présente les débits minimal et maximal recommandés pour un canal Palmer-Bowlus en écoulement libre. Dans ce document, seules les données s'appliquant aux canaux dont les dimensions se situent entre 102 mm (4 po) et 762 mm (30 po) ont été retenues.

3.2.6. Équation de débit en écoulement libre

L'équation de débit en écoulement libre s'exprime sous la forme suivante⁽¹⁰⁾ :

$$\frac{Q}{D^{5/2}} = \frac{5}{12} \sqrt{\frac{g z^3 (1 + 2,4mz)^3}{(1 + 4,8mz)}} \quad (13)$$

où

- Q est le débit en m³ ou en pi³/s;
- D est le diamètre du conduit en mètres ou en pieds;
- g est la constante de gravité en m/s² ou en pi/s²;
- z est le rapport dc/D;
- m est la pente des cotés du canal;
- dc est la hauteur de l'écoulement dans la gorge du canal en mètres ou en pieds.

Tableau 9 - Canal Palmer-Bowlus - Dimensions normatives selon Ludwig

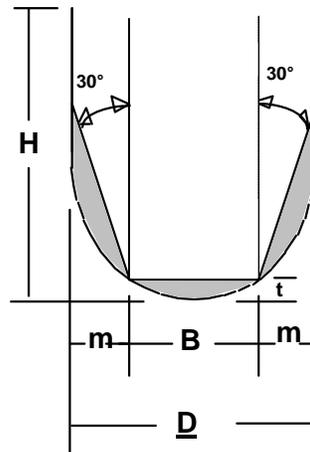
Dimensions en millimètres (et pouces)

D	B	H	t	D/2	p	L
102 mm (4")	43 (1,6")	102 (4")	8 (0,3")	51 (2")	23 (9")	125 (4,9")
152 mm (6")	64 (2,5")	152 (6")	13 (0,5")	76 (3")	38 (1,5")	229 (9")
203 mm (8")	85 (3")	203 (8")	17 (0,6")	102 (4")	46 (1,8")	295 (11,6")
254 mm (10")	106 (4")	254 (10")	22 (0,8")	127 (5")	61 (2,4")	376 (14,8")
305 mm (12")	127 (5")	305 (12")	25 (1")	152 (6")	76 (3")	457 (18")
381 mm (15")	159 (6,25")	381 (15")	32 (1,25")	191 (7,5")	95 (3,75")	572 (22,5")
457 mm (18")	191 (7,5")	457 (18")	38 (1,5")	229 (9")	114 (4,5")	686 (27")
533 mm (21")	223 (8,75")	533 (21")	45 (1,75")	267 (10,5")	133 (5,25")	800 (31,5")
610 mm (24")	254 (10")	610 (24")	51 (2")	305 (12")	152 (6")	914 (36")
686 mm (27")	275 (11,25")	686 (27")	55 (2,25")	343 (13,5")	172 (6,75")	1029 (40,5")
762 mm (30")	318 (12,5")	762 (30")	64 (2,5")	381 (15")	191 (7,5")	1143 (45")
914 mm (36")	381 (15")	914 (36")	76 (3")	457 (18")	229 (9")	1372 (54")
1067 mm (42")	445 (17,5")	1067 (42")	89 (3,5")	533 (21")	267 (10,5")	1600 (63")
1219 mm (48")	508 (20")	1219 (48")	102 (4")	610 (24")	305 (12")	1829 (72")
1524 mm (60")	635 (25")	1524 (60")	127 (5")	762 (30")	381 (15")	2286 (90")

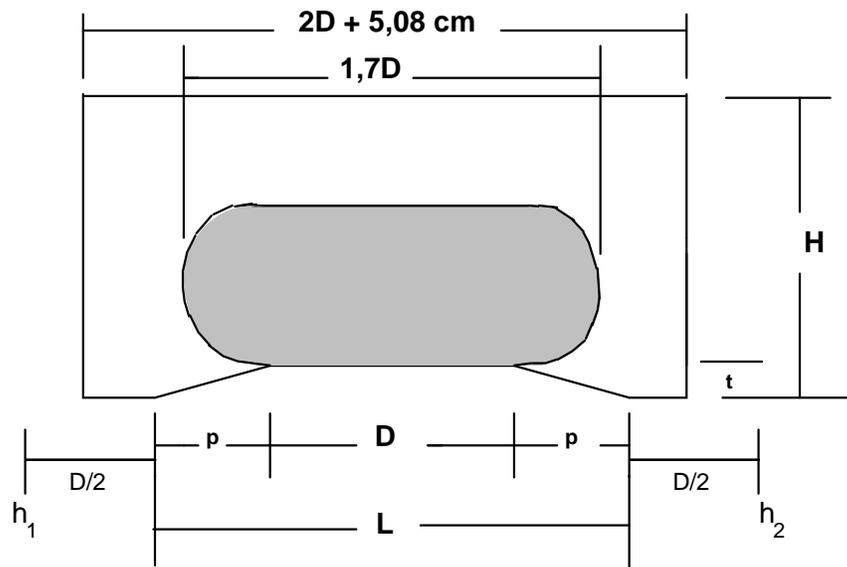
où :

- D est la dimension du canal;
- B est la largeur de la base du canal ($5D/12$);
- H est la hauteur du canal ($=D$);
- T est la hauteur différentielle entre la base du canal et le radier du conduit ($D/12$);
- D/2 est la localisation du point de mesure;
- p est la longueur de la section inclinée de la base (1 vertical : 3 horizontal);
- L est la longueur totale de la base du canal $\{D + 2(p)\}$.

Figure 14 - Forme d'un canal Palmer-Bowlus - Plasti-Fab inc.



Vue en coupe



Vue de profil

Note : se référer au Tableau 10 - Canal Palmer-Bowlus - Dimensions normatives selon Plasti-Fab inc. pour la signification des lettres.

Tableau 10 - Canal Palmer-Bowlus - Dimensions normatives selon Plasti-Fab inc.

D	B	H	t	D/2	p	L	m
102 4 "	51 2 "	102 4 "	17 0,6 "	51 2 "	51 2 "	203 8 "	25 1 "
152 6 "	76 3 "	152 6 "	25 1 "	76 3 "	76 3 "	305 12 "	40 1,5 "
203 8 "	102 4 "	203 8 "	34 1,3 "	102 4 "	102 4 "	406 16 "	51 2 "
254 10 "	127 5 "	254 10 "	42 1,6 "	127 5 "	127 5 "	508 20 "	64 2,5 "
305 12 "	152 6 "	305 12 "	51 2 "	152 6 "	152 6 "	610 24 "	76 3 "
381 15 "	191 7,5 "	381 15 "	64 2,5 "	191 7,5 "	191 7,5 "	762 30 "	96 3,75"
457 18 "	229 9 "	457 18 "	76 3 "	229 9 "	229 9 "	914 36 "	114 4,5 "
533 21 "	267 10,5 "	533 21 "	89 3,5 "	267 10,5 "	267 10,5 "	1067 42 "	133 5,25"
610 24 "	305 12 "	610 24 "	102 4 "	305 12 "	305 12 "	1219 48 "	152 6 "
686 27 "	343 13,5 "	686 27 "	114 4,5 "	343 13,5 "	343 13,5 "	1372 54 "	172 6,75"
762 30 "	381 15 "	762 30 "	127 5 "	381 15 "	381 15 "	1524 60 "	191 7,5 "
914 36 "	457 18 "	914 36 "	152 6 "	457 18 "	457 18 "	1829 72 "	229 9 "
1067 42 "	533 21 "	1067 42 "	178 7 "	533 21 "	533 21 "	2134 84 "	267 10,5"
1219 48 "	610 24 "	1219 48 "	203 8 "	610 24 "	610 24 "	2438 96 "	305 12 "
1524 60 "	762 30 "	1524 60 "	254 10 "	762 30 "	762 30 "	3048 120 "	381 15 "

où :

- D est la dimension du canal;
- B est la largeur de la base du canal (D/2);
- H est la hauteur du canal (= D);
- T est la différence de hauteur entre la base du canal et le radier du conduit (D/6);
- D/2 est la localisation du point de mesure;
- P est la longueur de la section inclinée de la base (D/2);
- L est la longueur totale de la base du canal $D + 2(p)$;
- m est la distance entre la base et les côtés (D/4).

Tableau 11 - Canal Palmer-Bowlus - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre

Diamètre du canal mm (po)	Pente amont maximum (%)	Hauteur minimum (mm)	DÉBIT MINIMUM		Hauteur Maximum (mm)	DÉBIT MAXIMUM	
			l/sec	m ³ /j		l/sec	m ³ /j
102 4	2,2	15	0,2	16	60	2,2	190
152 6	2,2	33,5	0,98	85	110	8,9	770
203 8	2	45,7	2,1	181,4	149	18,96	1 638
254 10	1,8	54,8	3,45	298,1	186	32,8	2 837
305 12	1,6	67	5,6	483,8	223	51,8	4 477
381 15	1,5	82,3	9,45	816,5	277	90,1	7 780
457 18	1,4	100,6	15,53	1 341,8	332	141,8	12 254
533 21	1,4	115,8	22,08	1 907,7	390	210,7	18 202
610 24	1,4	134,1	31,72	2 740,6	445	294,5	25 445
686 27	1,4	149,4	40	3 456	500	390,8	33 768
762 30	1,4	167,6	55,22	4 771	555	509,9	44 050

Note : Les valeurs présentées sont valables pour les canaux fabriqués par Plasti-Fab inc.

Comme les différents fabricants ne suivent pas rigoureusement les prescriptions de Ludwig, il peut fort bien arriver que l'utilisation de cette formule pour établir le débit dans un canal particulier ne donne pas de bons résultats. Il est donc recommandé d'obtenir du fabricant, au moment de l'achat du canal, la formule de calcul et la table résultante.

3.2.7. Capacité de mesure d'un canal

La capacité maximale de mesure pour ce type de canal est établie à partir des principes suivants⁽¹¹⁾ :

- la hauteur d'eau (h_1) en amont du canal ne doit pas être supérieure à 90 % du diamètre (D) du conduit : ($h_1 = 0,9 D$);
- la hauteur utile du canal (h_u) est égale à la hauteur en amont permise (h_1) moins la hauteur de la crête (t) du canal : ($h_1 - t$) (voir Figure 14 - Forme d'un canal Palmer-Bowlus - Plasti-Fab inc.);
- la hauteur maximale (h_{max}) de mesure est égale au rapport entre la hauteur utile (h_u) du canal et la dimension du conduit (D) : (h_u/D). Cette valeur est de l'ordre de 73 % de la valeur nominale du canal.

Exemple :

Pour un canal de 762 mm (30 po)

$D = 762$ mm (30 po);

$t = 127$ mm (5 po)(selon Tableau 10 - Canal Palmer-Bowlus - Dimensions normatives selon Plasti-Fab inc.);

$h_1 = 0,9 D$, soit : 686 mm (27 po);

$h_u = h_1 - t$, soit : 686 mm - 127 mm = 559 mm (27 po - 5 po = 22 po);

$h_{max} = h_u/D$, soit : 559 mm/762 mm (22 po/30 po) = 0,733 ou 73 %.

3.2.8. Précision

Ce type de canal est capable de fournir des valeurs dont la précision est comparable à celle obtenue avec un canal Parshall. L'erreur de mesure du débit est de l'ordre de ± 3 %.

Pour obtenir ce genre de précision, une attention particulière doit être prise lors de l'installation du canal, pour éviter un écoulement noyé et une trop grande vitesse d'approche.

3.2.9. Sources d'erreur

Les principales sources d'erreur qui diminuent la précision du canal sont les suivantes :

- modifications aux dimensions standard lors de l'installation :

Largeur de la gorge : lors de l'installation, il importe de s'assurer que le canal n'est pas déformé, écrasé ou tordu, et qu'il conserve ses dimensions et sa forme originales;

Contrôle de l'horizontale : si le canal n'est pas de niveau sur la transversale (perpendiculairement à l'écoulement), la hauteur moyenne devrait être utilisée pour établir la relation hauteur/débit. La hauteur devrait donc être mesurée sur chacun des côtés du canal pour établir la hauteur moyenne;

Position longitudinale : le canal peut être légèrement incliné vers l'aval, de 6 mm au maximum pour les canaux de petite dimension {610 mm (24 po) et moins} et de 20 mm au maximum pour les canaux de grande dimension;

Longueur du canal : si des modifications doivent être apportées sur le sens de la longueur, elles devraient être faites sur la partie en aval seulement, après une rigoureuse évaluation des effets sur la précision de mesure.

- position erronée du point de mesure

Pour tous les canaux de ce type, le point de mesure doit être situé en amont du canal de mesure, à une distance égale à la moitié du diamètre du canal ($D/2$), laquelle distance est mesurée à partir du début de la remontée entre la crête (plateau) du canal et le radier du conduit (voir Figure 13 - Forme d'un canal Palmer-Bowlus - selon Ludwig et Figure 14 - Forme d'un canal Palmer-Bowlus - Plasti-Fab inc.);

La hauteur d'eau doit être mesurée à partir de la crête du canal et non pas à partir du radier du conduit.

- sensibilité de la mesure de la hauteur d'eau

Comme les variations de hauteur associées aux variations de débit sont faibles, il est nécessaire, pour la détection du niveau du liquide, de mettre en place un appareil très sensible.

- approche inadéquate

Ce type de canal n'a pas de section convergente qui permet de corriger les distorsions de vitesse d'approche et leur distribution. Le lecteur peut se référer à la section 3.2.11 qui traite des conditions d'installation pour connaître les règles qui régissent l'approche.

- mauvaise technique de mesure en écoulement noyé

Il arrive souvent que l'utilisateur, par manque de connaissances, ne sache pas reconnaître et évaluer un canal fonctionnant en écoulement noyé, et mesure le débit en un seul endroit, au lieu des deux points de mesure prescrits pour cette situation.

- obstructions dans la gorge du canal

Il importe de s'assurer que rien ne bloque la gorge du canal de mesure, principalement avec les canaux de petite dimension, car le liquide est alors forcé de passer par-dessus l'obstacle, ce qui augmente la hauteur du niveau d'eau et fausse la mesure.

- utilisation de la table hauteur/débit

Il faut s'assurer que la table de conversion hauteur/débit ainsi que la formule d'intégration du débitmètre soient identiques à celles émises par le fournisseur du canal.

3.2.10. Critères de sélection

Les canaux Palmer-Bowlus permettant de mesurer la gamme de débit escomptée existent en plusieurs dimensions. Plusieurs autres points sont à considérer lors du choix du canal. Ces points sont :

- l'écoulement : il importe de choisir un canal dont la dimension sera suffisante pour permettre à tous les régimes hydrauliques, selon les contraintes d'installation, une opération en écoulement libre;
- les débits minimal et maximal à mesurer;
- la sensibilité requise pour détecter et mesurer la variation de hauteur associée à une variation minimale de débit;
- la précision désirée.

3.2.11. Particularités d'installation

Le canal est généralement placé directement dans le conduit et fixé au radier de ce dernier. Dans le cas d'installations temporaires, les canaux sont souvent intégrés à des barrages formés par des sacs de sable.

Lorsque la pente du conduit est trop prononcée, il est possible de relever légèrement le canal afin de réduire la pente, à la condition que le conduit d'amenée ait un diamètre suffisant pour que la hauteur d'eau en amont du canal ne dépasse pas la hauteur recommandée, soit 90 % de la hauteur du conduit ⁽¹²⁾.

Lors de la mise en place du canal, il importe d'assurer l'intégrité des caractéristiques physiques originales.

L'installation doit permettre un rehaussement du niveau d'eau en amont du canal. Ce rehaussement du niveau d'eau doit survenir à une distance en amont suffisante, soit au moins 10 diamètres de conduit.

La longueur de la section d'approche doit avoir au moins 25 fois le diamètre du conduit d'amenée ⁽¹²⁾.

La pente de la section d'approche, doit être inférieure à 2 % pour les petits canaux, et inférieure à 1 % pour les canaux de 762 mm (30 po) et plus.

Au point de mesure, l'écoulement doit être uniforme, distribué et calme. Aucune vague de surface ne doit être présente.

Lorsque le canal est de dimension inférieure au diamètre du conduit, il doit être équipé d'une section de transition dont la longueur est égale à au moins quatre fois le diamètre du conduit dans lequel il est installé. De plus, cette section de transition doit être reliée au conduit par une section réductrice dont l'angle de réduction ne dépasse pas 30° ⁽¹⁰⁾.

Une pente prononcée du conduit en aval n'affectera pas la précision des mesures. Une telle pente n'est cependant pas nécessaire, bien qu'elle puisse aider à maintenir un écoulement libre.

Après la section de dérive, il ne doit y avoir aucune courbe prononcée susceptible de restreindre l'écoulement et de causer un écoulement noyé.

3.2.12. Écoulement noyé

Le débit est dit en écoulement noyé dès que le niveau d'eau en aval atteint le niveau du seuil de mesure. Il est possible de mesurer le débit tant que le rapport h_2 (hauteur d'eau en aval)/ h_1 (hauteur d'eau en amont) est inférieur à 85 % ⁽¹¹⁾.

Lors de l'installation, toutes les précautions doivent être prises pour éviter une telle situation, quitte à relever le radier du canal ou à augmenter la pente du conduit en aval.

3.2.13. Perte de charge

Les pertes de charge engendrées par l'installation d'un canal Palmer-Bowlus sont négligeables. Au débit maximal, la hauteur d'eau en amont ne devrait pas dépasser 90 % de la hauteur nominale du conduit.

3.2.14. Modification au canal

Lorsque l'espace est trop restreint pour permettre l'installation du canal, il est possible de modifier ce dernier afin de permettre son insertion. Les modifications permises sont les suivantes :

- réduire la hauteur des sections de dérivation et de contrôle du canal, en le coupant à angle. Il pourra être coupé à partir du dessus, vis-à-vis le centre du seuil et jusqu'à la fin du canal, à mi-hauteur⁽⁹⁾;
- couper verticalement le canal, à tout endroit situé entre la fin du seuil et la fin du canal.

Lorsque la vitesse d'écoulement est légèrement trop grande, il est possible de la réduire en augmentant la hauteur du seuil. Pour ce faire, le canal est relevé en entier par rapport au radier du conduit.

3.2.15. Étalonnage

La section 2.12.13 traite de l'étalonnage.

En raison de la grosseur des réservoirs disponibles, l'utilisation de la méthode volumétrique est généralement limitée à des canaux de 686 mm (27 pouces) et moins.

Lors de l'étalonnage, la hauteur d'eau dans le canal, au point de mesure, ne doit pas varier de plus de 3,5 %, peu importe la méthode utilisée.

Pour les installations temporaires, une simple vérification des conditions suivantes sera suffisante :

- le canal est de niveau sur les plans longitudinal et transversal;
- la vitesse de l'écoulement en amont du canal est inférieure à 0,6 m (2 pi)/seconde;
- il n'y a pas de vagues et de turbulence en amont du canal;
- l'écoulement est libre;
- l'absence de fuites dans la structure du canal.

3.3. Canal Leopold-Lagco

Le canal Leopold-Lagco a été développé au début des années soixante et introduit sur le marché en 1965 par F.B. Leopold Company Inc. de Pennsylvanie⁽¹³⁾.

3.3.1. Description

Le canal Leopold-Lagco est de forme ronde. Sa forme a pour but de créer une restriction dans le conduit, ce qui provoque une plus grande vitesse d'écoulement dans la gorge du canal.

Ce canal fonctionne selon le principe du venturi. La gorge est uniforme et sa longueur est égale au diamètre du conduit auquel il correspond. Comme le Palmer-Bowlus, sa section de contrôle est de forme rectangulaire.

Il comporte trois parties intégrées : la section convergente, la section de contrôle et la section de dérive.

Comme pour les Palmer-Bowlus, la grandeur des canaux Leopold-Lagco est définie par le diamètre du conduit dans lequel ils doivent être installés, et non par la largeur intérieure de la section de contrôle.

Il en existe trois modèles :

- modèle à installation permanente : possède une légère prolongation des sections de convergence et de dérive;
- modèle à insertion : le rayon extérieur du canal correspond au rayon intérieur du conduit dans lequel il doit être installé;
- modèle tronqué : la section de dérive est réduite sur la hauteur. Ce dernier est utilisé uniquement sur une base temporaire.

La surface intérieure du canal doit être fabriquée d'un matériau lisse et libre d'irrégularités. La surface extérieure est faite avec un matériau qui facilite son adhésion à une surface de béton.

Le canal est fabriqué en fibre de verre dans des dimensions standard variant entre 152 mm (6 po) et 1 219 mm (48 po). Des canaux plus grands, jusqu'à 1 829 mm (72 po), peuvent être manufacturés sur commande spéciale. Les dimensions standard sont, en millimètres et en pouces : 152 (6), 203 (8), 254 (10), 305 (12), 381 (15), 457 (18), 533 (21), 610 (24), 762 (30), 914 (36), 1 067 (42), et 1 219 mm (48 po)⁽¹⁴⁾.

3.3.2. Principe de fonctionnement

En raison de ses restrictions verticales et latérales, le canal Leopold-Lagco réduit l'aire d'écoulement, ce qui provoque un rehaussement du niveau d'eau en amont de la section de contrôle, suivi d'une chute du niveau d'eau, accompagnée d'une augmentation de la vitesse d'écoulement.

Le débit peut être obtenu en mesurant simplement la hauteur d'eau en amont du canal, puisqu'il est établi que la hauteur varie en fonction du débit.

La littérature ne fournit aucune information quant à son utilisation en écoulement noyé ni aucune formule de correction. Seule l'utilisation en écoulement libre devrait être acceptée.

3.3.3. Applications

Le canal Leopold-Lagco est utilisé comme élément primaire de mesure sur une base temporaire ou permanente. Comme tous les canaux de mesure, il est un bon outil pour mesurer le débit des eaux contenant des solides.

En raison de leur volume relativement faible, les canaux dont le diamètre est inférieur à 381 mm (15 po) peuvent être insérés dans un regard d'égout standard, sans qu'il soit nécessaire d'en modifier l'accès. Il est relativement facile à installer puisqu'il ne nécessite aucun différentiel de radier du conduit récepteur.

3.3.4. Dimensions

Les dimensions d'un canal Leopold-Lagco sont fonction du diamètre du conduit dans lequel le canal doit être installé. Tout comme le Parshall, les normes définissant les dimensions et la configuration du canal sont très rigides.

Selon le fabricant, un canal devrait être fabriqué selon les dimensions et la forme présentées au Tableau 12 - Canal Leopold-Lagco - Dimensions normatives selon F.B. Leopold Company, Inc. Tableau 12 - Canal Leopold-Lagco - Dimensions normatives selon F.B. Leopold Company, Inc. et à la Figure 15 - Forme d'un canal Leopold-Lagco - F.B. Leopold Company Inc.

3.3.5. Gamme de mesures

Les canaux Leopold-Lagco peuvent mesurer des débits variant entre 84,2 m³ par jour pour un canal de 152 mm (6 po) et 108 445 m³ par jour pour un canal de 1 219 mm (48 po).

Le Tableau 13 - Canal Leopold-Lagco - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre présente les débits minimaux et maximaux mesurables en écoulement libre, pour ce type de canal. Pour les fins du présent document, seules les données s'appliquant aux canaux dont les dimensions se situent entre 152 mm (6 po) et 1 219 mm (48 po) ont été retenues.⁽¹⁴⁾

3.3.6. Équation de débit en écoulement libre

L'équation de débit résultant de la hauteur/débit associé à un écoulement libre s'exprime comme suit :

$$Q = KH^n \quad (14)$$

où :

- Q est le débit en litres ou gallons américains par seconde;
- K est la constante selon la dimension du canal;
- H est la hauteur d'eau mesurée au point h₁ en mètres ou en pieds;
- n est la constante de l'exposant (1,547).

Le Tableau 13 - Canal Leopold-Lagco - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre présente les valeurs de la constante « K » pour la formule précitée.

Tableau 12 - Canal Leopold-Lagco - Dimensions normatives selon F.B. Leopold Company, Inc.

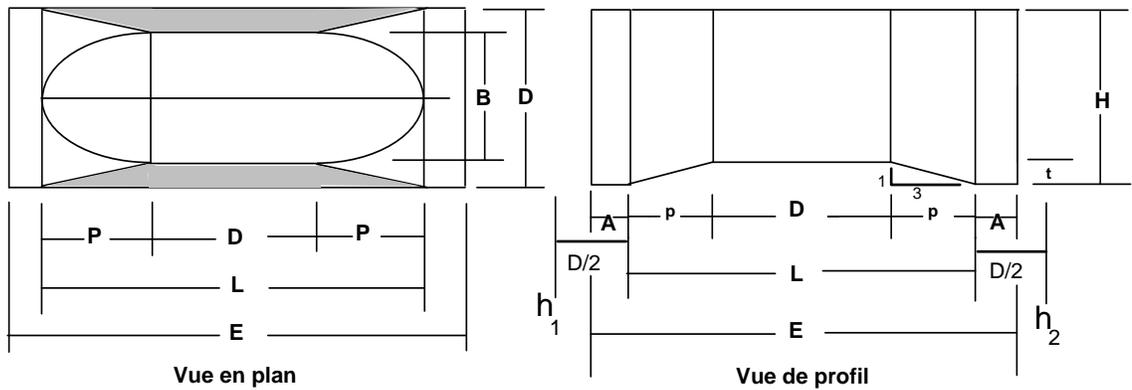
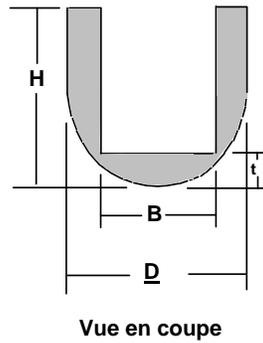
Note : mesures en millimètres et pouces

D	B	H	t	D/2	P	L	A	E
152 (6)	102 (4)	152 (6)	25 (1)	76 (3)	76 (3)	305 (12)	51 (2)	406 (16)
203 (8)	136 (5,3)	203 (8)	34 (1,3)	102(4)	102(4)	406 (16)	51 (2)	508 (20)
254 (10)	169 (6,7)	254 (10)	42 (1,7)	127 (5)	127 (5)	508 (20)	51 (2)	610 (24)
305 (12)	203 (8)	305 (12)	51 (2)	152 (6)	152 (6)	610 (24)	51 (2)	711 (28)
381 (15)	254 (10)	381 (15)	64 (2,5)	191 (7,5)	191 (7,5)	762 (30)	51 (2)	864 (34)
457 (18)	305 (12)	457 (18)	76 (3)	229 (9)	229 (9)	914 (36)	51 (2)	1016 (40)
533 (21)	356 (14)	533 (21)	89 (3,5)	267 (10,5)	267 (10,5)	1067 (42)	51 (2)	1168 (46)
610 (24)	406 (16)	610 (24)	102 (4)	305 (12)	305 (12)	1219 (48)	152 (6)	1524 (60)
762 (30)	508 (20)	762 (30)	127 (5)	381 (15)	381 (15)	1524 (60)	152 (6)	2134 (84)
914 (36)	610 (24)	914 (36)	152 (6)	457 (18)	457 (18)	1829 (72)	152 (6)	2438 (96)
1067 (42)	711 (28)	1067 (42)	178 (7)	533 (21)	533 (21)	2134 (84)	152 (6)	2743 (108)
1219 (48)	813 (32)	1219 (48)	203 (8)	610 (24)	610 (24)	2438 (96)	152 (6)	3048 (120)
1524 (60)	1016 (40)	1524 (60)	254 (10)	762 (30)	762 (30)	3048 (120)	152 (6)	3353 (132)
1676 (66)	1118 (44)	1676 (66)	279 (11)	838 (33)	838 (33)	3353 (132)	152 (6)	3658 (144)
1829 (72)	1219 (48)	1829 (72)	305 (12)	914 (36)	914 (36)	3658 (144)	152 (6)	3962 (156)

où :

- D est la dimension du canal qui est égale à la dimension nominale du conduit,
- B est la largeur de la gorge du canal ($2/3D$),
- H est la hauteur du canal ($=D$),
- T est la hauteur différentielle entre la base du canal et le radier du conduit ($D/6$),
- D/2 est la position du point de mesure,
- P est la longueur de la section inclinée de la base ($D/2$),
- L est la longueur totale de la base du canal ($2D$),
- A est le prolongement de la structure,
- E est la longueur totale de la structure.

Figure 15 - Forme d'un canal Leopold-Lagco - F.B. Leopold Company Inc.



Note : se référer au Tableau 12 - Canal Leopold-Lagco - Dimensions normatives selon F.B. Leopold Company, Inc. pour la signification des lettres.

Tableau 13 - Canal Leopold-Lagco - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre

Diamètre du canal mm (po)	Constante K	Hauteur minimum mm pi	DÉBIT MINIMUM		Hauteur maximum mm pi	DÉBIT MAXIMUM	
	Débit l/s gal _{US} /s		l/s gal _{US} /s	m ³ /j Mgal _{US} /j		l/s gal _{US} /s	m ³ /j Mgal _{US} /j
152 (6)	221,25 9,298	30 0,1	0,999 0,264	86,33 0,023	107 0,35	6,939 1,833	599,57 0,158
203 (8)	291,02 12,238	40 0,13	1,97 0,521	170,4 0,045	137 0,45	13,46 3,558	1 163,4 0,307
254 (10)	360 15,132	50 0,16	3,5 0,889	302,1 0,077	182 0,6	25,8 6,866	2 229,2 0,593
305 (12)	420,004 18,005	60 0,2	5,52 1,493	476,5 0,129	213 0,7	39,25 10,37	3 391,6 0,896
381 (15)	529,8 22,269	76 0,25	9,87 2,608	853,1 0,225	274 0,9	71,6 18,92	6 188,8 1,635
457 (18)	630,32 26,46	90 0,3	15,19 04,114	1 313,1 0,355	320 1,05	108,17 28,574	9 346 2,469
533 (21)	730,074 30,692	106 0,35	22,67 6,049	1 907,7 0,523	381 1,25	164,08 43,347	14 177 3,745
610 (24)	829,15 34,859	122 0,4	32 8,447	2 762,5 0,73	426 1,4	221,5 58,665	19 136 5,069
762 (30)	1 025,63 43,118	152 0,5	55,856 14,756	4 825,9 1,275	533 1,75	387,92 102,48	33 516 8,854
914 (36)	1 220,24 51,301	152 0,5	66,45 17,557	5 741,6 1,517	640 2,1	611,91 161,661	52 869 13,967
1067 (42)	1 413,35 59,418	198 0,65	115,504 30,514	9979,564 2,636	746 2,45	898,21 237,662	77 605 20,534
1219 (48)	1 605,15 67,482	198 0,65	131,179 34,655	11 333,8 2,994	853 2,8	1 256,15 331,851	108 531 28,672

Note : Les valeurs présentées au tableau sont valables pour les canaux fabriqués par F.B. Leopold Company Inc.

3.3.7. Capacité de mesure d'un canal

La capacité maximale (Q_{\max}) de mesure pour ce type de canal résulte de la hauteur maximale (h_{\max}) de mesure permise, qui est de l'ordre de 70 % de la dimension nominale du canal (D).

Ainsi, pour un canal dont la dimension nominale est de 457 mm (18 po), la hauteur maximale permise serait de 320 mm (12,6 po).

3.3.8. Précision

La précision de la mesure de débit est comparable à celle obtenue avec d'autres types de canaux. D'après le fabricant, ce canal provoque, au point de mesure, une hauteur d'eau telle que l'erreur associée à l'évaluation du débit est de l'ordre de 2 %, pourvu que les conditions physiques particulières d'installation soient observées⁽¹⁵⁾.

En pratique, la mesure du débit est effectuée avec une erreur de ± 5 % par rapport à la valeur réelle.

3.3.9. Sources d'erreur

Les principales sources d'erreur, qui diminuent la précision du canal, sont :

- les modifications aux dimensions standard lors de l'installation :

Largeur de la gorge : il importe de s'assurer, lors de l'installation, que le canal n'est pas déformé, écrasé ou tordu, et qu'il conservera ses dimensions et sa forme originales;

Contrôle de l'horizontalité : si le canal n'est pas de niveau sur la transversale, la hauteur d'eau devrait être mesurée sur chacun des côtés du canal pour établir la hauteur moyenne et la relation hauteur/débit;

Position longitudinale : le canal peut être légèrement incliné en aval, soit de 6 mm au maximum pour les canaux de petite dimension {610 mm (24 po) et moins} et 20 mm au maximum pour les canaux de grande dimension;

Longueur du canal : s'il est nécessaire d'apporter des modifications sur le sens de la longueur, ces modifications devraient être faites sur la partie en aval seulement, après une rigoureuse évaluation des effets sur la précision de mesure.

- position erronée du point de mesure :

Pour tous les canaux de ce type, le point de mesure doit être situé en amont du canal de mesure, à une distance égale à la moitié du diamètre du canal ($D/2$), laquelle distance est mesurée à partir du début de la remontée entre la crête (plateau) du canal et le radier du conduit;

La hauteur d'eau doit être mesurée à partir de la crête du canal et non pas à partir du radier du conduit.

- sensibilité de la mesure de la hauteur d'eau :

Comme les variations de hauteur associées aux variations de débit sont faibles, il est nécessaire, pour la détection du niveau du liquide, de mettre en place un appareil très sensible.

- approche inadéquate :

Ce type de canal n'a pas de section convergente qui permet de corriger les distorsions des vitesses d'approche et leur distribution. (Le lecteur peut se référer à la section 3.3.11, qui traite des conditions d'installation, pour connaître les règles qui régissent l'approche.)

- mauvaise technique de mesure en écoulement noyé :

Il arrive souvent que l'utilisateur, par manque de connaissances, ne sache reconnaître et évaluer un écoulement noyé, et mesure le débit sans tenir compte de cette situation.

- obstructions dans la gorge du canal :

Il importe de s'assurer que rien ne bloque la gorge du canal de mesure et fausse la hauteur d'eau en obligeant l'écoulement à passer par-dessus l'obstacle (principalement avec les canaux de petites dimensions).

- utilisation de la table hauteur/débit

Il importe de s'assurer que la table de conversion hauteur/débit ainsi que la formule d'intégration du débitmètre soient identiques à celles émises par le fournisseur du canal. De plus, la hauteur maximale de mesure recommandée ne devrait jamais être excédée.

3.3.10. Critères de sélection

Bien que l'installation d'un canal de type Parshall soit privilégiée pour un site permanent de mesure, il peut arriver qu'un canal Leopold-Lagco soit adéquat.

Comme il arrive souvent que plusieurs modèles de canaux Leopold-Lagco soient disponibles pour mesurer la gamme de débits escomptée, plusieurs autres points sont à considérer lors du choix du canal. Ces points sont :

- l'écoulement : il importe de choisir un canal dont la dimension sera suffisante pour permettre à tous les régimes hydrauliques, selon les contraintes d'installation, une opération en écoulement libre;
- le diamètre du conduit;
- les débits minimal et maximal à être mesurés;
- la sensibilité requise pour détecter et mesurer la variation de niveau de l'eau associée à une variation minimale de débit;
- la précision désirée.

3.3.11. Particularités d'installation

Le canal Leopold-Lagco s'installe directement dans le conduit d'égout, fixé au radier de ce dernier, généralement dans une section droite de l'écoulement, dans un regard d'accès.

Il doit être installé dans un conduit dont la pente de la section d'approche est inférieure à 2 % pour les petits canaux, et inférieure à 1 % pour les canaux de 762 mm (30 po) et plus. Lorsque la pente du conduit est trop prononcée, il est possible de relever légèrement le canal afin de la réduire.

Lors de la mise en place du canal, il importe d'assurer l'intégrité des caractéristiques physiques originales.

L'installation doit permettre un rehaussement du niveau d'eau en amont. Ce rehaussement doit survenir à une distance en amont suffisante, soit de l'ordre 10 diamètres de conduit.

La longueur de la section d'approche doit être d'au moins 25 fois la dimension du conduit d'amenée.

Au point de mesure, l'écoulement doit être uniforme, bien distribué et calme. Aucune vague de surface ne doit être présente.

Lorsque le canal installé est de dimension inférieure au diamètre du conduit, il doit être équipé d'une section de transition dont la longueur est égale à quatre fois le diamètre du conduit dans lequel le canal est installé. De plus, cette section de transition doit être reliée au conduit par une section réductrice dont l'angle de réduction ne dépasse pas 30°.

Une pente prononcée du conduit aval n'affectera pas la précision des mesures. Une telle pente n'est cependant pas nécessaire, bien qu'elle puisse aider à maintenir un écoulement libre.

Après la section de dérive, il ne doit y avoir aucune courbe prononcée qui puisse restreindre l'écoulement et causer un écoulement noyé.

3.3.12. Écoulement noyé

Le débit est dit en écoulement noyé dès que le niveau d'eau en aval atteint le niveau du seuil de mesure.

La mesure en écoulement noyé doit être évitée. Lors de l'installation, toutes les précautions doivent être prises pour éviter une telle situation, quitte à relever le radier du canal ou à augmenter la pente du conduit en aval.

3.3.13. Pertes de charge

Le canal Leopold-Lagco cause de très faibles pertes de charge. Pour un canal dont la dimension nominale correspond à celle du conduit dans lequel il est installé, la hauteur d'eau en amont ne devrait pas dépasser 90 % de la hauteur nominale du conduit, au débit maximal.

3.3.14. Modifications au canal

Lorsque l'espace est trop restreint pour permettre l'installation du canal, il est possible de modifier ce dernier afin de permettre son insertion. Les modifications permises sont :

- réduire la hauteur des sections de dérive et de contrôle du canal, en le coupant à angle. Il pourra être coupé à partir du dessus, vis-à-vis le centre du seuil, jusqu'à la fin du canal, à mi-hauteur;
- couper le canal verticalement à tout endroit situé entre la fin du seuil et la fin du canal.

3.3.15. Étalonnage

La section 2.12.13 traite de étalonnage.

En raison de la grosseur des réservoirs disponibles, l'utilisation de la méthode volumétrique est généralement limitée à des canaux de 762 mm (30 pouces) et moins.

Lors de l'étalonnage, la hauteur d'eau dans le canal, au point de mesure, ne doit pas varier de plus de 3,5 %, peu importe la méthode utilisée.

Pour les installations temporaires, une simple vérification des conditions suivantes sera suffisante :

- le canal est de niveau sur les plans longitudinal et transversal;
- la vitesse de l'écoulement en amont du canal est inférieure à 0,6 m (2 pieds)/seconde.;
- l'absence de vagues et de turbulence en amont du canal;
- l'écoulement est libre;
- l'absence de fuites dans la structure du canal.

3.4. Canal tronqué (Cutthroat)

Le canal tronqué (Cutthroat) a été conçu vers le milieu des années soixante par le laboratoire de recherche sur l'eau de l'université de l'Utah. Il est utilisé pour mesurer le débit dans des endroits où la pente est absente ou négligeable⁽⁴⁾.

3.4.1. Description

Le canal Tronqué (Cutthroat) comprend une section convergente et une section de dérive. La section de contrôle (W) n'a pas de côtés parallèles puisqu'elle est simplement formée par la rencontre de la section convergente et de la section de dérive. Le fond du canal est plat sur toute sa longueur⁽¹⁶⁾.

Pour les canaux de moins de 1,37 m (4,5 pi) de longueur (L) et 15,2 cm (0,5 pi) de largeur à la section de contrôle (W), l'entrée de la section convergente peut être arrondie. Pour les canaux de plus grande dimension, l'entrée de la section convergente peut présenter des parois verticales orientées à 30° de l'axe⁽¹⁶⁾.

Afin de prévenir l'érosion provoquée par la chute d'eau, la dérive sera généralement prolongée de parois verticales, dont l'orientation avec l'axe, sera supérieure à l'orientation des parois de la dérive.

3.4.2. Principe de fonctionnement

Le canal tronqué fonctionne selon le principe du venturi. En raison du profil latéral de ses parois, le canal restreint l'aire d'écoulement, ce qui provoque un rehaussement du niveau d'eau en amont de la section de contrôle, suivi d'une chute soudaine et importante du niveau d'eau dans la section de contrôle, accompagnée d'une augmentation de la vitesse d'écoulement. Le débit peut être obtenu en mesurant simplement la hauteur d'eau, puisque la hauteur varie proportionnellement au débit.

Bien qu'il soit possible d'utiliser ce canal en écoulement noyé, il est fortement recommandé de l'utiliser en écoulement libre. En écoulement libre, la mesure du débit peut être obtenue avec un seul point de mesure, alors qu'en écoulement noyé, il est nécessaire de mesurer également la hauteur en aval de la section de contrôle⁽⁶⁾⁽¹⁶⁾.

3.4.3. Applications

Le canal tronqué a été développé pour mesurer le débit dans des canaux ouverts naturels, tels que les rivières, ruisseaux, fossés de drainage, etc., dont la pente est négligeable. Il a été l'objet de quelques études démontrant que son utilisation comme élément de mesure dans les réseaux d'égout et les usines de traitement pouvait être fort efficace⁽¹⁷⁾.

En effet, la géométrie et le principe de fonctionnement du canal tronqué font de celui-ci un très bon outil pour mesurer le débit des eaux contenant des solides. Comme ce canal n'entraîne que de faibles pertes de charge et ne nécessite aucun différentiel de niveau du radier, il est assez facile de l'adapter aux réseaux d'égout existants.

De plus, sa fabrication étant assez simple et peu onéreuse, il peut parfaitement convenir à une installation temporaire de mesure.

3.4.4. Dimensions

La dimension d'un canal tronqué est définie par la longueur totale du canal (L) et la largeur de la section de contrôle (étranglement) (W).

La Figure 16 - Canal tronqué - Caractéristiques physiques présente les caractéristiques physiques du canal tronqué et le Tableau 14 - Canal Tronqué - Dimensions normalisées, les dimensions précises que doit avoir ce canal.

Figure 16 - Canal tronqué - Caractéristiques physiques

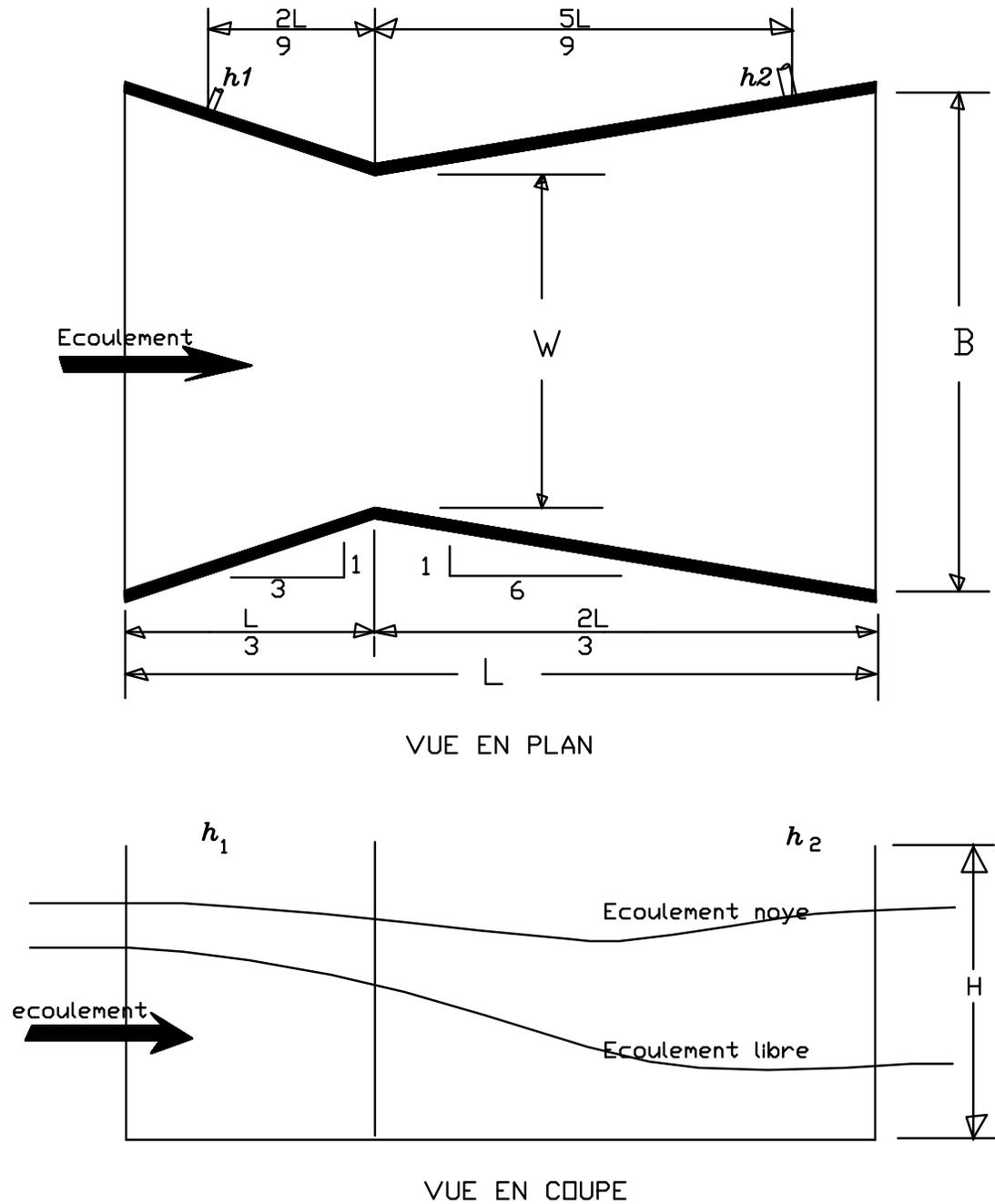


Tableau 14 - Canal Tronqué - Dimensions normalisées

Dimension en millimètres et pieds

L	W	L 1	L 2	B	H	h 1	h 2			
2743 9'	1829 ± 0,8 6' ± 1/32"	914	1829	2438 8'	914	610	1524			
	1219 ± 0,8 4' ± 1/32"			1829 6'						
	610 ± 0,8 2' ± 1/32"	3'	6'	1219 4'				3'	2'	5'
	305 ± 0,8 1' ± 1/32"			914 3'						
1372 4,5'	610 ± 0,8 2' ± 1/32"	457	914	914 3'	457	305	762			
	305 ± 0,8 1' ± 1/32"			610 2'						
	152 ± 0,4 0,5' ± 1/64"	1,5'	3'	457 1,5'				1,5'	1'	2,5'
	76 ± 0,4 0,25' ± 1/64"			381 1,25'						
914 3'	406 ± 0,8 1,33' ± 1/32"	305	610	610 2'	305	203	508			
	203 ± 0,8 0,67' ± 1/32"			406 1,33'						
	102 ± 0,4 0,33' ± 1/64"	1'	2'	305 1'				1'	0,667'	1,667'
	51 ± 0,4 0,17' ± 1/64"			254 0,834'						
457 1,5'	203 ± 0,8 0,67' ± 1/32"	152	305	305 1'	152	102	254			
	102 ± 0,4 0,33' ± 1/64"			203 0,667'						
	51 ± 0,4 0,17' ± 1/64"	0,5'	1'	152 0,5'				0,5'	0,33'	0,83'
	25 ± 0,4 0,083' ± 1/64"			127 0,416'						

où :

L : est la longueur totale du canal

L1 : est égal à L/3

L2 : est égal à 2L/3

B : est égal à W + L/4,5

H : est égal à L/3

h1 : est égal à 2L/9

h2 : est égal à 5L/9

3.4.5. Gamme de mesures

Les canaux tronqués peuvent mesurer des débits variant entre 32 m³ par jour, pour un canal de 457 mm (1,5 pi) de longueur dont l'étranglement est de 25 mm (0,083 pi), et 210 555 m³ par jour, pour un canal de 2743 mm (9 pi) de longueur dont l'étranglement est de 1829 mm (6 pi).

Le Tableau 15 - Canal tronqué - Débits minimaux et maximaux recommandés en écoulement libre présente les débits minimal et maximal recommandés en écoulement libre. Les données incluses au Tableau 15 s'appliquent aux canaux dont l'étranglement se situe entre 25 mm (0,083 pi) et 1829 mm (6 pi) et dont la longueur varie entre 457 mm (1,5 pi) et 2743 mm (9 pi).

3.4.6. Équation de débit en écoulement libre

L'équation de débit résultant de la hauteur/débit associée à un écoulement libre s'exprime comme suit⁽¹⁶⁾ :

$$Q = Ch_1^{n_1} \quad (15)$$

où :

- Q est le débit en mètres cubes ou pieds cubes par seconde;
- C est $KW^{1,025}$;
- K est la constante selon la longueur du canal et l'unité de mesure;
- W est la dimension de l'étranglement en mètres ou en pieds;
- h_1 est la hauteur d'eau mesurée en amont de l'étranglement (W) en mètres ou en pieds;
- n_1 est la constante de l'exposant selon la longueur du canal de mesure⁽¹⁶⁾.

Tableau 15 - Canal tronqué - Débits minimaux et maximaux recommandés en écoulement libre

Dimensions du canal en mm et pieds		Hauteur minimum mm (pi)	DÉBIT MINIMUM		Hauteur maximum mm (pi)	DÉBIT MAXIMUM	
L	W		l/sec	m ³ /j		l/sec	m ³ /j
2743 9'	1829 6'	183	280,13	24 219	732	2 437	210 555
	1219 4'		184,99	15 983		1 608	138 954
	610 2'	0,6'	90,91	7 855	2,4'	790	68 284
	305 1'		44,67	3 859		388	48 297
1372 4,5'	610 2'	91	35,06	914 3'	457	305	26 333
	305 1'		17,23	610 2'		150	12 941
	152 0,5'	0,3'	8,47	457 1,5'	1,5'	74	6 359
	76 0,25'		4,16	381 1,25'		36	3 125
914 3'	406 1,33'	61	13,9	1 200	305	120,8	10 436
	203 0,67'		6,8	590		59,4	5 132
	102 0,33'	0,2'	3,4	289	1'	29,15	2 519
	51 0,17'		1,65	143		14,4	1 242
457 1,5'	203 0,67'	30	3,14	271	152	27,3	2 360
	102 0,33'		1,54	129		13,4	1 158
	51 0,17'	0,1'	0,76	66	0,5'	6,61	571
	25 0,083'		0,37	32		3,23	279

Le Tableau 16 - Canal tronqué - Valeurs des coefficients C et K en écoulement libre présente les valeurs des coefficients C et K pour la mesure du débit en écoulement libre, selon le système anglais et le système métrique. Le Tableau 17 - Canal tronqué - Équations de débit en écoulement libre (système anglais) présente les équations de débit pour les canaux tronqués, en écoulement libre, pour des valeurs exprimées en pi^3 par seconde et en millions de gallons US par jour alors que le Tableau 18 - Canal Tronqué - Équations de débit en écoulement libre (métrique) présente les équations pour des valeurs exprimées en m^3 par seconde et en m^3 par jour.

3.4.7. Précision

Le canal tronqué permet en écoulement libre une précision comparable à celle des autres canaux de mesure, à condition que tous les critères de fabrication et d'utilisation soient respectés. En écoulement noyé, la méthode standard de mesure (mesure en un seul point) conserve sa précision jusqu'à ce que le rapport h_2/h_1 atteigne 85 %⁽¹⁷⁾.

3.4.8. Sources d'erreur

Les principales sources d'erreur, qui diminuent la précision du canal sont les suivantes :

- les modifications aux dimensions standard lors de la fabrication du canal ou lors de son installation :

Largeur de la gorge : pour les canaux de petites dimensions, une différence de 4 mm (1/64 po) seulement, par rapport à la dimension standard, est tolérée. Pour les canaux de plus grande dimension, l'écart acceptable est de 8 mm (1/32 po) (voir Tableau 14 - Canal Tronqué - Dimensions normalisées);

Longueur de la section convergente : cette section ne peut être réduite, mais rien ne s'oppose à sa prolongation. Cependant, le point de mesure doit demeurer à la position standard;

Tableau 16 - Canal tronqué - Valeurs des coefficients C et K en écoulement libre

Dimensions du canal en mm et pieds		Système anglais		Système métrique		n l
L	W	C	K	C	K	
2743 9'	1829 6'	22	3,5	3,966	2,137	1,56
	1219 4'	14,49		2,164		
	610 2'	7,11		1,287		
	305 1'	3,5		0,631		
1372 4,5'	610 2'	8,01	3,98	1,462	2,431	1,72
	305 1'	3,98		0,717		
	152 0,5'	1,96		0,353		
	76 0,25'	0,96		0,173		
914 3'	406 1,33'	6,04	4,5	1,091	2,749	1,84
	203 0,67'	2,97		0,536		
	102 0,33'	1,459		0,262		
	51 0,17'	0,719		0,128		
457 1,5'	203 0,67'	4,03	6,1	0,727	3,725	2,15
	102 0,33'	1,975		0,355		
	51 0,17'	0,974		0,173		
	25 0,083'	0,494		0,085		

Tableau 17 - Canal tronqué - Équations de débit en écoulement libre (système anglais)

DIMENSION DU CANAL en pieds			ÉQUATION DE DÉBIT	
L	W	H	pi ³ /s	Mgal _{US} /j
9'	6'	3'	$3,5(W)^{1,025}(H)^{1,56}$	$2,262(W)^{1,025}(H)^{1,56}$
	4'			
	2'			
	1'			
4,5'	2'	1,5'	$3,98(W)^{1,025}(H)^{1,72}$	$2,572(W)^{1,025}(H)^{1,72}$
	1'			
	0,5'			
	0,25'			
3'	1,333'	1'	$4,5(W)^{1,025}(H)^{1,84}$	$2,908(W)^{1,025}(H)^{1,84}$
	0,667'			
	0,333'			
	0,167'			
1,5'	0,667'	0,5'	$6,1(W)^{1,025}(H)^{2,15}$	$3,942(W)^{1,025}(H)^{2,15}$
	0,333'			
	0,167'			
	0,083'			

Tableau 18 - Canal Tronqué - Équations de débit en écoulement libre (métrique)

DIMENSION DU CANAL en mètres			ÉQUATION DE DÉBIT	
L	W	H	m ³ /sec	M ³ /j
2,743	1,828	0,914	$2,137(W)^{1,025}(H)^{1,56}$	$184637(W)^{1,025}(H)^{1,56}$
	1,219			
	0,609			
	0,304			
1,371	0,609	0,457	$2,431(W)^{1,025}(H)^{1,72}$	$210038(W)^{1,025}(H)^{1,72}$
	0,304			
	0,152			
	0,076			
0,914	0,406	0,305	$2,749(W)^{1,025}(H)^{1,84}$	$237514(W)^{1,025}(H)^{1,84}$
	0,203			
	0,101			
	0,050			
0,457	0,203	0,152	$3,725(W)^{1,025}(H)^{2,15}$	$321840(W)^{1,025}(H)^{2,15}$
	0,101			
	0,050			
	0,025			

Horizontalité : si la base du canal n'est pas de niveau par rapport à l'axe transversal, la hauteur moyenne doit être utilisée pour établir la relation hauteur/débit, c'est-à-dire que la hauteur doit être mesurée sur chacun des côtés du canal pour établir la hauteur moyenne;

Longitudinale : si le canal n'est pas de niveau sur le plan longitudinal, c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement, l'erreur de mesure s'accroît avec l'importance de la pente et diminue avec la longueur du canal. Ainsi, pour un canal de 457 mm (1,5 pi) de longueur, une pente positive de 2 % produit une erreur de mesure de l'ordre de 8 % et une pente positive de l'ordre de 10 % produit une erreur de mesure de l'ordre de 45 %. Par contre, pour un canal de 1 371 mm (4,5 pi) de longueur, une pente positive de 2 % produit une erreur de mesure de l'ordre de 0,5 % et une pente positive de l'ordre de 10 % produit une erreur de mesure de l'ordre de 30 %⁽¹⁸⁾.

- position erronée du point de mesure

Pour toutes les dimensions, les points de mesure en amont (h_1) et en aval (h_2), doivent être situés respectivement à une distance égale à $2 L/9$ et $5 L/9$ de l'étranglement (L étant la longueur totale du canal). Cette distance doit être mesurée parallèlement à l'axe central du canal.

- approche inadéquate

La section convergente du canal est trop courte pour corriger adéquatement toutes les distorsions importantes de vitesse d'approche et de distribution. (Le lecteur peut se référer à la section 3.4.10, qui traite des conditions d'installation, pour connaître les règles qui régissent l'approche).

- mauvaise technique de mesure en écoulement noyé

Il arrive souvent que l'utilisateur, par manque de connaissances, ne sache reconnaître et évaluer le degré de l'écoulement noyé, et mesure le débit en un seul endroit au lieu des deux points de mesure prescrits pour cette situation.

- obstructions dans la gorge du canal

Il importe de s'assurer que rien ne bloque la gorge du canal de mesure et fausse la hauteur d'eau en obligeant l'écoulement à passer par-dessus l'obstacle (principalement avec les canaux de petites dimensions).

- l'érosion à la sortie du canal

Il faut s'assurer que l'érosion n'entraîne pas le déplacement du canal de sa position originale.

3.4.9. Critères de sélection

Bien que l'installation d'un canal Parshall soit privilégiée pour un site permanent de mesure, un canal tronqué peut s'avérer adéquat.

Comme il arrive souvent que plusieurs canaux tronqués soient disponibles pour mesurer la gamme de débits escomptée, plusieurs autres points sont à considérer lors du choix du canal. Ces points sont :

- l'écoulement : il importe de choisir un canal dont la dimension sera suffisante pour permettre au débit maximal, selon les contraintes d'installation, un fonctionnement en écoulement libre;
- la perte de charge : pour un même débit, l'importance de la remontée du niveau d'eau associée à la mise en place de canaux de dimensions différentes;
- la sensibilité requise pour détecter et mesurer la variation du niveau de l'eau associée à une variation minimale de débit;
- la précision désirée;
- l'ensemble des travaux requis pour mettre en place des canaux de différentes dimensions;
- les coûts associés à l'installation des canaux de différentes dimensions.

3.4.10. Particularités d'installation

Lors de la mise en place du canal, il faut s'assurer que les caractéristiques physiques du canal correspondent à celles indiquées à la Figure 16 - Canal tronqué - Caractéristiques physiques et au Tableau 14 - Canal Tronqué - Dimensions normalisées.

Le radier de la section convergente du canal peut être au même niveau que le radier du conduit d'amenée, si une telle installation ne provoque pas un écoulement noyé (h_2/h_1) supérieur à la valeur transitoire d'écoulement (S_t). Cette valeur transitoire (S_t) est établie comme suit⁽¹⁶⁾ :

Longueur totale du canal (L)	Valeur transitoire d'écoulement (S_t)
457 mm (1,5 pi)	60 %
914 mm (3,0 pi)	65 %
1372 mm (4,5 pi)	70 %
2743 mm (9,0 pi)	80 %

Pour réduire ou éliminer l'écoulement noyé, le canal peut être relevé et le radier du conduit d'amené, relié au radier de la section convergente, par une section à pente inversée ayant un rapport 1 : 4 (vertical : horizontal), si la hauteur d'eau anticipée ne provoque pas un débordement hors du réseau.

La longueur de la section d'approche doit avoir au moins vingt fois le diamètre du conduit d'amenée.

Dans la section d'approche, la pente devrait être inférieure à 1 %. Il faut éviter qu'une pente trop prononcée ne produise un ressaut dans la section convergente du canal (voir Figure 7 - Canal Parshall - Pente de la section d'approche), ou ne provoque une trop grande vitesse, qui aurait pour effet d'amoinrir la remontée de la hauteur d'eau dans la section convergente.

Le canal d'approche devrait avoir une largeur minimale conforme à la dimension « B » du Tableau 14 - Canal Tronqué - Dimensions normalisées et une largeur maximale n'excédant pas cette dimension de plus de 10 mètres. Il importe d'éviter d'introduire le conduit d'amenée des eaux directement dans la section convergente du canal (voir Figure 8 - Canal Parshall - Union des sections d'approche et de convergence).

À la sortie du canal, la pente devrait être suffisante pour permettre l'évacuation rapide de l'eau. La chute devrait être de l'ordre de 2 %.

Après la section de dérive, il ne devrait y avoir aucune courbe prononcée qui puisse restreindre l'écoulement et causer un refoulement.

Le conduit du puits de stabilisation, au point de mesure h_1 , doit être situé au deux tiers (2/3) de la longueur de la section convergente. Cette distance est mesurée parallèlement au sens de l'écoulement. Le conduit est placé à angle droit avec la paroi, et à ras avec la paroi.

Le conduit du puits de stabilisation, au point de mesure h_2 , doit être situé dans la section de dérive du canal, à une distance égale au 5/6 de la longueur de la section de dérive. Cette distance est mesurée parallèlement au sens de l'écoulement. Le conduit est placé à angle droit et à ras avec la paroi.

3.4.11. Écoulement noyé

On pourrait s'attendre à un écoulement noyé dès que l'eau atteint le seuil de la section convergente; mais tel n'est pas le cas. Le débit n'est pas réduit tant que le rapport h_2/h_1 , exprimé en pourcentage, n'excède pas les valeurs transitoires d'écoulement (S_t) établies à la section 3.4.10.

Lorsque la hauteur en aval (h_2) est supérieure au seuil de la section convergente, la mesure de la hauteur en amont (h_1) et de la hauteur en aval (h_2) doit être faite simultanément. Lorsque le rapport h_2/h_1 est supérieur à la valeur transitoire d'écoulement (S_t), l'écoulement est dit noyé, et le débit est établi à partir de la mesure simultanée des deux hauteurs h_1 et h_2 .

Comme on ne dispose présentement d'aucun instrument commercial capable de faire simultanément ces mesures et les calculs, la mesure en écoulement noyé doit être évitée.

Le rapport h_2/h_1 peut atteindre la valeur transitoire d'écoulement (S_t) avant que la réduction de débit soit significative. Cependant, au-delà de cette valeur transitoire, la réduction du débit s'accroît de façon exponentielle.

Lorsque le rapport h_2/h_1 atteint 100 %, il n'y a plus de débit. Cependant, 95 % est la valeur considérée comme étant la limite où le canal tronqué est utilisable. La différence entre h_1 et h_2 est si faible que la moindre erreur de mesure de hauteur résulte en de grandes imprécisions. Il est donc exclu d'utiliser ce type de canal en écoulement noyé lorsque le rapport h_2/h_1 est supérieur à 0,95.

Les canaux de moins de 914 mm (3 pi) de longueur ne doivent jamais être utilisés en écoulement noyé.

3.4.12. Équation de débit en écoulement noyé

Pour ce type de régime hydraulique, l'équation de débit résultant de la mesure h_1 et h_2 s'exprime comme suit ⁽¹⁸⁾ :

$$Q = \frac{C_1 (h_1 - h_2)^{n_1}}{(-\log S)^{n_2}} \quad (16)$$

où :

- Q est le débit en mètres cubes ou pieds cubes par seconde;
- C_1 est $KW^{1,025}$;
- h_1 est la hauteur amont, en mètres ou en pieds;
- h_2 est la hauteur en aval, en mètres ou en pieds;
- n_1 est la constante de l'exposant selon la longueur du canal de mesure ⁽¹⁸⁾;
- S est le rapport entre h_1 (la hauteur en amont) et h_2 (la hauteur en aval) : h_2/h_1 ;
- n_2 est l'exposant en écoulement noyé selon la longueur du canal ($n_2=n_1$);
- K est la constante selon la longueur du canal et l'unité de mesure;
- W est la dimension de l'étranglement en mètres ou en pieds.

Le Tableau 19 - Canal tronqué - Valeurs des coefficients C et K en écoulement noyé présente les valeurs de K et de C en écoulement noyé.

3.4.13. Perte de charge

Avant d'installer un canal, il faut vérifier que la remontée du niveau d'eau dans le réseau d'évacuation ne cause pas de refoulement des égouts dans les sous-sols des bâtiments. Pour évaluer cette remontée (R), on utilise la formule suivante ⁽¹⁹⁾ :

$$R = h_1 + r_c + r_i - H_c \quad (17)$$

où :

- R représente la remontée d'eau dans la section en amont du canal;
- H_c représente la hauteur d'eau dans le conduit, avant l'installation du canal, au débit maximal;
- h_1 représente la hauteur d'eau anticipée au point de mesure en amont de la section de contrôle;
- r_i représente la hauteur du radier du conduit;
- r_c représente la hauteur du radier du canal.

Les unités sont les mètres ou les pieds.

Tableau 19 - Canal tronqué - Valeurs des coefficients C et K en écoulement noyé

Dimensions du canal en mm et pieds		Système anglais		Système métrique		n l
L	W	C	K	C	K	
2743 9'	1829 6'	10,6	1,688	1,95	1,05	1,39
	1219 4'	6,97		1,286		
	610 2'	3,43		0,633		
	305 1'	1,688		0,311		
1372 4,5'	610 2'	4,575	2,275	0,994	1,65	1,41
	305 1'	2,275		0,489		
	152 0,5'	1,12		0,239		
	76 0,25'	0,548		0,118		
914 3'	406 1,33'	2,465	2,58	0,843	2,125	1,48
	203 0,67'	1,705		0,415		
	102 0,33'	0,837		0,205		
	51 0,17'	0,413		0,101		
457 1,5'	203 0,67'	2,14	3,25	0,771	3,95	1,741
	102 0,33'	1,048		0,381		
	51 0,17'	0,516		0,187		
	25 0,083'	0,261		0,09		

- définir la dimension du canal susceptible de mesurer le débit maximal attendu avec la plus faible condition d'écoulement noyé;
- définir le rapport entre les hauteurs, en écoulement noyé (h_2/h_1);
- établir à quelle distance du radier (r_i) du conduit sera installé le radier (r_c) du canal ($r_c - r_i$).

Lorsque cette évaluation de la remontée du niveau d'eau est terminée, il est nécessaire de vérifier les radiers des sous-sols des bâtiments, afin de s'assurer que l'installation choisie ne présente aucun risque de débordement.

3.4.14. Modifications au canal

Il importe d'utiliser un canal dont les dimensions correspondent exactement à celle d'un canal étalonné, car la relation hauteur/débit pour ce type de canal ne peut être obtenue que par un étalonnage direct du canal. On ne peut, à partir de l'étalonnage d'un canal de petite dimension, obtenir la relation hauteur/débit pour un canal de plus grande taille ⁽²⁰⁾.

Pour des applications particulières, il peut être nécessaire de fabriquer un canal dont la gorge sera de largeur différente de celles présentées au Tableau 14 - Canal Tronqué - Dimensions normalisées. La valeur de C peut être obtenue à partir de l'équation suivante ⁽²⁰⁾.

$$C = K W^{1,025} \quad (18)$$

3.4.15. Étalonnage

La section 2.12.13 traite de l'étalonnage.

En raison de la grosseur des réservoirs disponibles, l'utilisation de la méthode volumétrique est généralement limitée à des canaux dont les dimensions sont inférieures à 1 372 mm (4,5 pieds) de longueur et 610 mm (2 pieds) d'étranglement.

Lors de l'étalonnage, la hauteur d'eau dans le canal, au point de mesure, ne doit pas varier de plus de 4 %, peu importe la méthode utilisée.

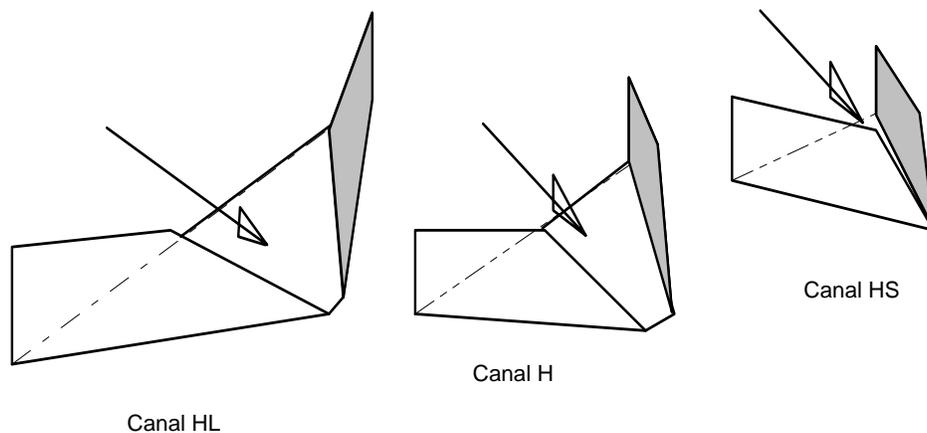
3.5. Canal en H

Le canal en H a été conçu vers le milieu des années trente par le Service de conservation des sols du département américain de l'agriculture ⁽²⁰⁾. Il y a trois catégories de canaux en H : les Hs, les H et les HL, qui ont tous la même forme, mais qui diffèrent par leurs dimensions et leurs angles.

3.5.1. Description

Le canal en H résulte de la combinaison des caractéristiques physiques et mécaniques du déversoir et du canal. De par sa forme, il ressemble plus à un déversoir triangulaire qu'à un canal. Au point de vue mécanique, il permet, comme les canaux de mesure, d'évacuer les solides ⁽⁴⁾.

Il comprend deux sections : approche et contrôle ⁽²⁰⁾.



La section d'approche est formée par les côtés convergents, alors que la section de contrôle est conçue par l'ouverture qui résulte de la forme donnée aux côtés convergents.

Les côtés convergents sont coupés à angle, soit 28° pour les Hs, 42° pour les H et 55° pour les HL, par rapport à la verticale (voir Figure 17 - Canal Hs - Caractéristiques physiques, Figure 18 - Canal H - Caractéristiques physiques et Figure 19 - Canal HL - Caractéristiques physiques). L'assemblage des cotés forme une ouverture trapézoïdale, étroite à la base et large au sommet. L'angle de l'ouverture formée par les côtés est de 27° pour les canaux Hs, de 37° pour les H et de 45° pour les HL, par rapport à la ligne d'écoulement.

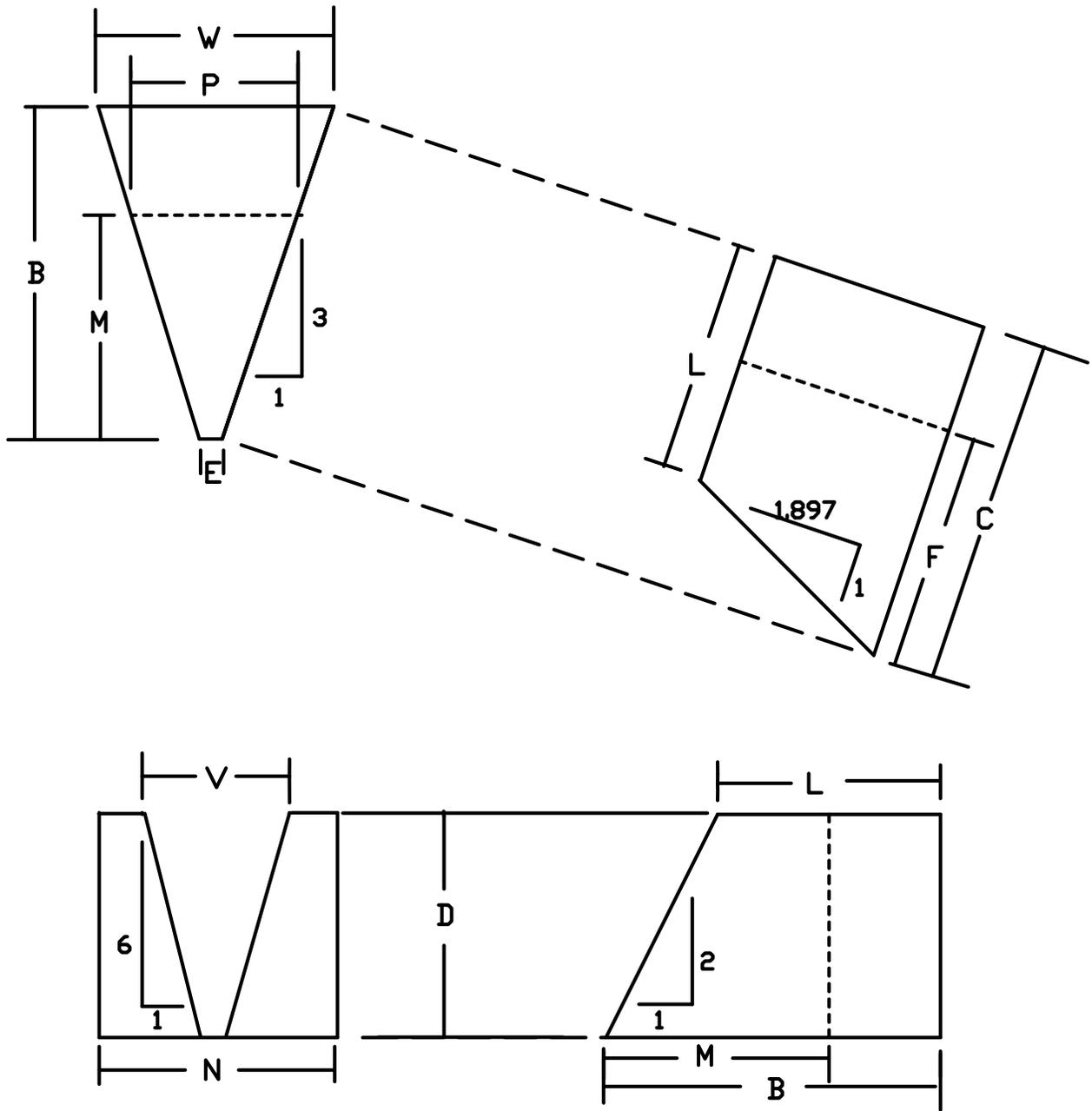
Le fond du canal est généralement plat sur son entier. Il arrive que le canal en H ait un fond incliné, afin de faciliter l'évacuation des solides lorsque le débit est faible. L'inclinaison de l'ordre de 7° ⁽²¹⁾, est sur l'axe transversal (voir Figure 18 - Canal H - Caractéristiques physiques).

Le nom des canaux découle de la dimension de l'appareil utilisé. Ainsi, un canal de petites dimensions sera du type H_s, un canal régulier, du type H; et un canal de grande dimension, du type H_L. Pour une identification rapide, on utilise le rapport entre la largeur et la hauteur du canal à l'entrée de la section convergente. Ce rapport W/D devrait être de 1,05 pour les canaux H_s, de 1,9 pour les H et de 3,2 pour les H_L (voir le Tableau 20 - Canal HS - Dimensions normalisées, le Tableau 21 - Canal en H - Dimensions normalisées et le Tableau 22 - Canal HL - Dimensions normalisées).

3.5.2. Principe de fonctionnement

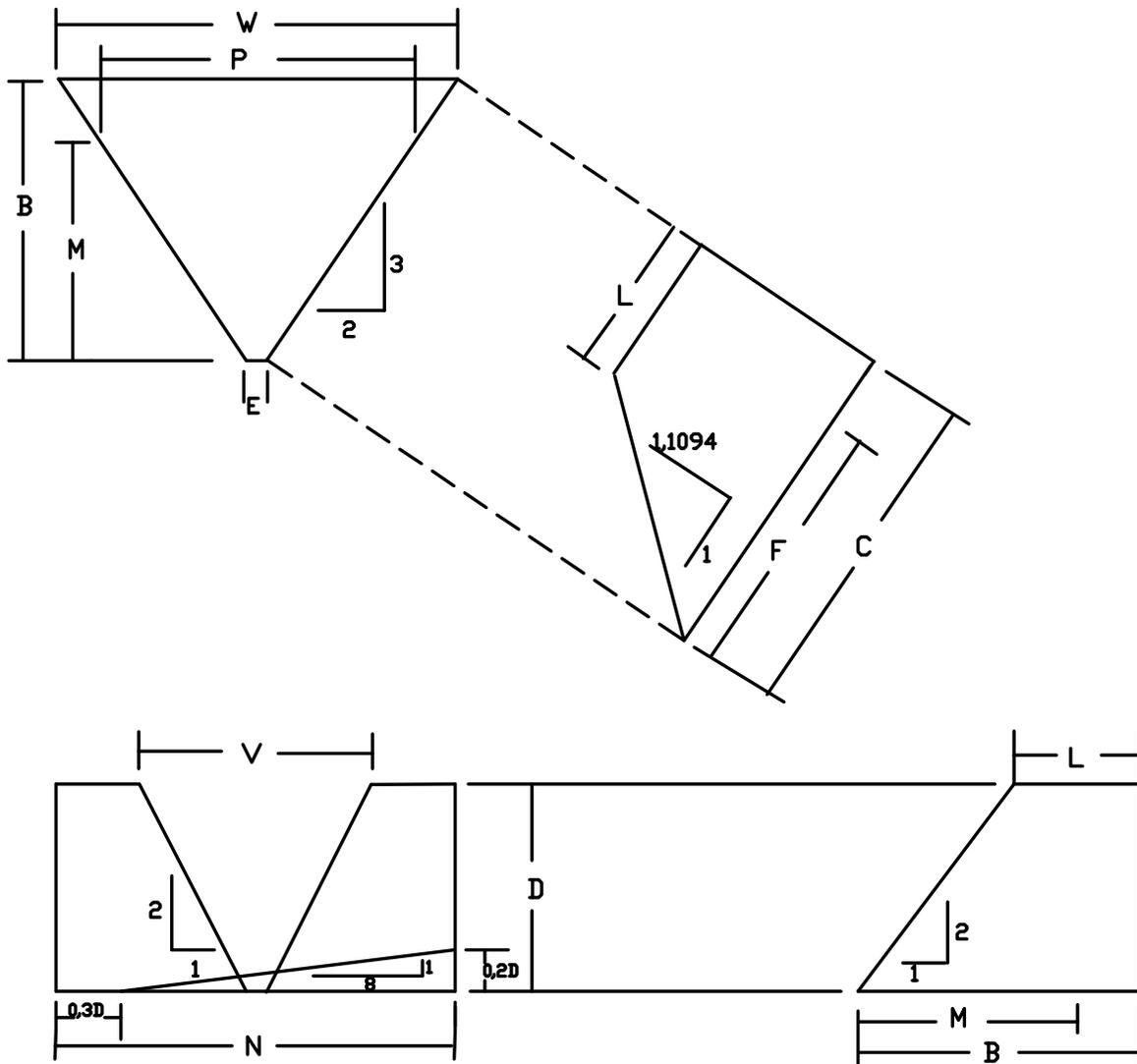
Le canal en H fonctionne selon le principe du venturi. De par ses restrictions latérales, le canal diminue l'aire d'écoulement, ce qui provoque un rehaussement du niveau d'eau en amont de la section de contrôle. Le débit peut être obtenu en mesurant simplement la hauteur d'eau, puisque cette hauteur varie proportionnellement au débit.

Figure 17 - Canal Hs - Caractéristiques physiques



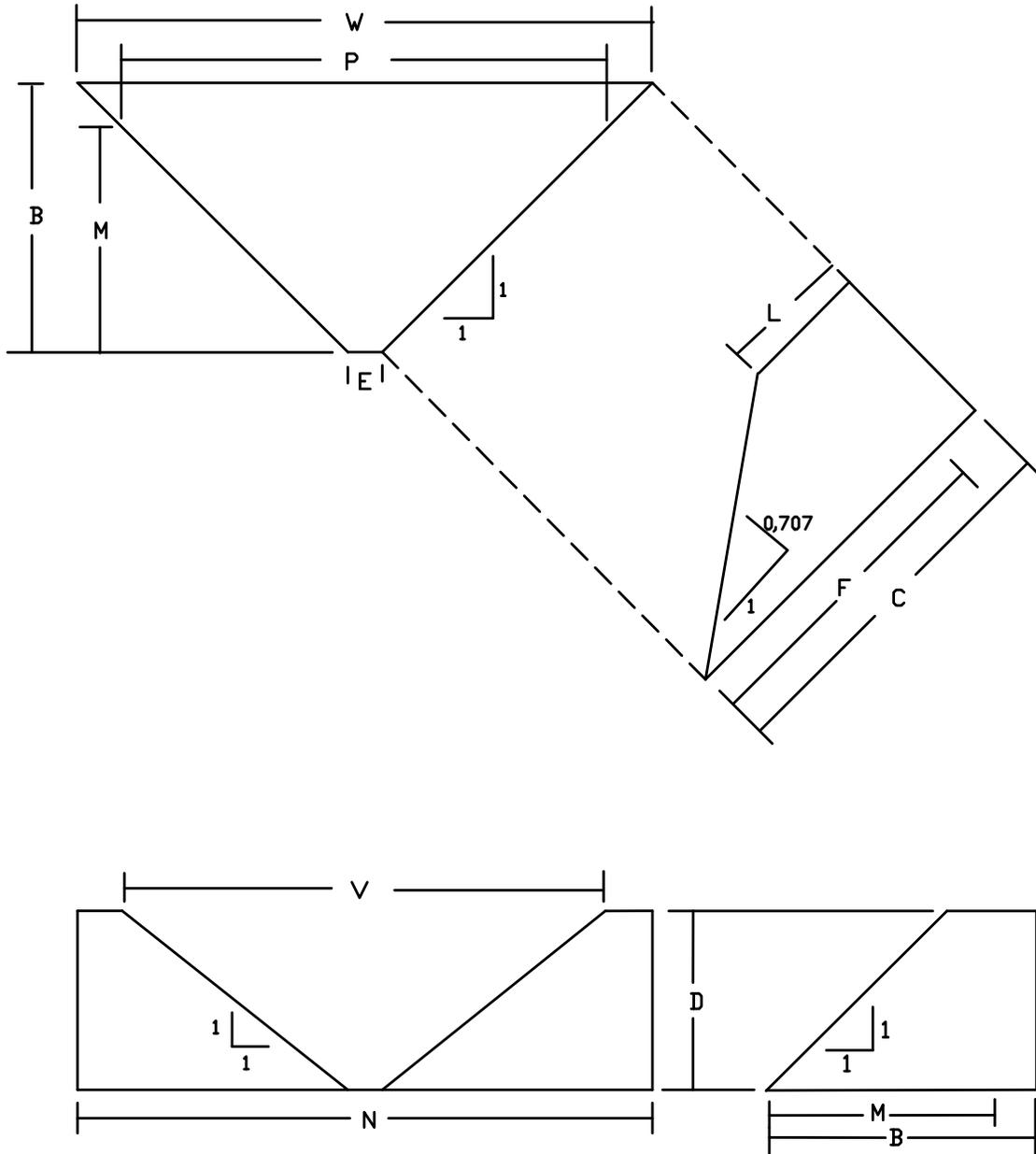
Note : Voir le Tableau 20 - Canal HS - Dimensions normalisées pour la signification des lettres.

Figure 18 - Canal H - Caractéristiques physiques



Note : Voir le Tableau 21 - Canal en H - Dimensions normalisées pour la signification des lettres.

Figure 19 - Canal HL - Caractéristiques physiques



Note : Voir le Tableau 22 - Canal HL - Dimensions normalisées pour la signification des lettres.

Bien qu'il soit possible d'utiliser ce canal en écoulement noyé, il est fortement recommandé de l'utiliser en écoulement libre. En écoulement libre, la mesure du débit peut être obtenue avec un seul point de mesure, alors qu'en écoulement noyé, il est nécessaire de mesurer également la hauteur en aval de la section de contrôle.

3.5.3. Applications

Le canal en H a été développé pour mesurer le débit des eaux d'irrigation de petits bassins hydrographiques et les eaux de surface. Il est maintenant utilisé de façon générale pour mesurer les eaux d'irrigation, les cours d'eau à faible débit et les eaux dans les réseaux d'égout⁽⁷⁾.

La géométrie et le principe de fonctionnement du canal en H font de ce dernier un très bon outil pour mesurer le débit des eaux contenant des solides. Ce canal peut mesurer une grande variété de débit tout en conservant une bonne précision.

De plus, sa fabrication étant assez facile et peu onéreuse, il peut parfaitement convenir à une installation temporaire de mesure.

3.5.4. Dimensions

Pour que le canal en H donne des mesures exactes de débit, il est nécessaire que les dimensions normatives soient rigoureusement respectées lors de la fabrication du canal.

La Figure 17 - Canal Hs - Caractéristiques physiques, la Figure 18 - Canal H - Caractéristiques physiques et la Figure 19 - Canal HL - Caractéristiques physiques présentent les caractéristiques physiques du canal en H ainsi que le Tableau 20 - Canal HS - Dimensions normalisées, le Tableau 21 - Canal en H - Dimensions normalisées et le Tableau 22 - Canal HL - Dimensions normalisées, les dimensions précises que doivent avoir chacune des parties du canal⁽²¹⁾.

Tableau 20 - Canal HS - Dimensions normalisées

D	mm	pi	mm	pi	mm	pi	mm	pi	mm	pi
	122	0,4	152	0,5	183	0,6	244	0,8	305	1
W 1,05 D	128	0,42	160	0,0525	192	0,63	256	0,84	320	1,05
B 1,5 D	183	0,6	228	0,75	275	0,9	366	1,2	458	1,5
E 0,05 D	6	0,02	8	0,025	9	0,03	12	0,04	15	0,05
M 1 D	122	0,4	152	0,5	183	0,6	244	0,8	305	1
P 0,7167D	87	0,28668	109	0,35832	131	0,43002	175	0,57336	219	0,7167
N 1,05 D	128	0,42	160	0,0525	192	0,63	256	0,84	320	1,05
V 0,383 D	47	0,1532	58	0,1915	70	0,2298	93	0,3064	117	0,383
C 1,5811D	193	0,63244	241	0,79055	289	0,94866	386	1,26488	482	1,5811
L 1,054 D	129	0,4216	160	0,527	193	0,6324	257	0,8432	321	1,054
F 1,054 D	129	0,4216	160	0,527	193	0,6324	257	0,8432	321	1,054

où :

- D : hauteur totale du canal;
- W : largeur de la section d'approche;
- B : longueur de la base du canal;
- E : largeur de la section de contrôle à sa base;
- M : point de mesure;
- P : largeur de la base au point de mesure;
- N : largeur totale du canal;
- V : largeur de la section de contrôle à son sommet;
- C : longueur de la base des côtés;
- L : longueur du sommet des côtés;
- F : point de mesure sur le côté.

Tableau 21 - Canal en H - Dimensions normalisées

D	W	B	E	M	P	N	V	C	L	F	t	Y
	1,9 D	1,35 D	0,1 D	1,05 D	1,5 D	1,9 D	1,1 D	1,6225 D	0,721 D	1,2619 D	0,2 D	0,3 D
152 0,5'	289 0,95	205 0,675	15 0,05	160 0,525	228 0,75	289 0,95	167 0,55	247 0,81125	110 0,3605	192 0,63096	30 0,1	46 0,15
229 0,75'	435 1,425	309 1,0125	23 0,075	240 0,7875	344 1,125	435 1,425	252 0,825	372 1,21688	165 0,5408	288 0,94643	46 0,15	69 0,225
305 1'	580 1,9	412 1,35	31 0,1	320 1,05	458 1,5	580 1,9	336 1,1	495 1,6225	220 0,721	385 1,2619	61 0,2	91 0,3
457 1,5'	868 2,85	617 2,025	46 0,15	480 1,575	686 2,85	868 2,85	503 1,65	741 2,43375	330 1,0815	577 1,89285	91 0,3	137 0,45
610 2'	1159 3,8	824 2,7	61 0,2	641 2,1	915 3	1159 3,8	671 2,2	990 3,245	440 1,442	769 2,5238	122 0,4	183 0,6
762 2,5'	1448 4,75	1029 3,375	76 0,25	800 2,625	1143 3,75	1448 4,75	838 2,75	1236 4,05625	549 1,8025	962 3,15475	152 0,5	229 0,75
914 3'	1737 5,7	1234 4,05	91 0,3	960 3,15	1371 4,5	1737 5,7	1005 3,3	1483 4,8675	659 2,163	1154 3,7857	183 0,6	274 0,9

où :

- D : hauteur totale du canal;
- W : largeur de la section d'approche;
- B : longueur de la base du canal;
- E : largeur de la section de contrôle à sa base;
- V : largeur de la section de contrôle à son sommet;
- P : largeur de la vase au point de mesure;
- N : largeur totale du canal;
- L : longueur du sommet des côtés;
- C : longueur de la base des côtés;
- M : point de mesure;
- F : point de mesure sur le côté;
- t : hauteur de l'inclinaison du fond;
- Y : distance entre le début du fond incliné et le côté du canal.

Tableau 22 - Canal HL - Dimensions normalisées

D	mm	pi	mm	pi	mm	pi	mm	pi	mm	pi
		610	2	762	2,5	914	3	1067	3,5	1219
W 3,2 D	1952	6,4	2438	8	2925	9,6	3414	11,2	3901	12,8
B 1,5 D	915	3	1143	3,75	1371	4,5	1600	5,25	1829	6
E 0,2 D	122	0,4	152	0,5	183	0,6	213	0,7	244	0,8
M 1,25 D	763	2,5	953	3,125	1143	3,75	1334	4,375	1524	5
P 2,7 D	1647	5,4	2057	6,75	2468	8,1	2881	9,45	3291	10,8
N 3,2 D	1952	6,4	2438	8	2925	9,6	3414	11,2	3901	12,8
V 2,2 D	1342	4,4	1676	5,5	2011	6,6	2347	7,7	2682	8,8
C 2,1213D	1293	4,2426	1616	5,30325	1940	6,3639	2263	7,42455	2586	8,4852
L 0,707 D	431	1,414	539	1.7675	646	2,121	754	2,4745	862	2,828
F 1,7678D	1078	3,5356	1347	4,4195	1616	5,3034	1886	6,1873	2155	7,0712

où :

- D : hauteur totale du canal;
- W : largeur de la section d'approche;
- B : longueur de la base du canal;
- E : largeur de la section de contrôle à sa base;
- V : largeur de la section de contrôle à son sommet;
- F : point de mesure sur le côté;
- P : largeur de la base au point de mesure;
- N : largeur totale du canal;
- L : longueur du sommet des côtés;
- C : longueur de la base des côtés;
- M : point de mesure.

Tableau 23 - Canal en H - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre

Dimensions du canal en mm et pieds		Hauteur minimum mm (pi)	DÉBIT MINIMUM		Hauteur maximum mm (pi)	DÉBIT MAXIMUM	
	D		l/s	m ³ /j		l/s	m ³ /j
Hs	122 0,4'	6 0,02	0,0046	0,3981	122 0,4'	2,407	208
	152 0,5'	6 0,02	0,0056	0,4834	152 0,5'	3,964	342,5
	183 0,6'	6 0,02	0,0066	0,5687	183 0,6'	6,513	562,7
	244 0,8'	6 0,02	0,0086	0,7393	244 0,8'	13,31	1 150
	305 1'	6 0,02	0,0105	0,9099	305 1'	23,22	2 006
H	152 0,5'	6 0,02	0,0113	0,976	152 0,5'	9,91	856,3
	229 0,75'	6 0,02	0,0169	1,46	229 0,75'	27,47	2 373
	305 1'	6 0,02	0,0198	1,953	305 1'	56,4	4 869
	457 1,5'	6 0,02	0,0311	2,687	457 1,5'	155,5	13 432
	610 2'	6 0,02	0,0396	3,425	610 2'	320	27 646
	762 2,5'	6 0,02	0,051	4,404	762 2,5'	558	48 198
	914 3'	6 0,02	0,0595	5,138	914 3'	881	76 089
H _L	610 2'	6 0,02	0,077	6,63	610 2'	50,6	50 644
	762 2,5'	6 0,02	0,095	8,208	762 2,5'	88,6	88 567
	914 3'	6 0,02	0,113	9,787	914 3'	139,5	139 456
	1067 3,5'	6 0,02	0,132	11,366	1067 3,5'	205	205 269
	1219 4'	6 0,02	0,15	12,944	1219 4'	286	286 251

3.5.5. Gammes de mesure

Les canaux en H permettent de mesurer des débits variant entre 0,3981 m³ par jour pour un canal H_s de 122 mm (0,4 pi) de hauteur et 286 251 m³ par jour pour un canal H_L de 1 219 mm (4 pi) de hauteur.

Le Tableau 23 - Canal en H - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre présente les débits minimal et maximal recommandés en écoulement libre pour chacun des types de canaux en H ⁽²¹⁾.

3.5.6. Équation de débit en écoulement libre

Les équations de débit résultant de la hauteur/débit, associées à un écoulement libre, sont très complexes; c'est pourquoi il est préférable de travailler avec les tables hauteur/débit fournies par les fabricants. Les équations peuvent cependant être très utiles pour déterminer le débit de canaux dont les dimensions sont légèrement différentes des dimensions normalisées. Le débit total mesuré par un canal en H est le résultat de la somme des quantités d'eau mesurées à différentes hauteurs dans la section de contrôle. Trois équations sont nécessaires pour mesurer le débit dans un canal en H ⁽²⁰⁾.

Une équation sert à établir le débit pour une hauteur d'eau dans le canal, inférieure à 0,03 m (0,1 pi). Une seconde équation est utilisée pour établir le débit à une hauteur d'eau dite de transition, soit entre 0,03 et 0,06 m (0,1 et 0,2 pi). La troisième équation est nécessaire pour les hauteurs d'eau supérieures à 0,06 m (0,2 pi).

Pour les hauteurs d'eau inférieures à 0,03 m (0,1 pi) (débits faibles), l'équation est :

- pour les canaux H_s, H et H_L ⁽²⁰⁾ :

$$Q = A_o (2B_o + B_i h)(h)(h - 0,01)^{A_i} \quad (19)$$

Pour les hauteurs situées entre 0,03 et 0,06 m (0,1 et 0,2 pi) (débits transitoires), l'équation est :

- pour les canaux H_s, H et H_L ⁽²¹⁾ :

$$Q = (K_o B_o + K_i B_i h) \sqrt{2g h^{3/2}} \quad (20)$$

Pour les hauteurs supérieures à 0,06 m (0,2 pi), (débats principaux), l'équation de débit est :

- pour les canaux H_s et H⁽²⁰⁾ :

$$Q = [(E_o + E_i D)B_o + (F_o + F_i D)B_i(h + \frac{V^2}{2g})] \sqrt{2g(h + \frac{V^2}{2g})} \quad (21)$$

- pour les canaux H_L⁽²⁰⁾ :

$$Q = (K_o B_o + K_i B_i h) \sqrt{2gh^{3/2}} \quad (22)$$

Les valeurs des coefficients et des exposants utilisés dans les formules précédentes sont présentées au Tableau 24 - Canal en H - Valeurs des coefficients et des exposants.

Tableau 24 - Canal en H - Valeurs des coefficients et des exposants

Coefficients et exposants	D mm pi	Hs		D mm pi	H		D mm pi	HL	
		mcs	cfs		mcs	cfs		mcs	cfs
A o		2,238			1,705 s 1,822	3,14 s 3,30		2,023	3,57
A i		0,526	0,526		0,486 s 0,5	0,486 s 0,5		0,522	0,522
Bo	122 0,4	3	0,01	152 0,5	8	0,025	610 2	62	0,2
	152 0,5	4	0,0125	229 0,75	11	0,0375	762 2,5	76	0,25
	183 0,6	5	0,015	305 1	15	0,05	914 3	91	0,3
	244 0,8	6	0,02	457 1,5	23	0,075	1 067 3,5	107	0,35
	305 1	8	0,025	610 2	31	0,1	1 219 4	122	0,4
				762 2,5	38	0,125			
				914 3	46	0,15			
B i		51	0,1667		152	0,5		305	1
E o		0,861	0,861		0,612 s 0,630	0,612 s 0,630			
E i		0,367	0,112		0,686 s 0,571	0,209 s 0,174			
F o		0,479 0,2	0,479 2,7		0,409 s 0,4	0,409 s 0,4			
F i		-0,115 61	-0,035 824		-0,079 s -0,059	-0,024 s -0,018			
K o	122 0,4	0,707	0,707	152 0,5	0,738 s 0,799	0,378 s 0,799	610 2		
	152 0,5	0,738	0,738	229 0,75	0,736	0,736	762 2,5		
	183 0,6	0,752	0,752	305 1	0,705 s 0,755	0,705 s 0,755	914 3		
	244 0,8	0,76 0,76	0,76	457 1,5	0,71 s 0,751	0,71 s 0,751	1 067 3,5		
	305 1	0,755	0,755	610 2	0,711 s 0,748	0,711 s 0,748	1 219 4	0,7804	0,7804
				762 2,5	0,712 s 0,745	0,712 s 0,745			
				914 3	0,713 s 0,744	0,713 s 0,744			
K i	122 0,4	0,537	0,537	152 0,5	0,399 s 0,381	0,399 s 0,381	610 2		
	152 0,5	0,538	0,538	229 0,75	0,409	0,409	762 2,5		
	183 0,6	0,545	0,545	305 1	0,448 s,0416	0,448 s 0,416	914 3		
	244 0,8	0,572	0,572	457 1,5	0,472 s 0,435	0,472 s 0,435	1 067 3,5		
	305 1	0,614	0,614	610 2	0,498 s,0456	0,498 s 0,456	1 219 4	0,3788	0,3788
				762 2,5	0,525 s 0,479	0,525 s 0,479			
				914 3	0,551 s 0,502	0,551 s 0,502			

3.5.7. Précision

Le canal en H permet d'obtenir en écoulement libre, une précision comparable à celle des autres canaux de mesure. Les canaux Hs, qui sont utilisés pour mesurer de petits débits, sont les plus précis. Pour obtenir ce genre de précision, un très grand soin doit être pris lors de la fabrication et de l'installation du canal afin de respecter rigoureusement les dimensions standard.

3.5.8. Sources d'erreur

Les principales sources d'erreur qui diminuent la précision du canal sont les suivantes :

- les modifications aux dimensions standard, effectuées lors de la fabrication du canal ou de son installation :

Horizontalité : le canal doit être de niveau sur l'axe transversal, nonobstant les remarques de la section 3.5.1;

Longitudinale : dans le sens de l'écoulement, une faible pente positive de 2 % produira une erreur de mesure de l'ordre de 1 %.

- position erronée du point de mesure :

Le point de mesure en amont doit se situer à une distance égale à D pour les Hs; à 1,05 D pour les H; et 1,25 D, pour les H_L⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾; D étant la dimension de la hauteur totale du canal.

Note : Cette distance D doit être mesurée parallèlement à l'axe central du canal, à partir du point de déversement et en amont.

- approche inadéquate :

La section convergente du canal est trop courte pour corriger adéquatement toutes les distorsions importantes de vitesses d'approche et de distribution. (Le lecteur peut se référer à la section 3.5.10 qui traite des conditions d'installation, pour connaître les règles qui régissent l'approche.).

- mauvaise technique de mesure en écoulement noyé :

Il arrive souvent que l'utilisateur, par manque de connaissances, ne sache reconnaître et évaluer le degré de l'écoulement noyé, et mesure le débit en un seul endroit au lieu des deux (2) points de mesure prescrits pour cette situation.

- obstructions dans la gorge du canal :

Il importe de s'assurer que rien ne bloque la gorge du canal de mesure et fausse la hauteur d'eau en obligeant l'écoulement à passer par-dessus l'obstacle, principalement avec les canaux de petites dimensions.

- érosion à la sortie du canal :

Il importe de s'assurer que le canal ne sera pas déplacé par l'érosion et que sa position longitudinale originale demeurera à l'horizontale.

3.5.9. Critères de sélection

Bien que l'installation d'un canal Parshall soit privilégiée pour un site permanent de mesure, un canal en H peut s'avérer adéquat.

Comme il arrive souvent que plusieurs canaux soient capables de mesurer la même gamme de débit, d'autres points sont à considérer lors du choix du canal. Ces points sont :

- l'écoulement : il importe de choisir un canal dont la dimension sera suffisante pour permettre un écoulement libre au régime de débit maximal, tout en considérant les contraintes d'installation;
- la perte de charge : pour un même débit, l'importance de la remontée du niveau d'eau associée à la mise en place de canaux de dimensions différentes;
- la sensibilité requise pour détecter et mesurer la variation du niveau de l'eau associée à une variation minimale de débit;
- la précision désirée;
- l'ensemble des travaux requis pour mettre en place des canaux de différentes dimensions;
- les coûts associés à l'installation des canaux de différentes dimensions.

3.5.10. Particularités d'installation

Lors de la mise en place du canal, il faut s'assurer que les caractéristiques physiques du canal correspondent à celles indiquées à la Figure 17 - Canal Hs - Caractéristiques physiques, Figure 18 - Canal H - Caractéristiques physiques et à la Figure 19 - Canal HL - Caractéristiques physiques ainsi qu'au Tableau 20 - Canal HS - Dimensions normalisées, au Tableau 21 - Canal en H - Dimensions normalisées et au Tableau 22 - Canal HL - Dimensions normalisées.

Le radier de la section convergente du canal doit être au même niveau que le radier du conduit d'amenée ⁽¹²⁾.

La longueur de la section d'approche du canal doit équivaloir à au moins cinq fois la hauteur totale du canal ⁽¹²⁾.

Dans la section d'approche, la pente devrait être inférieure à 1 %. Il faut éviter qu'une pente trop prononcée ne produise un ressaut dans la section convergente du canal (voir Figure 7 - Canal Parshall - Pente de la section d'approche), ou ne provoque une trop grande vitesse ce qui aurait pour effet d'amoinrir la remontée de la hauteur d'eau dans la section convergente.

Le canal d'approche devrait avoir une largeur égale à la dimension « W » des Tableau 20 - Canal HS - Dimensions normalisées, Tableau 21 - Canal en H - Dimensions normalisées et Tableau 22 - Canal HL - Dimensions normalisées. Il importe d'éviter d'introduire le conduit d'amenée des eaux directement dans la section convergente du canal (voir Figure 8 - Canal Parshall - Union des sections d'approche et de convergence).

Idéalement, il devrait y avoir une chute à la sortie du canal ⁽¹²⁾. De plus, la pente du conduit d'évacuation devrait être suffisante pour permettre l'écoulement immédiat de l'eau. Cette pente devrait être d'au moins 2 %.

À la sortie du canal, il ne devrait y avoir aucune courbe prononcée qui puisse restreindre l'écoulement et causer un écoulement noyé.

3.5.11. Écoulement noyé

La hauteur de mesure en amont est faussée dès que la hauteur en aval atteint 10 % de la hauteur en amont. Dans un tel cas, la hauteur en amont est supérieure de 0,3 % à sa hauteur normale. Lorsque la hauteur en aval est à 50 % de la hauteur en amont, la hauteur en amont est supérieure de 2,6 % à sa hauteur normale ⁽²⁰⁾.

Lorsque la hauteur en aval (h_2) est supérieure au seuil de la section convergente, la mesure de la hauteur en amont (h_1) et de la hauteur en aval (h_2) doit être faite simultanément. Lorsque le rapport h_2/h_1 est supérieur à 30 %, l'écoulement est dit noyé, et le débit mesuré découle de la mesure simultanée des deux hauteurs h_1 et h_2 . Comme on ne dispose présentement d'aucun instrument commercial capable de faire simultanément ces mesures et les calculs, la mesure en écoulement noyé doit être évitée.

Le rapport h_2/h_1 peut atteindre 40 % avant que l'erreur de mesure du débit soit significative. Pour chaque pourcentage additionnel, la réduction de débit s'accroîtra de façon exponentielle.

Lorsque le rapport h_2/h_1 atteint 100 %, il n'y a plus de débit. Cependant, 95 % est considérée comme étant la valeur limite où le canal en H devient inefficace, car la différence de hauteur entre h_1 et h_2 est si faible que la moindre erreur de mesure de hauteur résulte en de grandes imprécisions. Il est donc exclu d'utiliser ce type de canal en écoulement noyé lorsque le rapport h_2/h_1 est supérieur à 0,95.

3.5.12. Équation de débit en écoulement noyé

L'équation suivante ⁽²⁰⁾ permet de déterminer quelle serait la hauteur nécessaire pour laisser passer le même débit d'eau, si le canal opérait en écoulement libre.

$$\frac{h_1}{h_{mod}} = 1 + 0,000175(e^{h_2/h_1})^{5,44} \quad (23)$$

où :

- h_1 est la hauteur en amont de la section de contrôle, en mètres ou en pieds;
- h_2 est la hauteur en aval de la section de contrôle, en mètres ou en pieds;
- e est 2,71828;
- h_{mod} est la hauteur en amont, en mètres ou en pieds, si le canal opérait en écoulement libre.

Lorsque la hauteur en écoulement libre est calculée, les équations applicables citées en 3.5.6 sont utilisées pour déterminer le débit.

3.5.13. Modification au canal

Pour obtenir des mesures précises, il est nécessaire d'utiliser strictement les dimensions présentées au Tableau 20 - Canal HS - Dimensions normalisées, au Tableau 21 - Canal en H - Dimensions normalisées et au Tableau 22 - Canal HL - Dimensions normalisées. La moindre modification aux dimensions du canal nécessitera un étalonnage de ce dernier.

3.5.14. Étalonnage

La section 2.12.13 traite de l'étalonnage.

En raison de la grosseur des réservoirs disponibles, l'utilisation de la méthode volumétrique est généralement limitée à des canaux en H dont les dimensions sont inférieures à 610 mm (2 pi).

Lors de l'étalonnage, la hauteur d'eau dans le canal, au point de mesure, ne doit pas varier de plus de 2 %.

4. Description spécifique des déversoirs à paroi mince

Les sections suivantes traitent des déversoirs à paroi mince, susceptibles d'être rencontrés sur les sites temporaires ou permanents de contrôle.

4.1. Généralités

Les déversoirs sont généralement utilisés pour mesurer le débit des effluents qui ne contiennent que très peu de solides en suspension. Lorsque ces appareils sont construits et installés selon les normes et utilisés dans des conditions soigneusement contrôlées, ils fournissent des mesures de débit adéquates.

4.1.1. Principe de fonctionnement

La mesure du débit dans les déversoirs à paroi mince est fonction de la hauteur d'eau dans le déversoir, de la dimension et de la forme de ce dernier, ainsi que d'un coefficient déterminé expérimentalement qui tient compte, en plus des facteurs précités, de l'unité de mesure, des dimensions géométriques du canal d'approche et des propriétés dynamiques de l'eau.

4.1.2. Applications générales

Ce type d'élément de mesure peut, en raison de la variété de sa forme géométrique et de ses dimensions, mesurer une très grande étendue de débit (0,25 l/s à 10 619 l/s). Afin d'obtenir la meilleure précision possible, les déversoirs triangulaires sont utilisés pour les faibles débits alors que les déversoirs trapézoïdaux et rectangulaires sont préférés pour les débits plus importants⁽²²⁾.

Ces éléments primaires servent généralement sur une base temporaire plutôt que permanente. Ils peuvent être utilisés dans des conduits d'égout, mais doivent faire l'objet d'attention constante, afin de prévenir le blocage des conduits relié au dépôt de solides en amont du déversoir.

L'application spécifique à chaque type de déversoir sera développée à la section traitant des déversoirs spécifiques.

4.1.3. Particularités d'installation

Il est préférable de fabriquer une installation conforme, plutôt que d'essayer d'estimer les effets de conditions non conformes et de tenter de corriger les valeurs obtenues.

Les déversoirs doivent être installés dans une section droite de l'écoulement.

Il doit être installé dans des canaux d'écoulement de forme rectangulaire ou dans des chambres de mesure qui simulent des canaux de forme rectangulaire⁽²²⁾.

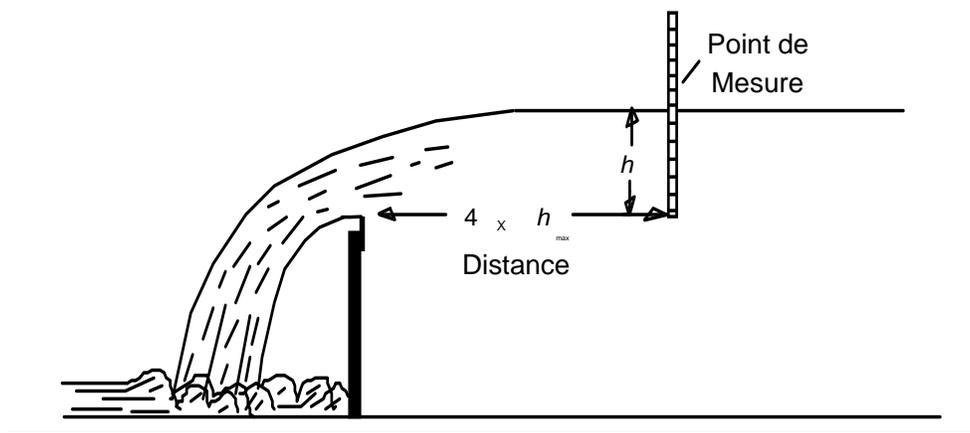
Il doit être vertical et perpendiculaire aux côtés du canal d'écoulement⁽²²⁾ et de niveau sur tous ses axes.

Les joints entre le déversoir, les côtés et le fond du canal doivent être étanches et résistants.

La forme géométrique du déversoir doit être découpée avec la plus grande précision possible.

Le déversoir doit être propre et solidement maintenu en place. Il doit être capable de résister aux plus forts débits sans distorsions ni dommages⁽²²⁾.

La longueur de la section d'approche (L_a) doit être d'au moins 10 fois la longueur de la nappe d'eau (L_n)⁽²²⁾ ou 20 fois la hauteur d'eau maximale (h_{max}) mesurée dans le déversoir. Règle générale, la longueur de la nappe est égale à deux fois la hauteur maximale.



DISTANCE DU POINT DE MESURE EN AMONT DU DÉVERSOIR

L_a = longueur de la section d'approche

L_n = longueur de la nappe d'eau

h = hauteur au point de mesure

h_{\max} = hauteur maximale au point de mesure

Exemple : Pour un déversoir rectangulaire dont la nappe d'eau est de 0,60 m (2 pi) de longueur et dans lequel la hauteur d'eau maximale mesurée est de 0,3 m (1 pi), la longueur de la section d'approche devra être de 6 m (20 pi).

Si le déversoir est situé dans une chambre de mesure, celle-ci doit avoir une dimension suffisante pour permettre la longueur d'approche recommandée ⁽²²⁾.

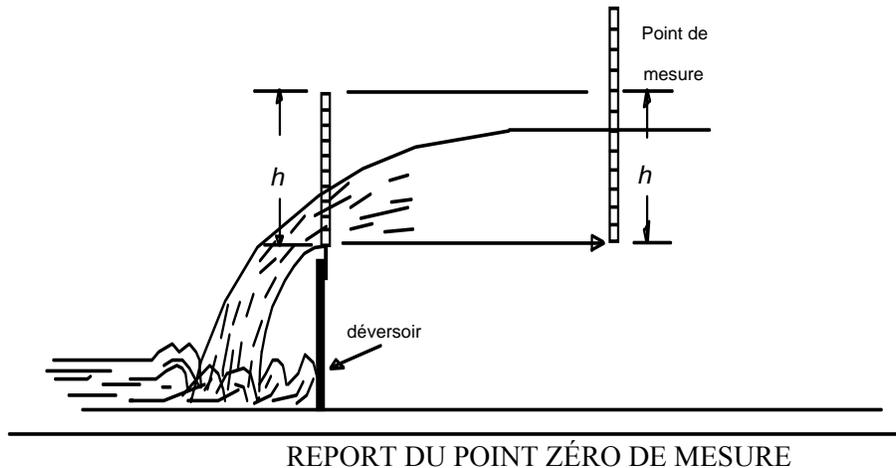
Dans la section d'approche, il ne doit y avoir aucune courbe, aucune chute et aucun branchement de conduit ⁽⁴⁾.

Dans la section d'approche, la pente doit être inférieure à 2 %. Il importe d'éviter qu'une pente trop prononcée ne produise un ressaut dans la section convergente du déversoir, ou ne provoque une trop grande vitesse, ce qui fausserait la mesure du débit.

L'écoulement dans la section d'approche doit être uniforme, sans turbulence et bien distribué, de sorte que la vitesse moyenne d'approche, mesurée en un point en amont, soit inférieure à 0,09 m/s ou 0,3 pi/s ⁽²⁾⁽²³⁾.

Un système de chicanes peut être installé pour permettre une meilleure répartition de l'écoulement. Cependant, celles-ci doivent être situées en amont de la section d'approche ⁽²²⁾.

Le point de mesure doit être localisé à une distance en amont suffisante pour ne pas être affecté par l'effet de rabattement (drawdown) du déversoir. La distance recommandée est de 4 à 5 fois la hauteur maximale ⁽²²⁾.



Le point zéro de mesure doit correspondre exactement au point zéro du déversoir. Pour établir ce point zéro, on ne peut se fier à la hauteur d'eau mesurée directement sur l'arête du déversoir à cause de l'effet de rabattement (drawdown). Le point zéro du déversoir doit être transposé avec précision au point de mesure à l'aide d'un niveau ⁽²²⁾.

Au point de mesure, **une règle de référence doit être installée de façon permanente**. Le zéro de la règle doit correspondre au niveau de l'arête du déversoir. Cette règle de référence est considérée comme la mesure vraie de la hauteur.

La mesure du débit peut se faire directement dans la section d'approche, si l'instrument de mesure ne cause pas trop de remous. Dans le cas contraire, la mesure du débit doit se faire dans un puits de stabilisation relié à la section d'approche ⁽²²⁾. Ce puits doit être installé suivant les normes prescrites au Tableau 7 - Canal Parshall - Équations de débit en écoulement libre du présent document.

La dimension des puits doit être suffisante pour permettre l'installation et le fonctionnement sans interférence, du détecteur de niveau du débitmètre et le nettoyage du puits de stabilisation.

Pour éviter de mesurer en écoulement noyé, causé par du refoulement, la capacité du conduit d'évacuation doit être suffisante pour permettre une évacuation immédiate de l'eau au débit maximal.

Le niveau d'eau en aval du déversoir doit, en tout temps, être inférieur à la hauteur de l'arête du déversoir. La distance minimale acceptable entre le niveau d'eau en aval et l'arête est de 61 mm (0,2 pi) ⁽²⁾.

4.1.4. Perte de charge

Les déversoirs sont les instruments de mesure qui produisent les plus grandes pertes de charge. Avant d'installer un déversoir, il importe de vérifier que la remontée d'eau dans le réseau d'évacuation ne cause pas de refoulement des égouts dans les bâtiments et les sous-sols.

La formule suivante sert à évaluer cette remontée :

$$R = (h_p + h_l) + (0,2 h_l) \quad (24)$$

où :

- R représente la remontée d'eau dans la section en amont du déversoir;
- h_p représente la hauteur de la pelle du déversoir;
- h_l représente la hauteur d'eau maximale anticipée au point de mesure, en amont du déversoir.

Les unités couramment utilisées sont les mètres ou les pieds.

4.1.5. Écoulement noyé

Les déversoirs sont conçus pour fonctionner uniquement en écoulement libre. En écoulement noyé, ils ne donneront qu'une valeur approximative du débit ⁽³⁾. Leur utilisation sous de telles conditions est donc déconseillée.

4.1.6. Équation de débit en écoulement noyé

Il est inutile de discuter de l'application d'une telle équation puisque l'utilisation de ce type d'élément de mesure, en écoulement noyé, ne fournit qu'une idée approximative du débit réel et que les valeurs obtenues ne sont pas acceptables.

4.1.7. Critères de sélection

Les critères essentiels à considérer lors de la sélection des déversoirs sont :

- la présence de solides en suspension dans l'effluent;
- le différentiel de niveau d'eau entre l'amont et l'aval;
- la précision de mesures désirée;
- les dimensions et la forme du canal d'écoulement;
- la plage des débits à mesurer;
- les difficultés d'installation;
- la remontée tolérable du niveau d'eau en amont du déversoir.

4.1.8. Sources d'erreur

Les principales sources d'erreur qui diminuent la précision du déversoir sont ⁽²²⁾ :

- l'appréciation du coefficient C_e (défini à la section 4.2.4);
- la mesure de la longueur ou de l'angle du déversoir b_e (défini à la section 4.2.4);
- la mesure de la hauteur (h) d'eau dans le déversoir;
- la vitesse d'écoulement dans la section d'approche;
- la présence de sédiment dans la section d'approche;
- l'entartrage et l'obturation du déversoir avec des débris;
- les dommages, l'usure ou la rugosité de l'arête du déversoir;
- l'étanchéité du déversoir;
- le refoulement et l'écoulement noyé;
- l'aération insuffisante sous la nappe;
- l'arrondi de l'arête du déversoir.

4.1.9. Entretien

Comme l'utilisation des déversoirs favorise le dépôt des solides, l'entretien du déversoir et de la section d'approche doit se faire de façon régulière afin de permettre des mesures précises.

La section d'approche doit être libre de dépôt ou de végétation qui peuvent influencer l'écoulement.

La section en aval du déversoir doit être libre d'obstacles qui pourraient favoriser le refoulement et la mesure en écoulement noyé.

L'arête du déversoir doit être nettoyée de tout dépôt. Un soin particulier doit être pris pour bien nettoyer la pointe inférieure de l'arête des déversoirs triangulaires, en évitant de l'endommager.

La fréquence de nettoyage sera grandement influencée par la forme du déversoir et la nature de l'effluent.

Exemple : La fréquence de nettoyage d'un déversoir triangulaire sera plus grande que celle d'un déversoir rectangulaire. Un déversoir triangulaire installé dans un effluent contenant beaucoup de solides nécessitera un nettoyage plus fréquent que le même type de déversoir placé dans un effluent contenant très peu de solides.

Le déversoir doit être vérifié pour détecter la présence de fuites ⁽²²⁾.

L'horizontalité de l'arête du déversoir doit être vérifiée et ajustée lorsque nécessaire.

Le puit de stabilisation doit être nettoyé régulièrement et l'étalonnage du débitmètre, vérifié et ajusté lorsque nécessaire.

4.1.10. Étalonnage

Pour s'assurer qu'un déversoir donne une mesure précise, il est nécessaire de procéder à l'étalonnage après son installation, ainsi que lorsqu'on soupçonne ou remarque une détérioration (voir section 2.12.13).

La méthode volumétrique est utilisée seulement si les conditions suivantes peuvent être remplies ⁽⁵⁾ :

- il y a présence d'un réservoir de forme régulière dont la capacité, à différents niveaux, peut être mesurée avec une précision de 99 %;
- pour chacun des essais, la hauteur d'eau dans le déversoir est stable au point de mesure, c'est-à-dire qu'elle ne varie pas de plus de 3 %.

Cette méthode est généralement limitée, en raison de la grosseur des réservoirs disponibles, à des déversoirs dont les dimensions sont conformes à celles énumérées au Tableau 25 - Étalonnage des déversoirs - Méthode volumétrique - Dimensions limitatives.

La méthode par dilution, utilisant un sel ou un traceur chimique, est employée lorsque :

- le déversoir de mesure est de trop grande dimension pour utiliser la méthode volumétrique;
- la hauteur d'eau dans le déversoir est stable, au point de mesure, pour chacun des essais, c'est-à-dire qu'elle ne varie pas de plus de 3 %;
- il n'y a pas de réservoir de forme régulière dont la capacité à différents niveaux, peut être étalonnée précisément.

Lors de l'étalonnage du déversoir, toutes les informations pertinentes à l'installation et à son état doivent être consignées. La procédure d'étalonnage et la méthode de mesure de la hauteur d'eau dans le déversoir et du débit qui en découle doivent être décrites en détail. Toutes ces informations doivent être conservées comme document de référence durant toute la période d'utilisation du déversoir.

4.1.11. Classification

Un déversoir est classé comme déversoir à paroi mince lorsque l'épaisseur de l'arête est de 3 mm (1/8 po). Le nom du déversoir découlera de sa forme géométrique.

Les sections suivantes décrivent les types de déversoir les plus utilisés.

Tableau 25 - Étalonnage des déversoirs - Méthode volumétrique - Dimensions limitatives

Type de déversoir	Hauteur d'eau maximale	
	Millimètres	Pieds
Triangulaire 60°	893	2,93
Triangulaire 90°	716	2,35
Rectangulaire avec contractions 0,61 (2')	811	2,66
Rectangulaire avec contractions 0,762 (2,5')	643	2,11
Rectangulaire avec contractions 0,914 (3')	549	1,8
Rectangulaire avec contractions 1,219 (4')	436	1,43
Rectangulaire avec contractions 1,524 (5')	369	1,21
Rectangulaire avec contractions 1,829 (6')	323	1,06
Rectangulaire avec contractions 2,438 (8')	265	0,87
Rectangulaire avec contractions 3,048 (10')	229	0,75
Rectangulaire sans contractions 0,152 (1,5')	799	2,62
Rectangulaire sans contractions 0,61 (2')	661	2,17
Rectangulaire sans contractions 0,762 (2,5')	558	1,83
Rectangulaire sans contractions 0,914 (3')	503	1,65
Rectangulaire sans contractions 1,219 (4')	415	1,36
Rectangulaire sans contractions 1,524 (5')	357	1,17
Rectangulaire sans contractions 1,829 (6')	317	1,04
Rectangulaire sans contractions 2,438 (8')	262	0,86
Rectangulaire sans contractions 3,048 (10')	226	0,74
Cipolletti 0,152 (1,5')	796	2,61
Cipolletti 0,61 (2')	655	2,15
Cipolletti 0,762 (2,5')	564	1,85
Cipolletti 0,914 (3')	500	1,64
Cipolletti 1,219 (4')	411	1,35
Cipolletti 1,524 (5')	357	1,17
Cipolletti 1,829 (6')	317	1,04
Cipolletti 2,438 (8')	259	0,85
Cipolletti 3,048 (10')	226	0,74

4.2. Déversoir rectangulaire sans contractions

4.2.1. Description

Le déversoir est dit sans contraction lorsque ses côtés sont formés par les côtés du canal et que l'écoulement se fait sur toute la largeur du canal.

Il est constitué d'une plaque à arête vive, placée perpendiculairement au sens de l'écoulement, et rigoureusement au niveau dans les plans horizontal et vertical.

4.2.2. Dimensions

Pour que ce type de déversoir donne des mesures exactes de débit, il est nécessaire que les dimensions normatives soient respectées lors de la fabrication et de son installation.

La Figure 20 - Déversoir rectangulaire sans contractions - Caractéristiques physiques présente les caractéristiques physiques du déversoir rectangulaire sans contraction et les dimensions normatives de chacune de ses parties.

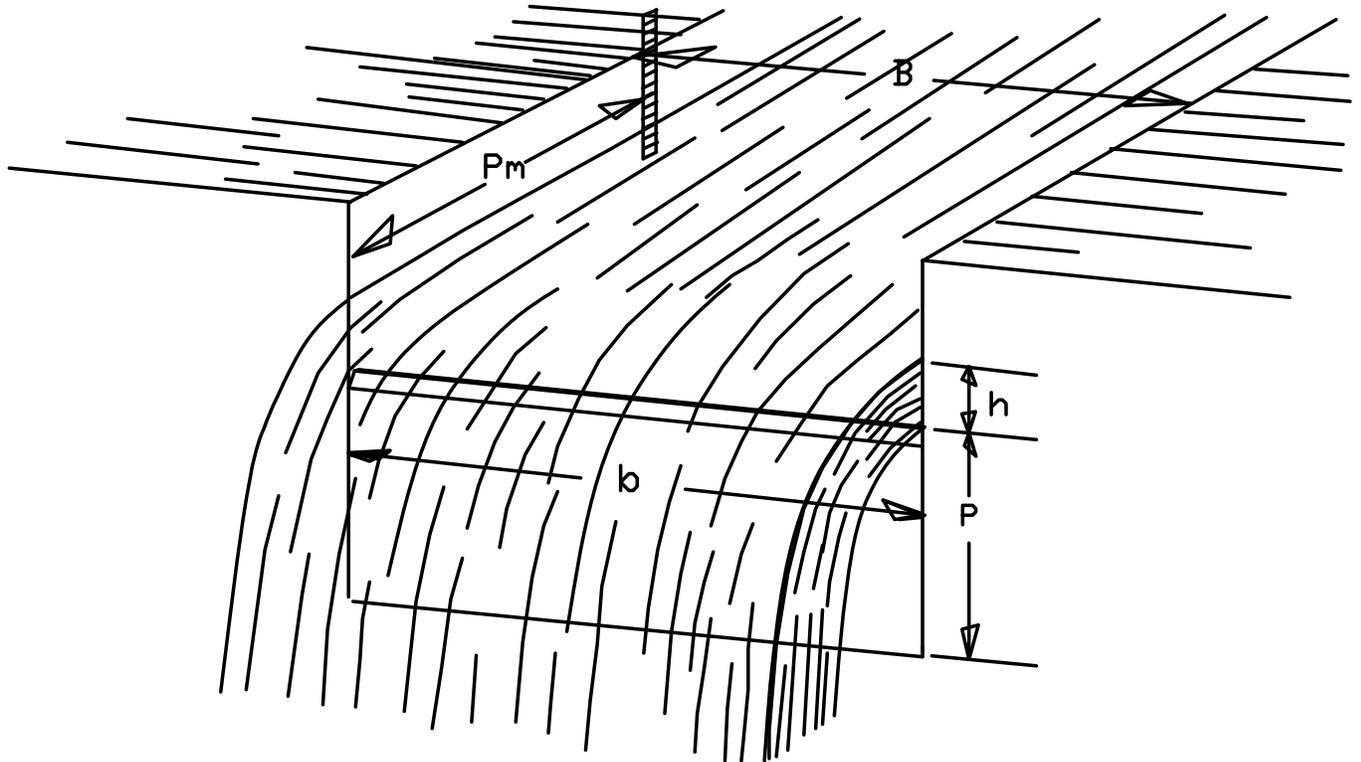
En plus de l'information fournie à la Figure 20, il importe de tenir compte des considérations suivantes lors de la fabrication du déversoir :

Longueur :

La longueur minimale (b) pour ce type de déversoir est de 305 mm (1 pi). Cependant, la longueur du déversoir doit être au moins deux fois supérieure à la hauteur maximale de mesure ⁽⁴⁾.

La longueur normative des déversoirs augmente par tranches de 152 mm (0,5 pi) pour les déversoirs de moins de 914 mm (3 pi), et par tranches de 305 mm (1 pi) pour les déversoirs de plus de 914 mm (3 pi).

Figure 20 - Déversoir rectangulaire sans contractions - Caractéristiques physiques



où :

- B : largeur du canal d'approche - largeur minimale de 305 mm (1 pi);
- B : longueur du déversoir - longueur égale à la largeur du canal d'approche;
- P : hauteur de la pelle - distance comprise entre la base du canal et l'arête du déversoir; elle est égale à au moins 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- h : hauteur d'eau dans le déversoir, au point de mesure;
- P_m : emplacement du point de mesure - situé en amont du déversoir, à une distance égale à au moins 4 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir.

Pour des raisons économiques, la longueur maximale pour ce type de déversoir n'excède généralement pas 2,4 m (8 pi).

Hauteur :

La hauteur minimale et la hauteur maximale de mesure doivent de préférence être maintenues respectivement à 61 mm (0,2 pi) et 610 mm (2 pi)⁽⁴⁾.

La hauteur minimale entre l'arête du déversoir et le fond du canal doit être d'au moins 305 mm (1 pi). Il est très important que la hauteur de la pelle soit suffisante car c'est cet élément qui contribue à réduire la vitesse d'approche.

4.2.3. Gamme de mesures

Les déversoirs rectangulaires sans contraction peuvent mesurer des débits variant entre 8,4 l/s (1,9 gal_{UK}/s) pour un déversoir de 305 mm (1 pi) de longueur à une hauteur de 61 mm (0,2 pi) et 10 534 l/s (2 317 gal_{UK}/s) pour un déversoir de 3 m (10 pi) de longueur à une hauteur de 1 524 mm (5 pi).

Le Tableau 26 - Déversoir rectangulaire sans contraction - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre présente l'étendue des débits recommandés en écoulement libre, pour des déversoirs de différentes dimensions.

4.2.4. Équation de débit en écoulement libre

Le débit d'eau dans un déversoir est influencé de façon importante par ses caractéristiques physiques et celles du canal d'approche. Idéalement l'équation devrait tenir compte de ces différents facteurs d'influence. Dans le cas des déversoirs, il n'existe pas d'équation universelle qui tient compte de tous les facteurs régissant l'écoulement et qui est applicable à toutes les installations⁽²⁴⁾.

Tableau 26 - Déversoir rectangulaire sans contraction - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre

Largeur de la nappe		Hauteur minimum		Débit minimum		Hauteur maximum		Débit maximum	
m	pi	mm	pi	l/s	gal _{UK} /s	mm	pi	l/s	gal _{UK} /s
0,3	1	61	0,2	8,44	1,86	152	0,5	33,41	7,35
0,5	1,5	61	0,2	12,66	2,78	229	0,75	91,75	20,18
0,6	2	61	0,2	16,88	3,71	305	1,0	188,6	41,49
0,8	2,5	61	0,2	21,10	4,64	381	1,25	328,5	72,26
0,9	3	61	0,2	25,32	5,57	457	1,5	521	114,61
1,2	4	61	0,2	33,76	7,41	610	2,0	1068	234,83
1,5	5	61	0,2	42,20	9,28	762	2,5	1863	409,87
1,8	6	61	0,2	50,64	11,15	1829	3,0	2945	647,82
2,4	8	61	0,2	67,52	14,82	1219	4,0	6032	1326,8
3	10	61	0,2	84,40	18,56	1524	5,0	10534	2317,2

L'équation de Francis est une équation simple, qui permet une mesure adéquate du débit avec marge d'erreur de $\pm 1 \%$, lorsque la hauteur d'eau dans le déversoir est inférieure au $1/3$ de la longueur de l'arête. Cette précision diminue lorsque le rapport entre la hauteur d'eau et la longueur de l'arête augmente {marge d'erreur $\pm 1 \%$ (ratio 1 : 3) à $\pm 30 \%$ (ratio 1 : 1)}⁽²⁾.

Cette équation de débit, résultant de la hauteur/débit associée à un écoulement libre, s'exprime comme suit :

$$Q = Cb h^{3/2} \quad (25)$$

où :

- Q est le débit en mètres cubes ou pieds cubes par seconde;
- C est le coefficient (1,8384 pour des m³/s et 3,33 pour des pi³/s);
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds;
- h est la hauteur d'eau mesurée dans le déversoir, en mètres ou en pieds.

L'équation de Kindsvater-Carter, considérée comme plus précise que l'équation de Francis, commence à être utilisée de plus en plus fréquemment, surtout lorsque la hauteur d'eau dans le déversoir est supérieure au 1/3 de la longueur de l'arête ⁽²⁰⁾. Elle s'exprime ainsi :

$$Q = 2/3\sqrt{2g}(0,602 + 0,075h/P)(b - 0,001)(h + 0,001)^{3/2} \quad (26)$$

Cette équation peut être réduite à la forme suivante ⁽⁶⁾ :

$$Q = C_e b_e h_e^{3/2} \quad (27)$$

où :

- Q est le débit en mètres cubes ou pieds cubes par seconde;
- C_e est le coefficient (1,8876 + 0,4 h/P pour des m³/s et 3,4186 + 0,4 h/P pour des pi³/s;
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds;
- b_e est la longueur efficace de l'arête du déversoir en mètres (b - 0,001)⁽²⁰⁾ ou en pieds (b - 0,003)⁽⁶⁾;
- h est la hauteur d'eau mesurée dans le déversoir, en mètres ou en pieds, au point de mesure;
- h_e est la hauteur efficace d'eau en mètres (h + 0,001) ou en pieds (h + 0,003);
- P est la hauteur de la pelle en mètres ou en pieds.

Cette équation est plus avantageuse du fait qu'elle prend en considération la vitesse d'écoulement dans la section d'approche. Il n'est donc pas nécessaire de tenir compte de ce facteur lors de la compilation des résultats.

4.2.5. Précision

Le déversoir rectangulaire sans contraction offre, en écoulement libre, une précision comparable à celle des canaux de mesure. En laboratoire, l'erreur relative pour ce type de déversoir varie entre ± 1,5 et ± 2 % ⁽³⁾.

Sur le terrain, ce déversoir peut donner, dans les meilleures conditions d'installation, des mesures dont l'erreur est de l'ordre de 5 % ⁽²³⁾. Un bon contrôle de la vitesse d'approche est très important toutefois, car une vitesse d'approche trop grande peut faire augmenter l'erreur de mesure à plus de 20 % ⁽⁶⁾.

4.2.6. Corrections

Écoulement noyé

Lorsque le déversoir fonctionne en écoulement noyé, la seule façon de remédier à la situation consiste à modifier les installations de mesure ou tout simplement à changer de type d'élément de mesure, afin de favoriser un écoulement libre.

Vitesse d'approche inadéquate

Il est possible de corriger la vitesse d'approche en augmentant simplement la hauteur de la pelle du déversoir. Si les installations ne permettent pas ce changement, il est alors recommandé d'utiliser l'équation de Kindsvater-Carter, qui tient compte de la vitesse d'approche.

Si l'équation de Francis est utilisée, il est possible de corriger pour la vitesse d'approche en remplaçant dans l'équation $h^{3/2}$ par l'équation 25⁽⁶⁾ :

$$(h + h_c)^{3/2} - h_c^{3/2} \quad (28)$$

L'équation prend alors la forme suivante⁽⁶⁾ :

$$Q_c = Cb[(h + h_c)^{3/2} - h_c^{3/2}] \quad (29)$$

où :

- Q_c est le débit corrigé en m^3/s ou en pi^3/s ;
- C est le coefficient (1,8384 pour des m^3/s et 3,33 pour des pi^3/s);
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds;
- h est la hauteur d'eau mesurée en mètres ou en pieds;
- h_c est $V^2/2g$;
- V est la vitesse mesurée en m/s ou en pi/s ;
- g est la constante gravitationnelle en m/s^2 ou en pi/s^2 .

4.3. Déversoir rectangulaire avec contractions

Le déversoir rectangulaire avec contractions est un déversoir dont l'ouverture est moins grande que celle du canal dans lequel il est placé.

4.3.1. Description

Ce déversoir est construit avec une ouverture rectangulaire et est placé au centre du canal. C'est un déversoir à arête vive, placé perpendiculairement au sens de l'écoulement et rigoureusement au niveau dans les plans horizontal et vertical.

4.3.2. Dimensions

Pour que ce type de déversoir donne des mesures exactes de débit, il est nécessaire que les dimensions normatives soient respectées lors de la fabrication et de son installation.

La Figure 21 - Déversoir rectangulaire avec contractions - Caractéristiques physiques présente les caractéristiques physiques du déversoir rectangulaire avec contractions et les dimensions normatives de chacune des parties.

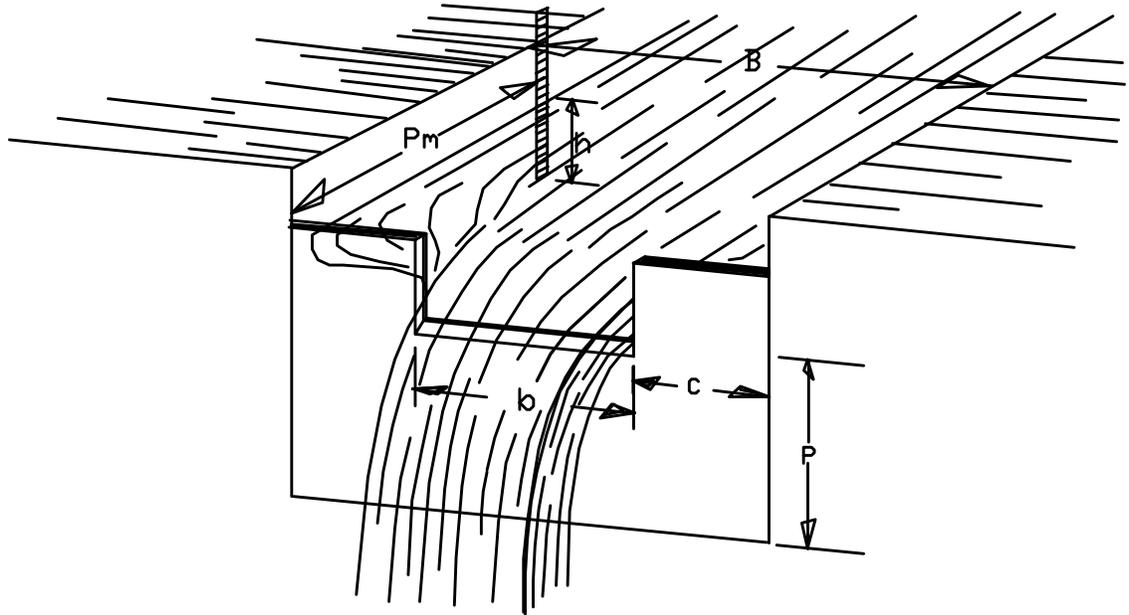
En plus de l'information fournie à la Figure 21, il importe de tenir compte des considérations suivantes lors de la fabrication du déversoir :

Longueur :

La longueur minimale (b) pour ce type de déversoir est de 305 mm (1 pi), cependant, la longueur du déversoir doit être au moins deux fois supérieure à la hauteur maximale de mesure (h_{\max})⁽⁴⁾.

La longueur des déversoirs (b) augmente par tranches de 152 mm (0,5 pi) pour les déversoirs de moins de 914 mm (3 pi), et par tranches de 305 mm (1 pi) pour les déversoirs de plus de 914 mm (3 pi).

Figure 21 - Déversoir rectangulaire avec contractions - Caractéristiques physiques



où :

- B : largeur du canal d'approche - largeur minimale de 305 mm (1 pi);
- b : longueur du déversoir - longueur minimale de 305 mm (1 pi);
- P : hauteur de la pelle - distance comprise entre la base du canal et l'arête du déversoir; elle est égale à au moins 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- h : hauteur d'eau dans le déversoir, au point de mesure;
- Pm: emplacement du point de mesure - situé en amont du déversoir, à une distance égale à au moins 4 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- c : contractions latérales - égales à au moins 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir, 305 mm (1 pi) minimum.

Pour des raisons économiques, la longueur maximale pour ce type de déversoir n'excède généralement pas 2,4 m (8 pi).

La longueur des contractions latérales (c) ne devrait jamais être inférieure à 305 mm (1 pi).

Hauteur :

La hauteur minimale et la hauteur maximale de mesure doivent de préférence être maintenues respectivement à 61 mm (0,2 pi) et 610 mm (2 pi)⁽⁴⁾.

La hauteur minimale entre l'arête du déversoir et le fond du canal (P) doit être d'au moins 305 mm (1 pi). Il est très important que la hauteur de la pelle soit suffisante, car c'est cet élément qui contribue à réduire la vitesse d'approche.

4.3.3. Gamme de mesures

Les déversoirs rectangulaires avec contractions peuvent mesurer des débits variant entre 8,1 l/s (1,8 gal_{UK}/s) pour un déversoir de 305 mm (1 pi) de longueur à une hauteur de 61 mm (0,2 pi) et 9 486 l/s (2 087 gal_{UK}/s) pour un déversoir de 3 m (10 pi) de longueur à une hauteur de 1 524 mm (5 pi).

Le Tableau 27 - Déversoir rectangulaire avec contractions - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre présente l'étendue de mesure recommandée en écoulement libre, pour des déversoirs de différentes dimensions.

4.3.4. Équation de débit en écoulement libre

Le débit d'eau dans le déversoir est influencé de façon importante par ses caractéristiques physiques et celles du canal d'approche. Idéalement l'équation de débit devrait tenir compte de tous les facteurs d'influence. Pour ce type de déversoir, il n'existe pas d'équation universelle qui tient compte de tous les facteurs régissant l'écoulement et qui est applicable à toutes les installations⁽²⁴⁾.

L'équation de débit résultant de la hauteur/débit, associée à un écoulement libre généralement employée est celle de Francis. Elle s'exprime comme suit :

$$Q = C(b - 0,1nh)h^{3/2} \quad (30)$$

où :

- Q est le débit en mètres cubes ou en pieds cubes par seconde;
- C est le coefficient (1,8384 pour m³/s et 3,33 pour pi³/s);
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds;
- n est le nombre de contractions;
- h est la hauteur d'eau mesurée dans le déversoir en mètres ou en pieds.

L'équation de Kindsvater-Carter tient compte des propriétés du liquide. Du fait que le déversoir a des contractions, le coefficient diffère pour tenir compte de l'effet de la largeur du déversoir en rapport à la largeur du canal. La valeur de la longueur efficace de l'arête (b_e) est également différente⁽²⁰⁾. Cette équation s'exprime ainsi :

$$Q = C \sqrt{g} \left(1 - 0,0035 \frac{h}{P}\right) (b + 0,0025)(h + 0,001)^{3/2} \quad (31)$$

où :

- Q est le débit en m³ ou pi³/s;
- C est le coefficient (0,554 pour des m³/s et 0,560 pour des pi³/s);
- g est la gravité en m/s² ou en pi/s²;
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds;
- h est la hauteur d'eau mesurée dans le déversoir en mètres ou en pieds,
- P est la hauteur de la pelle en mètres ou en pieds.

Tableau 27 - Déversoir rectangulaire avec contractions - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre

Largeur de la nappe		Hauteur minimum		Débit minimum		Hauteur maximum		Débit maximum	
m	pi	mm	pi	l/s	gal _{UK} /s	mm	pi	l/s	gal _{UK} /s
0,3	1	61	0,2	8,1	1,78	152	0,5	30	6,6
0,5	1,5	61	0,2	12,32	2,71	229	0,75	82,7	18,19
0,6	2	61	0,2	16,54	3,64	305	1,0	169,6	37,3
0,8	2,5	61	0,2	20,76	4,57	381	1,25	297,3	65,4
0,9	3	61	0,2	24,98	5,49	457	1,5	467,2	102,78
1,2	4	61	0,2	33,41	7,35	610	2,0	960	211,16
1,5	5	61	0,2	41,91	9,22	762	2,5	1676	368,72
1,8	6	61	0,2	50,12	11,03	1829	3,0	2645	581,8
2,4	8	61	0,2	67,11	14,76	1219	4,0	5437	1196
3	10	61	0,2	84,10	18,5	1524	5,0	9486	2086,7

4.3.5. Précision

Le déversoir rectangulaire avec contractions offre, en écoulement libre, une précision comparable à celle des canaux de mesure. L'erreur en laboratoire pour ce type de déversoir est d'environ $\pm 1,5$ à 2% ⁽³⁾.

Sur le terrain, ce déversoir peut donner, dans les meilleures conditions d'installation, des mesures avec une erreur de l'ordre de $\pm 5\%$ ⁽²²⁾. Un bon contrôle de la vitesse d'approche est très important toutefois, car une vitesse d'approche trop grande peut faire augmenter l'erreur de mesure à plus de 20% ⁽⁶⁾.

4.3.6. Corrections

Écoulement noyé

Lorsque le déversoir opère en écoulement noyé, la seule façon de remédier à la situation consiste à modifier les installations de mesure ou tout simplement à changer de type d'élément, afin de favoriser un écoulement libre.

Vitesse d'approche inadéquate

Il est possible de corriger la vitesse d'approche en augmentant seulement la hauteur de la pelle du déversoir. Si les installations ne permettent pas d'augmenter la hauteur de la pelle, il est alors recommandé d'utiliser l'équation de Kindsvater-Carter.

Si l'équation de Francis est utilisée, il est possible de corriger pour la vitesse d'approche en remplaçant le $h^{3/2}$ de l'équation par :

$$(h + h_c)^{3/2} - h_c^{3/2} \quad (32)$$

L'équation prend alors la forme suivante ⁽⁶⁾ :

$$Q_c = C(b - 0,1nh)[(h + h_c)^{3/2} - h_c^{3/2}] \quad (33)$$

où :

- Q_c est le débit corrigé en m^3/s ou en pi^3/s ;
- C est le coefficient (0,554 pour des m^3/s et 0,560 pour des pi^3/s);
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds;
- h est la hauteur d'eau mesurée en mètres ou en pieds;
- h_c est $V^2/2g$;
- V est la vitesse mesurée en m/s ou en pi/s ;
- g est la constante de la gravité en m/s^2 ou en pi/s^2 .

Longueur des contractions

Lorsque les contractions latérales ne respectent pas les dimensions normatives de fabrication, il en résulte une erreur dans la mesure du débit, qui peut être corrigée en modifiant quelques paramètres dans l'équation de Kindsvater-Carter.

L'équation prend alors la forme suivante ⁽²⁰⁾ :

$$Q = C \sqrt{g} (1 + ah/P) (b + k) (h + 0,001)^{3/2} \quad (34)$$

où :

- Q est le débit en m³/s ou en pi³/s;
- C est un coefficient variable en fonction du rapport b/B; où b et B sont respectivement les largeurs du déversoir et du canal d'approche;
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds;
- h est la hauteur d'eau mesurée en mètres ou en pieds;
- g est la gravité en m/s² ou en pi/s²;
- a est le coefficient variable en fonction du rapport b/B; où b et B sont respectivement les largeurs du déversoir et du canal d'approche;
- k est le coefficient variable en fonction du rapport b/B; soit le rapport entre la largeur du déversoir (b) et la largeur du canal d'approche (B);
- P est la hauteur de la pelle en mètres ou en pieds.

Les valeurs des coefficients «a», «C» et «k» sont présentées au Tableau 28.

Tableau 28 - Déversoir rectangulaire avec contractions - Coefficients «a», «C» et «k»

Rapport b/B	a		C		k	
	mètres	pieds	mètres	pieds	mètres	pieds
0,9	0,107	0,351	0,564	0,507	0,0038	0,0125
0,8	0,076	0,249	0,562	0,520	0,0042	0,0138
0,7	0,050	0,164	0,560	0,532	0,0040	0,0131
0,6	0,030	0,098	0,559	0,543	0,0035	0,0115
0,5	0,022	0,072	0,558	0,546	0,0030	0,0098
0,4	0,020	0,066	0,557	0,552	0,0027	0,0089
0,3	0,003	0,010	0,556	0,556	0,0025	0,0082
0,2 - 0,0	-0,003	-0,010	0,555	0,559	0,0025	0,0082

b/B = rapport entre la largeur du déversoir (b) et la largeur du canal d'approche (B).

4.4. Déversoir trapézoïdal (Cipolletti)

Le déversoir trapézoïdal (Cipolletti) ressemble en tous points au déversoir rectangulaire avec contractions, sauf que les arêtes latérales sont inclinées (1 : 4).

4.4.1. Description

Le déversoir trapézoïdal est formé d'une ouverture à profil convergent vers le bas, placé au centre du canal, qui laisse passer l'eau et permet d'en mesurer la quantité. C'est un déversoir à arête vive, aux côtés inclinés placés perpendiculairement au sens de l'écoulement et rigoureusement de niveau dans les plans horizontal et vertical⁽⁴⁾.

4.4.2. Dimensions

Pour que ce type de déversoir donne des mesures exactes de débit, il est nécessaire que les dimensions normatives soient respectées lors de la fabrication et de son installation.

La Figure 22 - Déversoir trapézoïde (Cipolletti) - Caractéristiques physiques présente les caractéristiques physiques du déversoir trapézoïdal et les dimensions de chacune de ses parties.

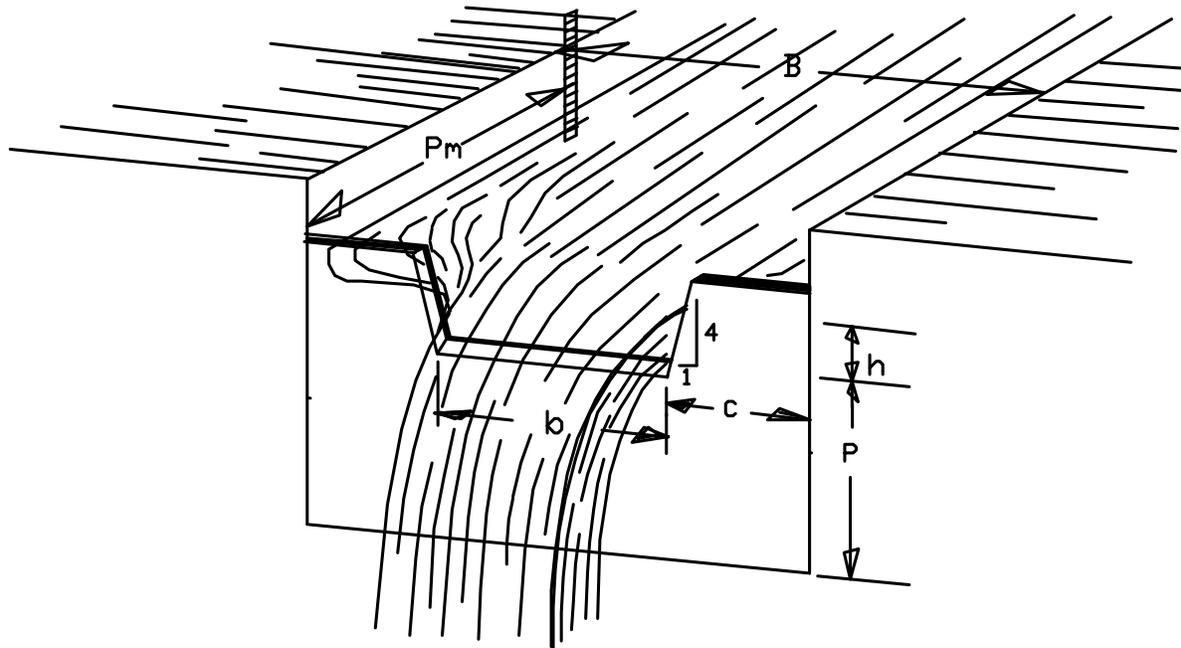
En plus de l'information fournie à la Figure 22, les considérations suivantes doivent être examinées :

La longueur de l'arête du déversoir (b) doit être au moins deux fois la hauteur maximale d'eau dans le déversoir (h_{\max}).

La hauteur minimale et la hauteur maximale, au point de mesure, doivent de préférence être maintenues respectivement à 61 mm (0,2 pi) et 610 mm (2 pi)⁽⁴⁾.

La longueur des contractions latérales ne doit jamais être inférieure à 305 mm (1 pi) et l'angle de l'inclinaison des arêtes est de 14,04° (rapport de la longueur des côtés 1/4).

Figure 22 - Déversoir trapézoïde (Cipolletti) - Caractéristiques physiques



- B : largeur du canal d'approche - largeur minimale de 305 mm (1 pi);
- b : longueur du déversoir - longueur minimale de 305 mm (1 pi);
- P : hauteur de la pelle - distance comprise entre la base du canal et l'arête du déversoir; elle est égale à au moins 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- h : hauteur d'eau dans le déversoir, au point de mesure;
- P_m : emplacement du point de mesure - situé en amont du déversoir, à une distance égale à au moins 4 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau susceptible d'être mesurée dans le déversoir;
- c : contractions latérales - égales à au moins 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir, 305 mm (1 pi) minimum.

4.4.3. Gamme de mesures

Les déversoirs de forme trapézoïdale (Cipolletti) peuvent mesurer des débits variant entre 8,5 l/s (1,9 gal_{UK}/s) pour un déversoir de 305 mm (1 pi) de longueur à une hauteur de 61 mm (0,2 pi) et 10 619 l/s (2 336 gal_{UK}/s) pour un déversoir de 3 m (10 pi) de longueur à une hauteur de 1 524 mm (5 pi).

Le Tableau 29 - Déversoir trapézoïdal (Cipolletti) - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre présente l'étendue recommandée de mesure en écoulement libre, pour les déversoirs de forme trapézoïdale de différentes dimensions.

4.4.4. Équation de débit en écoulement libre

Le débit d'eau dans le déversoir est influencé de façon importante par ses caractéristiques physiques et par celles du canal d'approche. Idéalement, l'équation de débit devrait tenir compte de tous les facteurs. Pour ce type de déversoir, il n'existe pas d'équation universelle qui tient compte de tous les facteurs régissant l'écoulement et qui est applicable à toutes les installations.

L'équation de débit résultant de la hauteur/débit associée à un écoulement libre, généralement employée, s'exprime comme suit :

$$Q = Cb h^{3/2} \quad (35)$$

où :

- Q est le débit en mètres cubes ou en pieds cubes par seconde;
- C est le coefficient (1,859 pour m³/s et 3,367 pour pi³/s);
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds;
- h est la hauteur d'eau en mètres ou en pieds, au point de mesure.

Tableau 29 - Déversoir trapézoïdal (Cipolletti) - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre

Largeur de la nappe		Hauteur minimum		Débit minimum		Hauteur maximum		Débit maximum	
m	pi	mm	pi	l/s	gal _{UK} /s	mm	pi	l/s	gal _{UK} /s
0,3	1	61	0,2	8,52	1,87	152	0,5	33,7	7,41
0,5	1,5	61	0,2	12,8	2,82	229	0,75	92,88	20,43
0,6	2	61	0,2	17,05	3,75	305	1,0	190,6	41,92
0,8	2,5	61	0,2	21,32	4,69	381	1,25	334,1	73,5
0,9	3	61	0,2	25,57	5,62	457	1,5	526,7	115,9
1,2	4	61	0,2	33,98	7,47	610	2,0	1079	237,3
1,5	5	61	0,2	42,76	9,41	762	2,5	1883	414,2
1,8	6	61	0,2	51,25	11,27	1829	3,0	2973	654
2,4	8	61	0,2	68,24	15,01	1219	4,0	6060	1333
3	10	61	0,2	85,23	18,75	1524	5,0	10619	2335,9

4.4.5. Précision

Le déversoir trapézoïdal offre, en écoulement libre, une précision inférieure à celle des autres déversoirs de mesure⁽²⁾.

Sur le terrain, ce déversoir peut donner, dans les meilleures conditions d'installation, des mesures dont l'erreur de mesure est de l'ordre de ± 5 à ± 7 %⁽²²⁾. Un bon contrôle de la vitesse d'approche est très important toutefois, car une vitesse d'approche trop grande peut faire augmenter l'erreur de mesure à plus de 30 %⁽⁶⁾.

4.4.6. Corrections

Écoulement noyé

Lorsque le déversoir opère en écoulement noyé, la seule façon de remédier à la situation consiste à modifier les installations, ou tout simplement à changer de type d'élément de mesure, afin de favoriser un écoulement libre.

Vitesse d'approche inadéquate

Il est possible de corriger la vitesse d'approche en variant simplement la hauteur de la pelle du déversoir. Si les installations ne permettent pas d'augmenter la hauteur de la pelle, il est possible de corriger pour la vitesse d'approche en remplaçant dans le « $h^{3/2}$ » de l'équation 35 par ⁽²⁾ :

$$(h + 1,5 h_c)^{3/2} \quad (36)$$

L'équation prend alors la forme suivante :

$$Q_c = Cb(h + 1,5 h_c)^{3/2} \quad (37)$$

où :

- Q_c est le débit corrigé en m^3/s ou en pi^3/s ;
- C est le coefficient (1,8384 pour des m^3/s et 3,33 pour des pi^3/s);
- b est la longueur de l'arête du déversoir en mètres ou en pieds, au point de mesure;
- h est la hauteur d'eau mesurée en mètres ou en pieds;
- h_c est $V^2/2g$;
- V est la vitesse mesurée en m/s ou en pi/s ;
- g est la gravité en m/s^2 ou en pi/s^2 .

Longueur des contractions

Lorsque les contractions latérales ne respectent pas les dimensions de fabrication, il en résulte une erreur dans la mesure du débit. Aucun des documents cités ne fournit une méthode qui tient compte de ce facteur.

Pour obtenir une valeur de débit précise, il importe donc de rendre le déversoir conforme aux normes. S'il est impossible de modifier le déversoir, il est alors nécessaire de procéder à l'étalonnage en utilisant la méthode volumétrique ou la méthode de dilution.

4.5. Déversoir triangulaire

Le déversoir triangulaire est le plus simple et le plus répandu des déversoirs à largeur d'écoulement croissante.

4.5.1. Description

Le déversoir triangulaire est formé d'une ouverture en V symétrique, aménagée dans une plaque mince, verticale, placée au centre du canal d'écoulement. C'est un déversoir à arête vive, disposé perpendiculairement à l'écoulement.

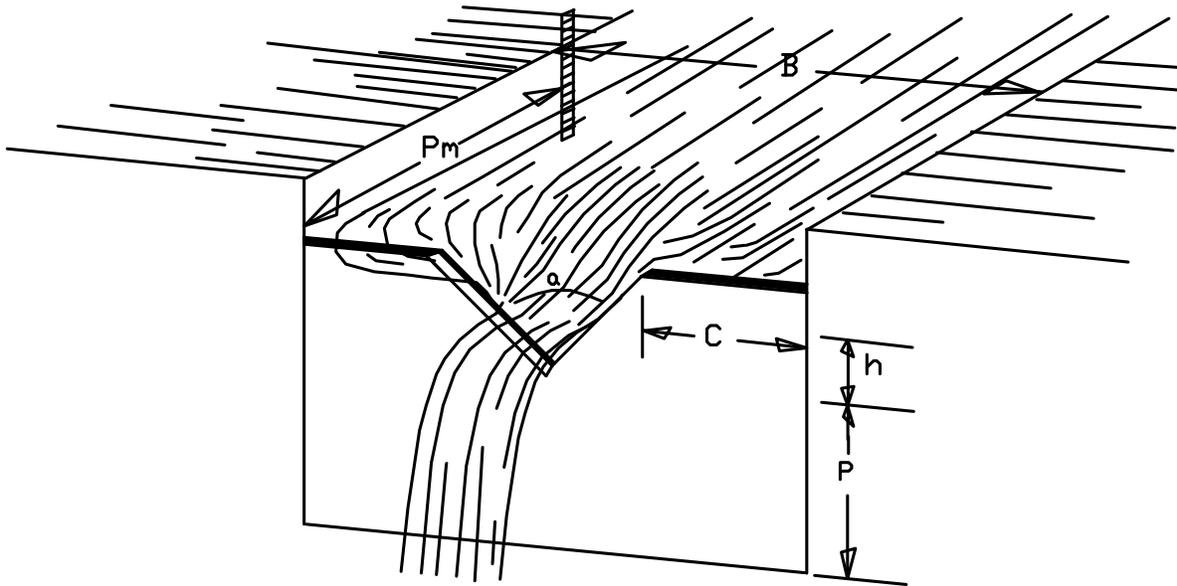
Les déversoirs les plus fréquemment employés sont les déversoirs de 90° , pour les plus grandes valeurs de débit, et ceux de 45° pour les valeurs de débit situées dans la moyenne de la gamme de mesures pour ce type d'équipement. Dans des situations particulières, les déversoirs de 60° seront utilisés pour des débits dont la limite supérieure est intermédiaire par rapport à celles des déversoirs précédents, et ceux de 30° et de $22,5^\circ$ seront utilisés pour les très faibles débits.

4.5.2. Dimensions

Pour que ce type de déversoir donne des mesures exactes de débit, les dimensions normatives doivent être respectées lors de la fabrication et de son installation.

La Figure 23 - Déversoir triangulaire - Caractéristiques physiques présente les caractéristiques physiques du déversoir triangulaire et les dimensions de chacune des parties.

Figure 23 - Déversoir triangulaire - Caractéristiques physiques



où :

- B : largeur du canal d'approche - largeur minimale de 305 mm (1 pi);
- α : angle du déversoir;
- P : hauteur de la pelle - distance comprise entre la base du canal et l'arête du déversoir; elle est égale à au moins 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- h : hauteur d'eau dans le réservoir, au point de mesure;
- P_m : emplacement du point de mesure - situé en amont du déversoir, à une distance égale à au moins 4 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- C : contractions latérales - égales à au moins 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir, 305 mm (1 pi) minimum.

En plus de l'information fournie à la Figure 23, les considérations suivantes doivent être examinées.

La hauteur minimale et la hauteur maximale au point de mesure doivent de préférence être maintenues respectivement à 61 mm (0,2 pi) et 610 mm (2 pi) ⁽⁴⁾.

La longueur des contractions latérales (c) ne doit jamais être inférieure à 305 mm (1 pi).

La bissectrice de l'angle de l'échancrure doit être verticale et équidistante des côtés du canal d'écoulement ⁽²⁵⁾.

4.5.3. Gamme de mesures

Les déversoirs de forme triangulaire peuvent mesurer des débits variant entre 0,252 l/s (0,055 gal_{UK}/s) pour un déversoir de 22,5° à une hauteur de 61 mm (0,2 pi) et 400,4 l/s (88,1 gal_{UK}/s) pour un déversoir de 90° à une hauteur de 610 mm (2 pi). En somme, ce type de déversoir est un excellent instrument pour la mesure de petits débits ⁽⁶⁾.

Le Tableau 30 présente l'étendue recommandée de mesure en écoulement libre, pour les déversoirs de forme triangulaire de différentes dimensions.

4.5.4. Équation de débit en écoulement libre

Le débit d'eau dans le déversoir est influencé de façon importante par ses caractéristiques physiques et par celles du canal d'approche. Idéalement, l'équation de débit devrait tenir compte de tous ces facteurs. Pour ce type de déversoir, il n'existe pas d'équation universelle qui tient compte de tous les facteurs régissant l'écoulement et qui est applicable à toutes les installations ⁽²⁴⁾.

Tableau 30 - Déversoir triangulaire - Débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre

Angle du déversoir	Hauteur minimum		Débit minimum		Hauteur maximum		Débit maximum	
	mm	pi	l/s	gal _{UK} /s	mm	pi	l/s	gal _{UK} /s
22,5	61	0,2	0,252	0,055	610	2,0	79,6	17,51
30	61	0,2	0,343	0,075	610	2,0	108,3	23,82
45	61	0,2	0,524	0,115	610	2,0	165,8	36,47
60	61	0,2	0,731	0,161	610	2,0	231,2	50,85
90	61	0,2	1,266	0,278	610	2,0	400,4	88,08

L'équation de débit résultant de la hauteur/débit associée à un écoulement libre s'exprime comme suit ⁽²³⁾ :

$$Q = C(8/15)\sqrt{2g}(\tan \theta/2)h^{5/2} \quad (38)$$

où :

- Q est le débit en m³/s ou en pi³/s;
- C est le coefficient f (h/P,P/B,θ);
- h la hauteur d'eau en mètres ou en pieds;
- P est la hauteur de la pelle en mètres ou en pieds;
- B est la largeur du canal d'approche en mètres ou en pieds;
- θ est l'angle du déversoir;
- g est la constante gravitationnelle en m/s² ou en pi/s².

Lorsque l'angle du déversoir est précis, il est possible de faciliter la solution de l'équation en combinant dans le seul coefficient «C» toutes les constantes. La formule devient la suivante ⁽⁴⁾ :

$$Q = C^1 h^{5/2} \quad (39)$$

où :

- Q est le débit en m³/s ou pi³/s;
- C¹ est le coefficient dont la valeur varie selon l'angle du déversoir et l'unité de mesure;
- h est la hauteur d'eau dans le déversoir en mètres ou en pieds.

Le Tableau 31 - Déversoir triangulaire - Valeur du coefficient «C1» présente les valeurs du coefficient «C¹» selon l'angle du déversoir et le système de mesure utilisé.

Tableau 31 - Déversoir triangulaire - Valeur du coefficient «C¹»

Angle du déversoir	Valeur du coefficient «C ¹ »			
	Système métrique		Système anglais	
Degré	m ³ /d	l/s	pi ³ /s	gal _{UK} /s
22,5	23 668	273,94	0,497	3,096
30	32 192	372,6	0,676	4,211
45	49 289	570,5	1,035	6,447
60	68 719	795,4	1,443	8,988
90	119 052	1377,9	2,5	15,572

4.5.5. Précision

Le déversoir triangulaire permet d'obtenir, en écoulement libre, une précision supérieure à celle des autres déversoirs de mesure ⁽²⁾. En laboratoire, l'erreur de la mesure du débit varie entre 1 et 2 % ⁽³⁾. Sur le terrain, ce déversoir peut donner, dans les meilleures conditions d'installation, des mesures dont l'erreur est de l'ordre de ± 2 à ± 5 % ⁽²²⁾. Un bon contrôle de la vitesse d'approche est très important toutefois, car une vitesse d'approche trop grande peut faire augmenter l'erreur de mesure à plus de 30 % ⁽⁶⁾.

4.5.6. Corrections

Écoulement noyé

Lorsque le déversoir opère en écoulement noyé, la seule façon de corriger la situation consiste à modifier les installations de mesure ou tout simplement à changer de type d'élément, afin de favoriser un écoulement libre.

Vitesse d'approche inadéquate

Il est possible de corriger la vitesse d'approche en augmentant simplement la hauteur de la pelle du déversoir.

Lorsque le déversoir est installé avec des contractions latérales conformes ($C \geq 2 h_{\max}$), la vitesse d'approche est généralement faible et adéquate.

Longueur des contractions

Lorsque les contractions latérales ne respectent pas les dimensions de fabrication, il en résulte une erreur dans la mesure du débit. Aucun des documents cités en référence ne fournit une méthode qui tient compte de ce facteur.

Pour obtenir une valeur de débit précise, il importe donc de construire un déversoir conforme aux normes. S'il est impossible de modifier le déversoir, il est alors nécessaire de procéder à l'étalonnage en utilisant la méthode volumétrique ou la méthode de dilution.

4.6. Déversoir combiné

Le déversoir combiné est utilisé dans des situations particulières, lorsque tout autre type d'élément de mesure ne peut convenir pour mesurer adéquatement les débits escomptés. Bien qu'il puisse être composé de diverses figures géométriques, il résulte généralement de la combinaison d'un déversoir rectangulaire et d'un déversoir en V.

Les paragraphes suivants traitent donc de la combinaison du déversoir en V de 90° et du déversoir rectangulaire avec contractions. L'appareil ainsi conçu est considéré comme le déversoir combiné standard.

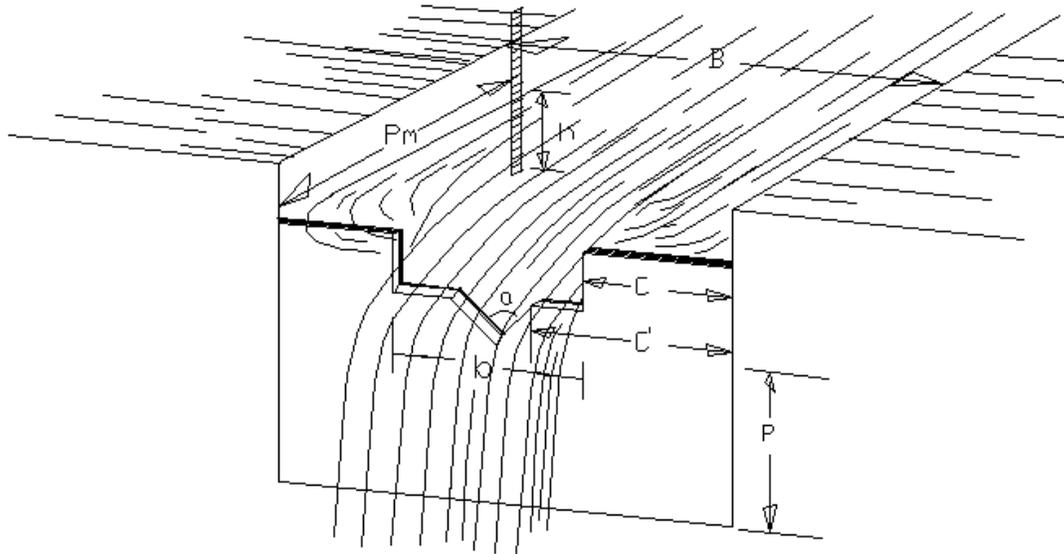
4.6.1. Description

Le déversoir combiné est un déversoir rectangulaire avec une ouverture en V, de 90°, symétrique et découpée au centre de l'arête. Il est fabriqué dans une plaque mince, placée verticalement au centre du canal d'écoulement. C'est un déversoir à arête vive, disposé perpendiculairement à l'écoulement.

4.6.2. Dimensions

Les normes de fabrication pour ce type de déversoir ne sont pas clairement définies. Néanmoins, chaque composante devrait être construite selon les normes établies pour la fabrication des déversoirs rectangulaires avec contractions et les déversoirs triangulaires de 90°. La hauteur du déversoir triangulaire peut varier ainsi que celle du déversoir rectangulaire avec contractions, et ce, en fonction des besoins de mesure. La Figure 24 - Déversoir combiné - Caractéristiques physiques présente les caractéristiques physiques du déversoir combiné (rectangulaire-triangulaire) et les dimensions de chacune de ses parties.

Figure 24 - Déversoir combiné - Caractéristiques physiques



où

- B : largeur du canal d'approche - largeur minimale de 610 mm (2 pi);
- b : longueur du déversoir - longueur minimale de 305 mm (1 pi);
- θ : angle du déversoir;
- P : hauteur de la pelle - égale à au moins 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- h : hauteur d'eau dans le déversoir - hauteur de mesure;
- P_m : emplacement du point de mesure - situé en amont du déversoir, à une distance égale à au moins 4 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- C : contractions latérales du déversoir rectangulaire - égales à 2 fois la hauteur maximale (h_{\max}) d'eau dans le déversoir;
- C_1 : contractions latérales du déversoir triangulaire - égales à 2 fois la hauteur d'eau maximale (h_{\max}), en supposant que ce déversoir soit seul à fonctionner.

En plus de l'information fournie à la Figure 24, les considérations suivantes doivent être examinées.

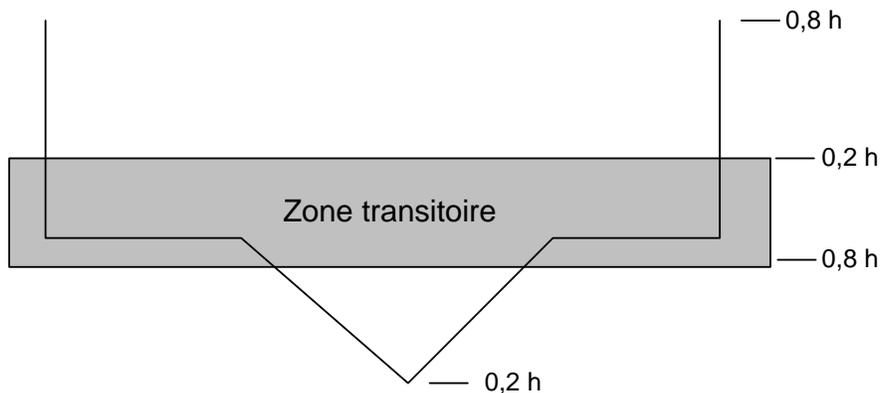
La longueur des contractions latérales (C et C_1) ne doit jamais être inférieure à 305 mm (1 pi), et ce, pour chacune des figures composantes.

La bissectrice de l'angle de l'échancrure doit être verticale et équidistante des côtés du déversoir rectangulaire et du canal d'écoulement.

4.6.3. Gamme de mesures

Les déversoirs combinés peuvent mesurer une plage de débit fort étendue. Cependant, seulement deux plages de débits devraient être retenues : celle comprise entre 0,2 et 0,8 de la hauteur du déversoir triangulaire et celle comprise entre 0,2 et 0,8 de la hauteur du déversoir rectangulaire. C'est donc dire que la zone comprise entre 0,8 de la hauteur du déversoir triangulaire et 0,2 de la hauteur du déversoir rectangulaire doit être considérée comme la zone transitoire, et que les débits de cette zone doivent être ignorés et considérés comme imprécis.

La figure suivante illustre la zone transitoire considérée comme imprécise :



Exemple : Supposons qu'un déversoir combiné dont la section triangulaire a 457 mm (1,5 pi) de hauteur et la section rectangulaire, 914 mm (3 pi), est utilisé. Les sections utiles de mesure sont donc celles comprises entre 91 mm (0,3 pi) et 366 mm (1,2 pi) du déversoir triangulaire et entre 183 mm (0,6 pi) et 732 mm (2,4 pi) du déversoir rectangulaire.

Lorsque ce déversoir est utilisé, il faut s'assurer au préalable que la période de mesure dans la zone transitoire sera de très courte durée, afin d'obtenir la meilleure précision possible.

Comme ce déversoir résulte de la combinaison de deux déversoirs dont les dimensions de chacun peuvent grandement varier, il n'est donc pas possible de présenter un tableau de débits minimum et maximum recommandés en écoulement libre. Le lecteur devra se référer aux tableaux présentés aux sections qui traitent des déversoirs sélectionnés.

4.6.4. Équation de débit en écoulement libre

L'utilisation du déversoir combiné comme mode de mesure du débit a fait l'objet de très peu de recherche en laboratoire et en chantier. L'équation de débit présentée a donc été conçue à partir d'un nombre d'essais limité⁽²⁾.

L'équation de débit résultant de la hauteur/débit associée à un écoulement libre, s'exprime comme suit⁽²⁾ :

$$Q = Ch_t^{1,72} - d + eb h_r^{1,5} \quad (40)$$

où :

- Q est le débit en m³/s ou en pi³/s;
- C constante (5,2 en système métrique, ou 3,9 en système anglais);
- h_t est la hauteur d'eau en mètres ou en pieds dans la section triangulaire;
- d constante (0,04 en système métrique, ou 1,5 en système anglais);
- h_r est la hauteur d'eau en mètres ou en pieds dans la section rectangulaire;
- e constante (1,82 en système métrique ou 3,3 en système anglais);
- b est la largeur en mètres ou en pieds dans la section rectangulaire.

Les calculs sont effectués comme si les deux déversoirs fonctionnaient indépendamment l'un de l'autre. En pratique, la hauteur au point de mesure (h_m) est la seule mesure obtenue. Les valeurs des hauteurs d'eau dans les sections triangulaire et rectangulaire (h_t et h_r) sont obtenues de la façon suivante, soit :

$$\begin{aligned} 0 &\leq h_t \leq \text{hauteur du triangle} \\ \text{Si } h_m &= h_{t\max} \text{ (hauteur du triangle) } h_r = 0 \\ \text{Si } h_m &> h_{t\max} \Rightarrow h_r = h_m - h_t \\ \text{Si } h_m &< h_{t\max} \Rightarrow h_t = h_m \text{ et } h_r = 0 \end{aligned}$$

4.6.5. Précision

Le déversoir combiné permet d'offrir, en écoulement libre, une précision inférieure à celle des autres déversoirs de mesure ⁽²⁾. En laboratoire, l'erreur de mesure pour ce type de déversoir est de l'ordre de ± 3 à 5 % ⁽³⁾.

Sur le terrain, ce déversoir peut donner, dans les meilleures conditions d'installation, des mesures dont l'erreur est de l'ordre de 5 à 10 % ⁽²²⁾. Un bon contrôle de la vitesse d'approche est très important toutefois, car une vitesse d'approche trop grande peut faire augmenter l'erreur de mesure à plus de 30 % ⁽⁶⁾.

4.6.6. Corrections

Écoulement noyé

Lorsque le déversoir fonctionne en écoulement noyé, la seule façon de corriger la situation consiste à modifier les installations de mesure ou tout simplement à changer de type d'élément de mesure, afin de favoriser un écoulement libre.

Vitesse d'approche inadéquate

Il est possible de corriger la vitesse d'approche en augmentant simplement la hauteur de la pelle du déversoir.

Lorsque le déversoir est installé avec des contractions latérales complètes, la vitesse d'approche est généralement faible et adéquate.

Longueur des contractions

Lorsque les contractions des côtés ne respectent pas les dimensions de fabrication, il en résulte une erreur dans la mesure du débit. Aucun des documents cités en référence ne fournit une méthode qui tient compte de ce facteur.

Pour obtenir une valeur de débit précise, il importe donc d'utiliser un déversoir conforme aux normes. S'il est impossible de le modifier, il est alors nécessaire de procéder à l'étalonnage en utilisant la méthode volumétrique ou la méthode de dilution.

4.7. Déversoir à insertion

Le déversoir à insertion est souvent désigné par « THEL-MAR », qui correspond au nom d'un fabricant. Les déversoirs à insertion sont de deux types : triangulaires et combinés. Les derniers offrent une capacité de mesure supérieure aux premiers, mais avec une précision moindre.

4.7.1. Description

Le déversoir le plus souvent rencontré est le déversoir de type combiné. Il est composé d'un déversoir rectangulaire et d'un déversoir triangulaire. C'est un déversoir rectangulaire avec une ouverture en V, de 90°, symétrique, découpée au centre de l'arête. C'est un déversoir à arête vive, disposé perpendiculairement à l'écoulement.

Le déversoir combiné est fabriqué dans une plaque de plastique transparent mince et verticale, placée au centre d'un cadre de métal servant de support de fixation dans le conduit d'écoulement. Le déversoir est relié au cadre de métal par un joint de caoutchouc, qui sert de joint d'étanchéité tout en donnant une légère flexibilité au dispositif. Le déversoir est gradué aux 2 mm, et l'unité de mesure est le gallon américain par jour⁽²⁶⁾.

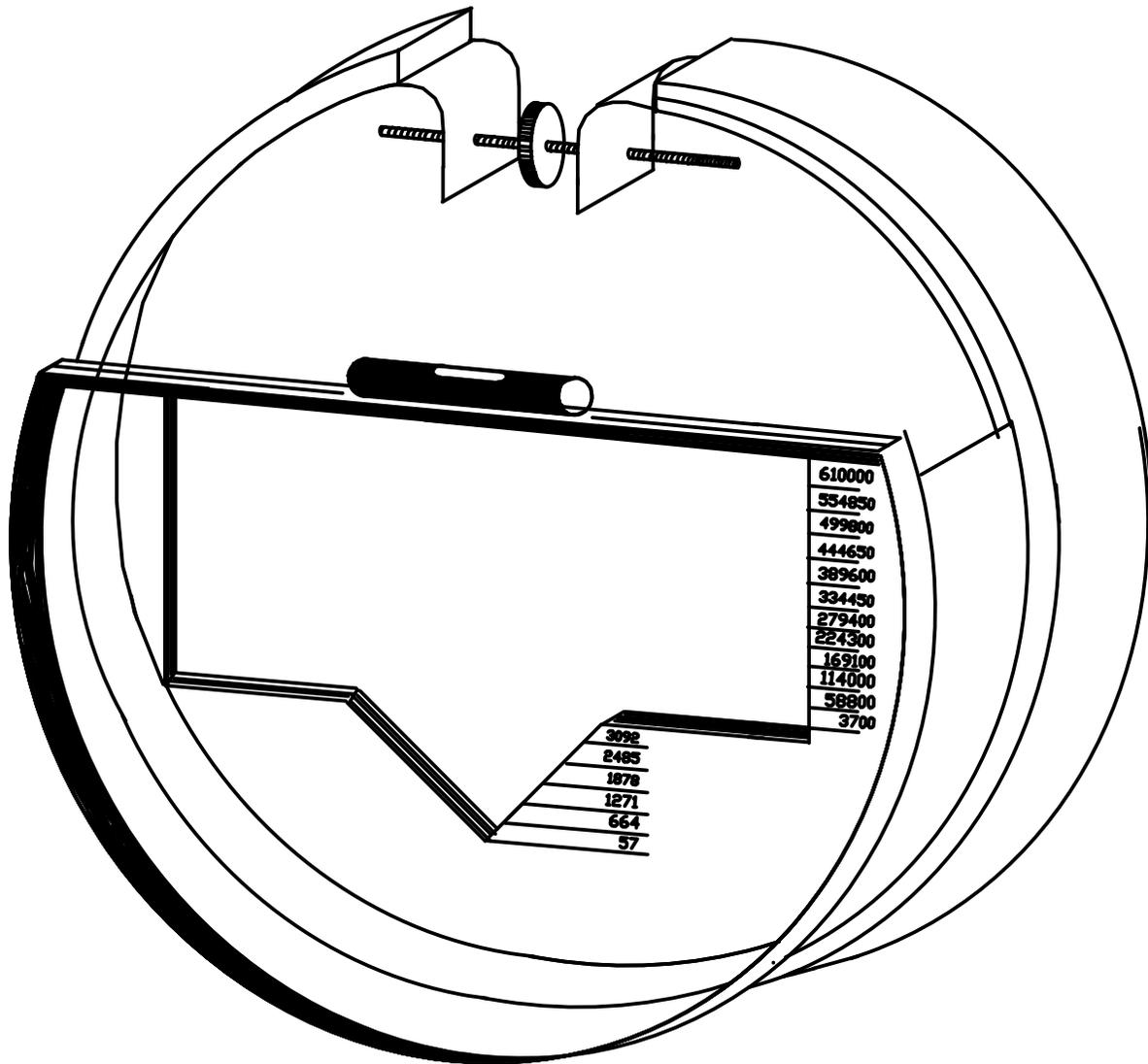
La Figure 25 - Déversoir à insertion - Caractéristiques physiques représente un déversoir à insertion.

4.7.2. Dimensions

Les normes de fabrication pour ce type de déversoir sont définies par le fabricant. Peu de gens se préoccupent de la dimension des composantes, puisqu'il n'est pas fabriqué ou modifié sur le site d'installation. Lors de la réparation de ce type de déversoir, il faut s'assurer que chaque composante conserve ses dimensions initiales.

La dimension des déversoirs à insertion correspond généralement au diamètre de l'anneau de support. Les dimensions standard sont de 152, 203, 254, 305, 356, 381 et 406 mm (6, 8, 10, 12, 14, 15, et 16 pouces)⁽²⁶⁾.

Figure 25 - Déversoir à insertion - Caractéristiques physiques



4.7.3. Gamme de mesures

Les déversoirs à insertion sont utilisables pour une plage de débit variant de 174 128 litres (46 000 gallons américains) par jour à 2 309 094 litres (610 000 gallons américains) par jour. Le Tableau 32 - Déversoir à insertion - Capacité de mesure présente la capacité de mesure des différents déversoirs⁽²⁶⁾.

4.7.4. Utilisations

Le déversoir à insertion est utilisé pour obtenir une mesure instantanée du débit. Il est conçu pour être installé à la sortie du conduit, la lecture du débit se faisant du côté amont.

Ce type de déversoir ne doit, en aucun temps, être utilisé pour des mesures en continu, pour les raisons suivantes :

- Il restreint la capacité nominale du conduit dans lequel il est installé de façon importante. Sa capacité supérieure de mesure est limitée à 35 % de la capacité nominale du conduit⁽²⁷⁾.
- Comme la pelle est de petite dimension, il devient impossible de contrôler la vitesse d'approche. De plus, il est facile provoquer un écoulement noyé sans que ce fait puisse être constaté.
- Les solides, comme le papier, s'accrochent facilement à ce type de déversoir et causent de l'obstruction. Il en résulte des erreurs de mesure.
- Les variations de débit causent beaucoup de turbulence et réduisent la précision.

Il importe que l'écoulement ait atteint un régime permanent avant de procéder à la lecture du débit, afin de minimiser l'erreur de lecture. La période d'attente minimale est de 15 minutes, et il peut même être nécessaire d'attendre jusqu'à une heure avant d'effectuer la lecture.

L'utilisation de ce type de déversoir doit être restreinte à des situations où la vitesse d'approche de l'eau est inférieure à 0,5 m/s (1,5 pi/s), car plus la vitesse est grande, moins la mesure est précise.

Tableau 32 - Déversoir à insertion - Capacité de mesure

Dimension du déversoir	Débit maximal	
	l/j	gal _{US} /j
152 mm (6 po)	174 128	46 000
203 mm (8 po)	469 390	124 000
254 mm (10 po)	885 784	234 000
305 mm (12 po)	1 366 530	361 000
356 mm (14 po)	1 366 530	361 000
381 mm (15 po)	2 309 094	610 000
406 mm (16 po)	2 309 094	610 000

4.7.5. Équation de débit en écoulement libre

L'étalonnage des déversoirs à insertion est fait en laboratoire par le fabricant. Les conditions d'installation dans un regard d'égout sont alors simulées⁽²⁶⁾. Aucune formule de débit n'est fournie avec ce type de déversoir.

4.7.6. Écoulement noyé

Ce déversoir est conçu pour fonctionner en écoulement libre. En écoulement noyé, il ne donnera qu'une valeur approximative du débit. Son utilisation sous de telles conditions est donc déconseillée.

4.7.7. Précision

En laboratoire, l'erreur est de l'ordre de ± 2 à 3 %. Sur le terrain, ce déversoir peut donner, dans les meilleures conditions d'installation, des mesures avec une erreur de l'ordre de ± 10 à 15 %. Un bon contrôle de la vitesse d'approche et la stabilité de l'écoulement sont très importants.

5. Autres méthodes de mesure

Les méthodes de mesure traitées dans les prochaines sections ne nécessitent aucune installation d'élément primaire et permettent généralement d'obtenir des mesures instantanées de débit.

Ces méthodes sont utilisées lorsque l'installation d'éléments primaires n'est pas réalisable pour des raisons physiques ou économiques. Ces méthodes, lorsqu'elles sont réalisées avec rigueur, permettent d'obtenir des valeurs de débit avec une erreur inférieure à 10 %.

5.1. Utilisation d'éléments traceurs

Deux techniques sont généralement utilisées pour la mesure du débit à l'aide d'éléments traceurs, soit⁽¹⁵⁾ :

- la technique de la détermination du temps de parcours (section 5.1.2);
- la technique de dilution (section 5.1.3).

Chacune de ces méthodes peut être utilisée pour la mesure du débit en conduits fermés et en conduits ouverts. Seule l'utilisation en conduits ouverts sera traitée dans cette section.

5.1.1. Généralités

De façon générale, tout ce qui peut être soluble dans l'eau, détectable et mesurable à différentes concentrations peut être utilisé comme traceur.

5.1.1.1 Types de traceurs

Les traceurs généralement utilisés sont de trois catégories :

Les traceurs chimiques :

Les sels généralement utilisés sont : le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de potassium (KCl), le Chlorure de lithium (LiCl), le sulfate de manganèse (MnSO₄) et quelques autres⁽²⁷⁾.

Les colorants :

Les composés généralement utilisés sont la fluorescéine, le permanganate de potassium, le bleu de méthylène, la rhodamine WT ⁽²⁷⁾.

Les traceurs radioactifs :

Les isotopes généralement utilisés sont les suivants : le sodium 24, le brome 82, l'iode 132 ⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾.

5.1.1.2 Caractéristiques des traceurs

Les principales caractéristiques des traceurs sont :

- leur solubilité dans l'eau;
- leur particularité d'être facilement détectables à diverses concentrations.

5.1.1.3 Choix d'un traceur

Le choix d'un traceur doit tenir compte de plusieurs facteurs, tels que :

- la facilité d'utilisation et de préparation (solide/liquide);
- l'influence des interférences chimiques;
- la sensibilité à la décomposition chimique;
- la sensibilité à la décomposition photochimique;
- l'absence ou une faible concentration du traceur dans l'écoulement;
- la stabilité du traceur;
- l'absorption du traceur;
- la solubilité dans l'eau;
- l'influence du traceur sur l'environnement et la santé humaine;
- l'analyse simple et précise;
- la limite de détection du traceur dans l'eau;
- la disponibilité du traceur;
- les quantités comparatives requises pour le travail;
- les coûts à l'achat.

5.1.1.4 Préparation des traceurs

Règle générale, avant de retirer une quantité quelconque d'un traceur de son contenant, il convient de bien brasser le contenant afin d'éliminer tout dépôt et d'obtenir une solution homogène.

La méthode de préparation d'une solution concentrée de chlorure de lithium décrite à la section 5.1.1.4.1 du présent chapitre s'applique pour la préparation de tout traceur chimique.

La méthode de préparation d'une solution concentrée de rhodamine WT décrite à la section 5.1.1.4.2 du présent chapitre s'applique pour la préparation de tout traceur colorant.

5.1.1.4.1 Préparation d'une solution concentrée de chlorure de lithium

L'équation suivante est utilisée pour préparer une solution de chlorure de lithium ayant une concentration donnée de traceur :

$$P_s = C_t V \times \frac{PM_s}{PM_t} \quad (41)$$

où :

- Ps est le poids du sel à peser en mg;
- Ct est la concentration du traceur en mg/l;
- V est le volume de solution requis en litres;
- PMs est le poids moléculaire du sel en grammes;
- PMt est le poids moléculaire du traceur en grammes.

Ainsi, pour préparer 10 litres d'une solution de 10 000 mg/l de lithium et sachant que :

- la densité de l'eau est de 1,0 g/cm³
- la densité du LiCl est de 2,068 g/cm³
- le poids moléculaire du LiCl est de 42,392 g
- le poids moléculaire du Li est de 6,939 g

Pour déterminer la quantité de LiCl nécessaire pour préparer la solution, les valeurs connues sont placées dans l'équation précitée, qui devient alors :

$$P_s = \frac{10\,000\text{ mg}}{4} \times 10\text{ l} \times \frac{42,392\text{ g}}{6,939\text{ g}} = 610,9\text{ g} \quad (42)$$

5.1.1.4.2 Préparation d'une solution concentrée de rhodamine WT

La rhodamine WT est disponible en solution aqueuse avec une concentration de 20 %. Comme ce colorant est assez visqueux et adhère aux parois, il est préférable de le diluer avec une bonne quantité d'eau distillée ou déminéralisée pour obtenir l'injection d'une quantité précise. À partir de la solution originale, il est possible de préparer une quantité déterminée de traceur à une concentration établie, en utilisant l'équation suivante⁽²⁹⁾ :

$$C_n = C_i S_g \left[\frac{V_d}{V_f} \right] \quad (43)$$

où :

- C_n est la nouvelle concentration désirée;
- C_i est la concentration initiale du traceur;
- S_g est le poids spécifique du traceur à la concentration initiale;
- V_f est le volume final de la nouvelle solution (V_d + V_w);
- V_d est le volume de traceur à la concentration initiale ajouté;
- V_w est le volume d'eau purifiée ajouté.

Pour préparer 10 litres d'une solution de 50 000 ppb. de rhodamine WT à partir d'une solution à 20 %, en sachant que le poids spécifique de la rhodamine WT 20 % est de 1,19, il suffit de placer dans la formule précitée les valeurs connues et de solutionner l'équation comme suit :

$$C_n = C_i S_g \left(\frac{V_d}{V_f} \right) \quad (44)$$

$$50\,000 \text{ ppb.} = 200\,000 \text{ ppm.} (1,19) \left(\frac{a}{10 \text{ l}} \right) \quad (45)$$

$$a = \left(\frac{50\,000 \text{ ppb.}}{200\,000 \text{ ppm.} * 1\,000} \right) (10 \text{ l}) \left(\frac{1}{1,19} \right) \quad (46)$$

$$a = \left(\frac{1}{400} \right) \left(\frac{1 \text{ l}}{1,19} \right) \quad (47)$$

$$a = \frac{1 \text{ l}}{476} \quad a = \frac{1000 \text{ ml}}{476} \quad a = 2,1 \text{ ml} \quad (48)$$

Lorsque l'appareil est étalonné par le fabricant ou que l'utilisateur possède les étalons nécessaires, il est possible de déterminer la concentration de la solution mère. Cette solution est diluée à un niveau qui permet la lecture au fluorimètre et la concentration initiale (C_i) est calculée en utilisant l'équation précédente. Pour plus de rigueur, la densité de cette solution mère devrait être vérifiée avec un hydromètre afin de limiter l'erreur de mesure de la concentration originale.

L'emploi des équipements de laboratoire (pipette, ballon volumétrique, fluorimètre) nécessite une formation préalable, et il est nécessaire de consulter le laboratoire avant d'entreprendre des travaux. La viscosité élevée de la rhodamine WT complique l'utilisation des pipettes.

5.1.2. Méthode de la détermination du temps de parcours

C'est vers 1927 que la méthode de mesure du débit par la détermination du temps de parcours d'un traceur fut développée⁽³⁰⁾.

5.1.2.1 Généralités

L'utilisation de cette méthode requiert une très grande précision de la mesure de l'aire d'écoulement de la distance et du temps de parcours, entre le point d'injection et le point de contrôle.

5.1.2.1.1 Principe de la méthode

La méthode consiste à injecter rapidement dans le courant d'eau un volume important de traceur et à déterminer la vitesse moyenne de déplacement de ce traceur. Suivant ce principe, le débit peut être établi selon la formule suivante⁽³⁰⁾ :

$$Q = \frac{V}{t_c} \quad (49)$$

où :

- Q le débit du courant d'eau, en mètres cubes ou en pieds cubes par une unité de temps;
- V le volume du conduit ou de la section d'écoulement (AL), en mètres cubes ou en pieds cubes;
- A la coupe transversale de la section de mesure en mètres ou en pieds carrés;
- L la distance en mètres ou en pieds entre les détecteurs;
- t_c le temps écoulé entre l'injection et le passage du point central du nuage au point de contrôle.

5.1.2.1.2 Applications générales

Cette méthode est utilisée aux fins suivantes :

- la mesure du débit en conduits ouverts et en conduits fermés, dont la coupe transversale d'écoulement est uniforme;
- l'étalonnage de pompes, de turbines, de conduits ouverts ou fermés et d'éléments primaires de mesure⁽³¹⁾.

5.1.2.1.3 Avantages de la méthode

- La perte d'une partie du traceur n'affecte pas les résultats;
- les résultats sont indépendants de la capacité de conservation à long terme du traceur;
- ne requiert aucun instrument sophistiqué pour l'injection en conduits ouverts;
- permet de mesurer des débits alors que d'autres méthodes ne le permettent pas;
- permet de mesurer des débits dans des parties de réseau où les regards d'accès ont de faibles diamètres;
- permet de mesurer de grands débits;
- ne nécessite aucune mesure précise en laboratoire de la concentration du traceur;
- requiert une petite quantité de traceur.

5.1.2.1.4 Désavantages de la méthode

- ne donne qu'une valeur ponctuelle du débit;
- exige que le courant d'eau ait un débit uniforme ⁽³⁰⁾;
- requiert un calcul précis du temps, entre le point d'injection et le point de contrôle ⁽³⁰⁾;
- nécessite quelques essais de mise au point avant de procéder aux essais réels ⁽³¹⁾;
- requiert une mesure précise de l'aire de la section d'écoulement ⁽³⁰⁾;
- la procédure requiert un personnel entraîné et doit être effectuée avec minutie;
- nécessite que la section transversale d'écoulement soit uniforme et que la section du conduit soit droite ⁽³¹⁾.

5.1.2.1.5 Équipement d'injection

La nature de l'équipement d'injection varie en fonction du système d'écoulement en place, alors que le traceur utilisé n'affecte pas ou très peu ce choix.

Les principaux équipements requis sont :

- des vannes de réglage,
- une pompe d'injection,
- un appareil de déflexion pour créer de la turbulence dans l'écoulement,
- un réservoir de mélange pour la solution,
- des joints d'étanchéité,
- du tuyau et des raccords.

5.1.2.1.6 Équipement de détection et de mesure

La nature de l'équipement de détection et de mesure varie en fonction du système d'écoulement en place et en fonction du traceur utilisé.

5.1.2.1.7 Procédure d'injection

La solution traçante est injectée rapidement dans le courant d'eau. La durée d'injection peut varier selon la situation, mais dure généralement moins d'une seconde. Le système d'injection est composé d'une chambre cylindrique qui contient la solution et d'un piston pneumatique, qui force l'évacuation soudaine du traceur hors de la chambre.

À quelques pieds en amont du point d'injection, il est nécessaire d'installer dans l'écoulement un mécanisme capable de provoquer de la turbulence, afin de favoriser un mélange rapide et complet de la solution injectée.

5.1.2.1.8 Personnel

L'exécution de la procédure nécessite un personnel qui possède la formation et l'expérience pertinentes dans le domaine. Il est difficile d'exécuter le travail avec moins de trois personnes.

5.1.2.1.9 Mesure de l'aire d'écoulement

L'aire d'écoulement est établie de la façon suivante ⁽³¹⁾ :

- La dimension interne du conduit est mesurée à l'aide d'un diamètreur à lecture aux trois dix millièmes de mètre (millième de pied). Le diamètre est mesuré sur au moins trois angles proportionnels, afin de s'assurer que le conduit est parfaitement circulaire. Le nombre de lectures varie selon l'importance de l'écart entre les lectures obtenues et la dimension nominale du conduit.
- La hauteur d'écoulement dans le conduit est mesurée à partir de la base du conduit. La largeur de la surface d'écoulement est mesurée et le point central correspond au centre de conduit, à moins que ce dernier ne soit pas circulaire.

5.1.2.1.10 Calcul du débit

Le débit correspond au produit de la vitesse moyenne mesurée et de l'aire de la section d'écoulement. L'unité de mesure est le mètre cube par seconde ou le pied cube par seconde.

5.1.2.1.11 Tronçon de mesure

Dans le choix du tronçon de mesure, il faut rechercher les conditions suivantes :

- un tronçon droit de réseau;
- aucune obstruction et aucun dépôt important sur tout le tronçon de mesure ⁽³¹⁾;
- aucun apport ou aucune perte de liquide entre les points d'injection et de prélèvement ⁽¹⁾;
- des accès disponibles pour effectuer avec précision, toutes les mesures nécessaires;
- un écoulement stable et constant.

5.1.2.1.11.1 Le point d'injection

Dans le choix du point d'injection, il faut vérifier les conditions suivantes :

- l'accessibilité pour le personnel et l'équipement;
- la présence ou la provocation d'un écoulement turbulent qui permettra le mélange du traceur;
- un endroit qui n'interfère pas avec la circulation routière.

5.1.2.1.11.2 Le point de prélèvement

Dans le choix du point de prélèvement, il faut rechercher les conditions suivantes :

- l'accessibilité pour le personnel et l'équipement;
- l'écoulement doit être stable, constant et laminaire afin de faciliter la mesure précise de l'aire d'écoulement;
- un endroit qui n'interfère pas avec la circulation routière.

5.1.2.2 Utilisation d'un traceur chimique

L'utilisation d'un traceur chimique est l'une des trois types de traceurs servant à réaliser la mesure du débit à l'aide de cette méthode de la détermination du temps de parcours.

5.1.2.2.1 Principe d'utilisation

La méthode utilisant un traceur chimique (saumure) repose sur le fait que la présence d'un sel augmente la conductivité électrique de l'eau⁽²⁾. Une quantité suffisante de sel doit être ajoutée afin de permettre une augmentation suffisante de la conductivité⁽²⁷⁾⁽³¹⁾. Ce changement de conductivité est détecté et permet de mesurer l'intervalle de temps requis pour le passage entre deux points d'observation d'un volume donné de liquide.

5.1.2.2.2 Applications des traceurs chimiques

Les traceurs chimiques peuvent être utilisés dans presque toutes les circonstances. Leur utilisation se prête particulièrement bien à la mesure des eaux contenant beaucoup de matières organiques. Ils sont facilement solubles et stables.

Il importe cependant de vérifier l'impact environnemental de l'utilisation du traceur sur le milieu récepteur.

5.1.2.2.3 Préparation des traceurs chimiques

Une solution saline (NaCl) dont la densité se situe entre 1,01 et 1,04 est généralement préparée. L'utilisation d'un autre traceur commande une concentration comparable. Généralement quelques essais sont nécessaires pour déterminer la concentration requise pour obtenir le meilleur enregistrement.

La quantité préparée doit permettre de faire cinq essais en plus des essais de mise au point. Il faut tenir compte du débit estimé de l'écoulement, afin de déterminer la quantité exacte requise.

5.1.2.2.4 Avantages des traceurs chimiques

- Le traceur est stable;
- le traceur est soluble;
- le traceur n'est pas affecté par un changement de pH de l'eau;
- le traceur est détectable, même s'il y a présence de beaucoup de matières en suspension;
- le traceur demeure stable, même s'il y a présence d'agents oxydants comme le chlore.

5.1.2.2.5 Désavantages des traceurs chimiques

Les coûts d'achat des traceurs chimiques sont parfois élevés.

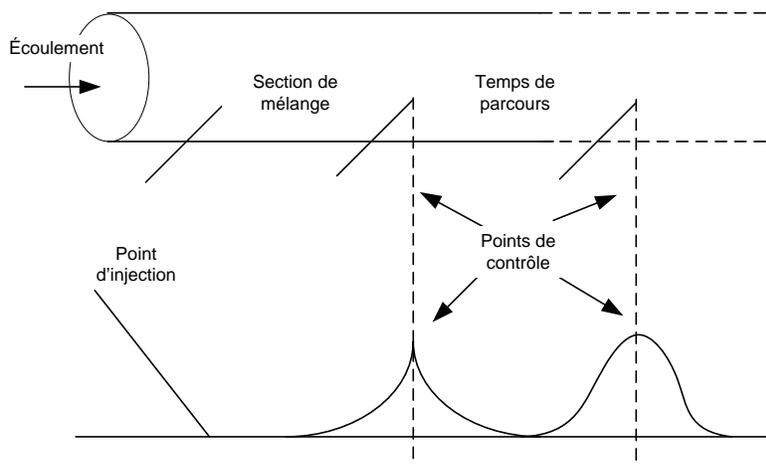
5.1.2.2.6 Équipement de détection et de mesure

Les principaux équipements requis sont :

- des électrodes de détection;
- un galvanomètre;
- un chronomètre;
- un enregistreur.

5.1.2.2.7 Position des électrodes

Une paire d'électrodes est placée à deux endroits dans la section d'écoulement, à une distance suffisante pour permettre une mesure précise de l'intervalle de temps entre le passage de la saumure à chacun des points. La position de la première électrode doit être à une distance équivalente à au moins quatre fois le diamètre du conduit en aval du point d'injection⁽³¹⁾. La distance de la seconde électrode varie selon les conditions des lieux. Cependant, la distance entre les électrodes doit être telle que le traceur ne doit plus être détecté au premier point de contrôle, et qu'il commence à être détecté au second point.



5.1.2.2.8 Procédure de détection et de mesure

Les électrodes sont reliées à un enregistreur. Lorsque le passage du traceur à chacun des points est détecté, l'appareil trace sur le graphique une courbe caractéristique de la conductivité électrique du courant d'eau. Le différentiel de temps entre le point central des deux courbes graphiques est mesuré en secondes⁽²⁾.

La vitesse moyenne est calculée à partir d'un minimum de cinq essais.

L'écart entre la plus basse et la plus haute vitesse mesurée lors des cinq essais doit être inférieur à 5 %. Un écart supérieur exige une révision complète de la procédure et une reprise des essais.

5.1.2.2.9 Essais préliminaires

Avant de procéder aux essais d'étalonnage, il est essentiel d'effectuer quelques essais préparatoires afin de déterminer les points suivants :

- la conductivité naturelle du liquide, qui servira de valeur de base des mesures (point zéro);
- la concentration de la saumure nécessaire pour obtenir une différence adéquate de conductivité;
- l'emplacement approprié des électrodes de détection.

5.1.2.2.10 Précision

Cette méthode de mesure, exécutée par un personnel compétent, permet d'obtenir une valeur de débit dont l'écart, avec la valeur réelle, n'excède pas ± 1 %.

5.1.2.2.11 Causes d'erreur

Les principales causes d'erreur sont :

<u>la rapidité d'injection</u>	si le temps d'injection est trop long, le passage de la saumure aux points d'observation, risque d'être difficile à détecter en raison de l'effet de dilution dans l'écoulement;
<u>la mesure du volume de la section d'écoulement</u>	la mesure se doit d'être très précise, et un soin particulier doit être pris pour situer la section d'écoulement. De plus, comme la distance entre les points d'observation est très courte, la mesure du débit doit être faite de façon très précise;
<u>le temps de parcours</u>	Pour réduire l'erreur au minimum, il est préférable de chronométrer l'enregistrement des courbes et de calculer l'intervalle de temps entre chaque maximum avec un chronomètre indépendant de l'enregistreur.

5.1.2.3 Utilisation d'un colorant comme traceur

L'utilisation d'un colorant traceur est de plus en plus répandue pour effectuer la mesure du débit à l'aide de la méthode de la détermination du temps de parcours.

5.1.2.3.1 Principe d'utilisation

Cette méthode repose sur une observation visuelle du changement de couleur de l'écoulement. Il faut donc évaluer le temps nécessaire à un nuage coloré pour franchir la distance entre le point d'injection et le point de contrôle.

5.1.2.3.2 Applications des colorants traceurs

L'emploi de colorants peut paraître limité en raison des interférences souvent présentes lors de l'analyse des échantillons. Il faut évaluer chaque cas particulier au moyen d'essais préliminaires avant d'en privilégier l'utilisation.

Les colorants se prêtent bien à la mesure du débit dans des eaux qui ne contiennent que très peu de matières en suspension, très peu de matières organiques, aucun oxydant et dont le pH est relativement neutre. Toutefois, l'expérience démontre qu'il est possible d'utiliser de tels traceurs, même si le pH de l'eau est acide ou alcalin, en neutralisant l'échantillon avant l'analyse. La présence de matière organique ou de matières en suspension peut également être contrée par la centrifugation de l'échantillon avant l'analyse.

Il importe également de vérifier la toxicité de ces colorants avant toute application, afin de s'assurer qu'il n'y a aucune contre-indication liée à l'utilisation potentielle de l'eau.

5.1.2.3.3 Préparation des colorants traceurs

Il est nécessaire de préparer le colorant en diluant le produit concentré avec de l'eau distillée. La concentration de la solution utilisée dépend de l'estimation du débit de l'écoulement. Il faut prévoir une concentration finale, après mélange avec l'écoulement, facilement visible à l'oeil, soit de l'ordre de 25 à 50 µg/l (ppb) ⁽³²⁾.

La quantité de traceur requise pour effectuer le travail peut être déterminée à partir de l'équation suivante :

$$V_s = \frac{KC_p QL}{10^5 v} \quad (50)$$

où :

- C_p est la concentration maximale désirée au point de contrôle, en $\mu\text{g/l}$ (ppb);
- K est une constante (133,84 pour des unités du système métrique et 3,79 pour des unités du système anglais);
- L est la longueur du tronçon de mesure, en mètres ou en pieds;
- Q est le débit évalué de l'écoulement à mesurer, en mètres cubes/seconde ou en pieds cubes/seconde;
- V_s est le volume de traceur (rhodamine WT 20 %) requis, en millilitres;
- v est la vitesse moyenne de l'écoulement, en mètres/seconde ou en pieds/seconde.

Généralement quelques essais sont nécessaires pour déterminer la concentration requise permettant d'obtenir le meilleur résultat.

La quantité de traceur doit être suffisante pour effectuer cinq essais en plus des essais de mise au point. Il faut tenir compte du débit estimé de l'écoulement, afin de déterminer la quantité exacte requise.

5.1.2.3.4 Avantages des colorants traceurs

- les colorants traceurs sont très solubles dans l'eau;
- le coût d'achat est faible;
- la visibilité du traceur aide parfois à réaliser le travail;
- la préparation des traceurs est rapide et facile;
- la détection et la mesure requièrent peu d'équipement.

5.1.2.3.5 Désavantages des colorants traceurs

Une certaine expérience et un bon jugement sont nécessaires pour évaluer le centre du nuage. L'utilisation d'un fluorimètre peut réduire de beaucoup cette incertitude et augmenter la précision.

De plus, les facteurs suivants sont à considérer.

- Il est difficile de déterminer si le nuage observé est le nuage moyen ou simplement le nuage de surface ⁽¹⁾.
- L'utilisation du traceur est impossible lorsqu'il y a présence de certains agents oxydants comme le chlore.
- Le traceur peut être détruit en présence de pH extrêmes.
- La présence de solide ou de matière organique peut causer de l'interférence.
- L'utilisation d'équipement de verre est essentielle.

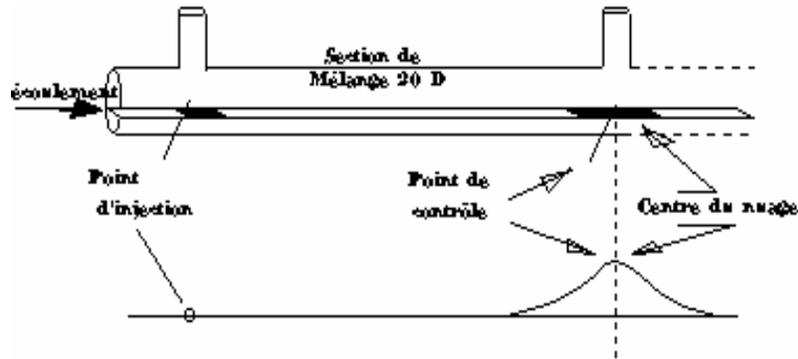
5.1.2.3.6 Équipement de détection et de mesure

Les instruments requis sont :

- un chronomètre;
- un échantillonneur;
- un colorimètre ou un fluorimètre.

5.1.2.3.7 Position du point de contrôle

Le point de contrôle doit être situé à une distance suffisante du point d'injection pour permettre le mélange du traceur. De plus, la distance doit être suffisante pour permettre une mesure précise de l'intervalle de temps entre le moment de l'injection et le passage du colorant au point de contrôle.



La distance requise entre le point d'injection et le point de contrôle varie en fonction des conditions d'écoulement et de la rapidité initiale de mélange. Plus l'écoulement est turbulent au point d'injection, plus la distance sera faible. Néanmoins, la distance minimale requise entre le point d'injection et le point de contrôle est de vingt diamètres de conduit.

5.1.2.3.8 Procédure de détection et de mesure

Le procédé de détection peut être limitée à une simple détection visuelle du colorant au point de contrôle, sans aucune mesure de la concentration dans le temps. Ce mode de détection n'est cependant pas suffisant pour garantir une mesure précise, car la délimitation du centre réel du nuage de colorant demeure subjective. Par ailleurs, le nuage apparaissant en surface n'est pas nécessairement représentatif du nuage moyen.

La méthode de détection recommandée consiste donc à mesurer, à l'aide d'un colorimètre ou d'un fluorimètre, la concentration du colorant au point de contrôle et de tracer la courbe des concentrations en fonction du temps pour déterminer le centre du nuage. Cette méthode requiert la prise d'échantillons à un intervalle de temps très rapproché (moins de trente secondes).

Le point central de la courbe coïncide avec le passage du nuage au point de contrôle. Le temps entre le moment de l'injection et le point central de la courbe est mesuré en secondes⁽²⁾.

La vitesse retenue correspond à la vitesse moyenne calculée à partir des résultats obtenus pour chacun des essais.

L'écart des valeurs entre la plus basse et la plus haute vitesse mesurée lors des cinq essais doit être inférieure à 5 %. Un écart supérieur exige une révision complète de l'opération et une reprise des essais.

5.1.2.3.9 Essais préliminaires

Avant de procéder aux essais d'étalonnage, il est essentiel d'effectuer quelques essais préparatoires afin de déterminer les points suivants :

- la couleur naturelle de l'effluent et la concentration nécessaire de colorant pour obtenir une coloration adéquate;
- l'emplacement exact du point de contrôle;
- les interférences de l'effluent à mesurer.

5.1.2.3.10 Précision

Si elle est exécutée par un personnel entraîné, cette méthode de mesure permet d'obtenir une mesure de débit avec un écart n'excédant pas ± 1 % par rapport à la valeur réelle.

5.1.2.3.11 Causes d'erreur

Les principales causes d'erreur sont :

la rapidité d'injection

si le temps d'injection est trop long, la courbe de la concentration en fonction du temps au point de contrôle risque d'être trop étendue, rendant difficile la détermination du point central du nuage;

la mesure du volume de la section d'écoulement

la mesure se doit d'être très précise, et un soin particulier doit être pris pour situer avec précision la section d'écoulement. De plus, comme la distance entre les points d'injection et d'observation est très courte, la mesure du débit doit être faite de façon très précise;

le temps de parcours

pour réduire l'erreur au minimum, il est nécessaire de chronométrer l'intervalle de temps entre l'injection et le point de contrôle, et de tracer la courbe des concentrations en fonction du temps, jusqu'à ce que la concentration naturelle réapparaisse.

5.1.2.4 Utilisation d'un traceur radioactif

L'utilisation d'un traceur radioactif est une méthode dispendieuse dont l'usage est très peu répandu.

5.1.2.4.1 Principe d'utilisation

Cette méthode repose sur le fait que l'ajout du traceur dans l'écoulement augmente la radioactivité naturelle de l'eau. C'est ce changement de la radioactivité dans l'écoulement qui est détecté pour déterminer l'intervalle de temps requis pour son passage entre deux points d'observation.

5.1.2.4.2 Applications des traceurs radioactifs

Les traceurs radioactifs peuvent être utilisés dans presque toutes les circonstances. Leur emploi se prête particulièrement bien à la mesure des eaux contenant beaucoup de matières en suspension et de matières organiques.

Avant toute application, il importe de s'assurer que leur utilisation ne peut affecter le milieu récepteur.

5.1.2.4.3 Préparation des traceurs radioactifs

Les traceurs radioactifs ne requièrent généralement aucune préparation particulière et sont utilisés tels quels. La quantité de traceur utilisée est fonction du débit estimé de l'écoulement. Généralement quelques essais sont nécessaires pour déterminer la quantité requise pour obtenir le meilleur résultat. La quantité doit être suffisante pour permettre de faire cinq essais en plus des essais de mise au point.

5.1.2.4.4 Avantages des traceurs radioactifs

- La concentration nécessaire pour la détection du traceur est très faible, étant donné que la radioactivité naturelle des effluents est négligeable⁽²⁸⁾.
- La détection et la mesure sur le chantier à l'aide d'instruments portatifs sont possibles.

5.1.2.4.5 Désavantages des traceurs radioactifs

- Le traceur doit être conservé dans un contenant de plomb jusqu'à son utilisation⁽²⁸⁾.
- Des mesures particulières doivent être prises pour assurer la santé et la sécurité des travailleurs.
- La perception populaire au sujet des produits radioactifs est négative.
- Le coût pour l'achat des isotopes et des équipements de détection et de mesure est élevé.
- Ce traceur sert généralement à mesurer des écoulements de grand volume.
- Il peut présenter des risques pour les personnes, la faune et la flore.

5.1.2.4.6 Équipement de détection et de mesure

Les principaux équipements requis sont :

- un chronomètre;
- une sonde à scintillation;
- un échantillonneur;
- des contenants de 20 litres.

5.1.2.4.7 Position du point de contrôle

Le point de contrôle doit être situé à une distance suffisante du point d'injection pour permettre le mélange du traceur. De plus, la distance doit être suffisante pour permettre une mesure précise de l'intervalle de temps entre le moment de l'injection et le passage du traceur au point de contrôle.

La distance requise entre le point d'injection et le point de contrôle varie en fonction des conditions d'écoulement et de la rapidité initiale de mélange. Plus l'écoulement est turbulent au point d'injection, plus la distance sera faible. Néanmoins, la distance minimale requise est de vingt diamètres de conduit.

5.1.2.4.8 Procédé de détection et de mesure

Le procédé de détection des traceurs radioactifs consiste à mesurer leur activité au moyen de sondes à scintillation. Le degré d'activité est enregistré sur papier graphique pour tracer une courbe en fonction du temps.

Pour ce faire, il est possible d'immerger la sonde dans l'écoulement. La sonde doit être entourée, de tous les côtés, d'une quantité suffisante de liquide, variant entre 0,5 et 1 mètre, selon le type d'isotope utilisé.

On peut également prélever des échantillons qui seront placés dans des contenants de 20 litres et qui serviront à la mesure ultérieure des échantillons. Cette méthode requiert la prise d'un volume important d'échantillons à un intervalle de temps très rapproché (moins de trente secondes).

Le point central de la courbe coïncide avec le passage du nuage du traceur radioactif au point de contrôle. Le temps entre le moment de l'injection et le point central de la courbe est mesuré en secondes ⁽²⁾.

La vitesse retenue correspond à la vitesse moyenne calculée à partir des résultats obtenus pour chacun des essais.

L'écart des valeurs entre la plus basse et la plus haute vitesse mesurée lors des cinq essais doit être inférieure à 5 %. Un écart supérieur exige une révision complète de l'opération et une reprise des essais.

5.1.2.4.9 Essais préliminaires

Avant de procéder aux essais d'étalonnage, il est essentiel d'effectuer quelques essais préparatoires afin de déterminer les points suivants :

- la radiation naturelle du liquide qui servira de valeur de base des mesures (points zéro);
- la quantité nécessaire de substances radioactives pour obtenir une lecture adéquate de l'activité au point de contrôle;
- l'emplacement approprié du point de contrôle.

5.1.2.4.10 Précision

Si elle est exécutée par un personnel compétent, cette méthode de mesure permet d'obtenir une valeur de débit dont l'écart, avec la valeur réelle, n'excède pas ± 1 %.

5.1.2.4.11 Causes d'erreur

Les principales causes d'erreur sont :

<u>la rapidité d'injection</u>	si le temps d'injection est trop long, la courbe de la concentration en fonction du temps au point de contrôle risque d'être trop étendue, rendant difficile la détermination du point central du nuage;
<u>la mesure du volume de la section d'écoulement</u>	la mesure doit être très précise, et soin particulier doit être pris pour bien situer la section d'écoulement. De plus, comme la distance entre les points d'injection et d'observation est très courte, la mesure du débit doit être faite de façon très précise;
<u>le temps de parcours</u>	le temps de parcours est évalué avec un chronomètre. L'intervalle de temps entre l'injection et le tracé complet de la courbe des concentrations est réalisé, et la position du point central de la courbe permet d'obtenir le temps de parcours.

5.1.3. Méthode de mesure par dilution

La mesure du débit par la méthode de mesure par dilution peut être exécutée avec tout type de traceurs. Dans le présent document, l'accent est mis sur le chlorure de lithium et la rhodamine WT, puisque ces deux traceurs sont souvent utilisés.

5.1.3.1 Généralités

La méthode de dilution permet de déterminer le débit sans avoir à mesurer les dimensions de la section d'écoulement.

La méthode par dilution est effectuée à l'aide d'une mesure de couleur, de conductivité, de fluorescence, de concentration chimique ou de radioactivité.

5.1.3.1.1 Principe de la méthode

La méthode consiste à mesurer le degré de dilution d'une quantité connue de traceur, injectée dans l'écoulement, après que ce dernier se soit complètement mélangé^{(28) (30)}.

Suivant ce principe, le débit peut être établi à partir de l'équation suivante⁽³³⁾ :

$$Q_1 C_1 = Q_2 C_2 \quad (51)$$

où :

- Q₁ est le débit d'injection du traceur;
- C₁ est la concentration du traceur injecté;
- Q₂ est le débit recherché de l'écoulement;
- C₂ est la concentration du traceur mélangé à l'écoulement.

Le principe semble simple, mais la réalisation pratique demande une bonne compréhension du processus de dispersion.

5.1.3.1.2 Applications générales

Cette méthode peut être utilisée pour la mesure du débit en conduit fermé comme en conduit ouvert.

En conduit ouvert, cette méthode est utilisée lorsque :

- l'écoulement est très rapide et turbulent⁽³⁰⁾;
- le tronçon de mesure est très irrégulier;
- le tronçon de mesure contient des débris et des dépôts⁽³⁰⁾;
- l'aire du tronçon et les vitesses d'écoulement sont variables⁽³⁰⁾;
- l'accès au tronçon de mesure présente des risques d'accident⁽³⁰⁾;
- l'accès à certaines parties du tronçon de mesure n'est possible qu'à partir de regards de faibles diamètres.

5.1.3.1.3 Avantages de la méthode

- Permet de mesurer des débits alors que d'autres méthodes ne le permettent pas;
- permet de mesurer de grands débits;
- permet d'atteindre une grande précision; la méthode peut donc servir à contre-vérifier sur le site, des installations de mesure ou de transport des liquides ⁽²⁸⁾;
- ne nécessite aucune connaissance des dimensions de l'aire d'écoulement et de la vitesse d'écoulement ⁽²⁸⁾;
- permet de mesurer le débit en conduit fermé et en conduit ouvert.

5.1.3.1.4 Désavantages de la méthode

- Le coût des traceurs est élevé;
- la méthode fournit généralement que des valeurs ponctuelles de débit;
- la procédure requiert un personnel entraîné;
- la procédure exige beaucoup de temps ⁽²⁹⁾;
- plusieurs paramètres pouvant causer des interférences doivent être considérés dans le choix du traceur et mesurés en cours d'utilisation;
- la valeur du débit n'est pas toujours disponible sur-le-champ.

5.1.3.1.5 Équipement d'injection

La nature de l'équipement nécessaire à la réalisation de la méthode par dilution varie en fonction du système d'écoulement en place et de la méthode de mesure utilisée. Le traceur utilisé n'affecte pas ou très peu le choix de l'équipement d'injection.

Les principaux équipements requis sont :

- un appareil d'injection;
- un appareil de déflexion pour créer de la turbulence dans l'écoulement, au point d'injection;
- un réservoir de mélange pour la solution;
- un traceur;

- un chronomètre;
- des contenants gradués (cylindres, ballons, pipettes, éprouvettes), nécessaires à la préparation de la solution mère, à la calibration de l'appareil d'injection, au stockage de la solution mère, au prélèvement et au stockage des échantillons;
- du tuyau et des raccords.

5.1.3.1.6 Personnel

La réalisation de la méthode requiert un personnel technique qui possède la formation et l'expérience pertinentes. Il est difficile d'exécuter le travail avec moins de trois personnes.

5.1.3.1.7 Types de traceurs

L'information au sujet des traceurs est traitée à la section 5.1.1.1.

5.1.3.1.8 Indice de récupération (I_r)

Que l'on procède par injection instantanée ou par injection à débit constant, il est fondamental dans tous les cas où les traceurs chimiques et colorants sont employés, de faire des essais qui serviront à déterminer l'indice de récupération (I_r). Cet indice de récupération est essentiel pour démontrer l'exactitude de la méthode et il permet d'établir le facteur de correction applicable lors du calcul du débit⁽³⁴⁾.

5.1.3.1.8.1 Procédé pour déterminer l'indice de récupération

Le procédé utilisé pour déterminer l'indice de récupération comprend deux étapes : le calcul théorique de la concentration après mélange et les essais en laboratoire.

5.1.3.1.8.1.1 Calcul théorique

Partant du principe que la concentration initiale du traceur est connue, il est possible de calculer théoriquement quelle sera la concentration, après mélange, d'une quantité connue de ce traceur avec un volume fixe d'eau.

Exemple : Un traceur dont la concentration d'injection est de 4 000 ppb est utilisé pour faire les essais. En prenant 1 ml de traceur et en le plaçant dans 999 ml d'eau de mélange, la concentration théorique du traceur après mélange est de 4 ppb.

5.1.3.1.8.1.2 Essais en laboratoire

Les essais de récupération en laboratoire consistent à comparer la quantité de traceur récupérée et la valeur théorique établie, lorsque ce dernier est mélangé avec :

- . une solution qui ne risque point d'interférer avec lui, généralement de l'eau distillée ou de l'eau déminéralisée;
- . l'eau provenant de l'écoulement à mesurer, généralement prélevée en amont du point d'injection.

Pour ce faire, les opérations suivantes sont effectuées.

Trois ballons jaugés, de 1 000 ml sont utilisés. Un (1) ml de traceur est placé dans chacun des ballons jaugés. Le premier ballon est rempli jusqu'à la marque avec de l'eau distillée ou de l'eau déminéralisée, et les deux autres ballons jaugés sont remplis avec de l'eau provenant de l'écoulement. Chacun des ballons est par la suite agité afin d'obtenir un mélange uniforme. Un échantillon est prélevé de chacun des ballons et la concentration du traceur après mélange est mesurée dans chaque cas. Les concentrations obtenues sont comparées avec la concentration théorique établie précédemment.

La concentration du traceur, après mélange avec l'eau distillée, doit être égale à la concentration théorique. Tout écart par rapport à la valeur théorique est réputé être le résultat d'une erreur de manipulation. Si l'écart est trop important ($\pm 1\%$) l'ensemble des essais doit être repris.

La concentration du traceur, après mélange avec l'eau provenant de l'écoulement, est comparée avec la concentration de la solution préparée avec le mélange d'eau distillée. La valeur obtenue pour chacune des deux solutions doit être identique. Tout écart entre les deux valeurs est défini comme indice de récupération.

Exemple : La valeur théorique établie précédemment est de 4 ppb. La valeur obtenue avec l'eau distillée est également de 4 ppb. La valeur obtenue avec l'eau de l'écoulement est de 3,8 ppb. L'indice de récupération est donc de 0,95, soit 3,8 ppb/4 ppb.

5.1.3.1.9 Conditions de mélange

Pour garantir le succès de la mesure, il est essentiel que l'échantillonnage soit fait à un point suffisamment en aval du point d'injection et qu'un bon mélange du traceur avec l'écoulement ait lieu.

Les conditions suivantes favorisent un bon mélange :

- un écoulement turbulent au point d'injection;
- une longueur de tronçon suffisante;
- une profondeur d'eau au point d'injection comparable à la profondeur moyenne du tronçon.

Pour déterminer si le mélange est complet, il est possible d'utiliser la formule suivante suggérée par Rimmar⁽²⁷⁾:

$$\left(\frac{\hat{C} - \bar{C}}{\bar{C}} \right) 100 < 1 \% \quad (52)$$

où :

\hat{C} est la concentration maximale à un point de la section de contrôle, en mg/l ou $\mu\text{g/l}$;

\bar{C} est la concentration moyenne de tous les points de la section de contrôle, en mg/l ou $\mu\text{g/l}$.

Dans les canalisations, cette méthode de calcul n'est cependant pas très indiquée pour vérifier l'efficacité du mélange. Les tronçons de mesure n'étant pas d'une largeur comparable à celle des rivières et les parois du tronçon d'écoulement étant généralement assez uniformes, la prise d'échantillons au point de contrôle se fait souvent en un seul point, au lieu des trois points répartis sur la transversale. L'utilisation de l'équation présentée à la section 5.1.3.1.10 pour déterminer une longueur du tronçon de mesure adéquate est donc recommandée.

5.1.3.1.10 Tronçon de mesure

Le tronçon de mesure doit contenir peu d'endroit d'eau morte (comme des regards d'égout) qui augmente le temps de rétention et favorise l'apparition de faibles concentrations du traceur et qui deviennent plus difficiles à mesurer précisément. Un mélange transversal rapide est indiqué pour réduire le temps de mesure et la longueur du tronçon. La profondeur de l'eau joue un rôle important dans le processus de mélange⁽³⁰⁾.

Dans le choix du tronçon de mesure, il faut rechercher les conditions suivantes :

- un écoulement turbulent qui permettra un bon mélange du traceur;
- une longueur de tronçon suffisante pour assurer un bon mélange.

De plus, il faut tenir compte des facteurs suivants :

- les apports de liquide entre les points d'injection et de prélèvement qui augmente la distance requise pour obtenir un bon mélange⁽³⁾⁽³⁰⁾;
- les pertes de liquide entre les points d'injection et de prélèvement qui peuvent fausser les résultats.

Pour déterminer la longueur de tronçon nécessaire à un mélange adéquat, il convient d'utiliser la formule suivante⁽³⁰⁾ :

$$L_m = k \left(\frac{v B^2}{E_z} \right) \quad (53)$$

où :

- L_m est la longueur de mélange en mètres ou en pieds;
- k est une constante (0,46 avec le système métrique et 0,14 avec le système anglais);
- v est la vitesse moyenne de l'écoulement en mètres ou en pieds par seconde;
- B est la largeur moyenne de l'écoulement en mètres ou en pieds;
- E_z est 1,13 (d³/2 S^{1/2}); ou encore 0,2 (d * u);
- g est la constante gravitationnelle (9,8 m/s² ou 32,17 pi/s²);
- d est la profondeur moyenne de l'écoulement en mètres ou en pieds;
- s est la pente de la surface de l'écoulement en mètres par mètre ou en pieds par pied;
- u est égale à (g dS)^{1/2}

La longueur ainsi déterminée se mesure à partir du dernier point d'apport d'eau à l'écoulement, en amont du point d'échantillonnage.

En rivière, l'utilisation de l'équation précédente devrait donner un résultat dont la valeur correspond à environ 30 à 40 fois la largeur moyenne du tronçon de mesure.

Pour un écoulement canalisé artificiellement, il est indiqué d'utiliser une longueur minimale équivalente à 20 fois le diamètre du conduit, puisque pour des conduits de faibles dimensions ($< 0,6$ m ou 2π), l'équation donne des valeurs inférieures.

5.1.3.1.10.1 Point d'injection

- Le point d'injection doit avoir été choisi au préalable afin de s'assurer de son accessibilité.
- Il doit être situé en écoulement turbulent. Cet écoulement peut être provoqué lorsque nécessaire.
- L'accès au point d'injection doit être sécuritaire.
- Il doit être situé à un endroit qui ne nuit pas à la circulation routière.
- Il doit être suffisamment grand pour permettre l'installation de l'équipement d'injection.

5.1.3.1.10.2 Point de prélèvement

- Un point de prélèvement doit avoir été choisi au préalable, selon les critères d'accessibilité et de sécurité.
- La présence ou l'absence de turbulence n'a pas d'importance.
- Il doit être situé à un endroit qui ne nuit pas à la circulation routière et être suffisamment grand pour permettre l'installation de l'équipement d'échantillonnage.

5.1.3.1.11 Méthode de réalisation

La mesure du débit par la méthode de dilution peut être réalisée en utilisant l'injection instantanée ou l'injection en continu du traceur.

5.1.3.2 Injection instantanée

Cette méthode est parfois appelée la méthode du recouvrement total.

5.1.3.2.1 Principe de la méthode

Le débit est calculé selon le taux de dilution du traceur avec l'écoulement, à partir d'une évaluation complète de sa masse en aval du point d'injection.

Ce principe peut se traduire par l'équation suivante, qui exprime le débit en fonction de la masse du traceur ⁽³⁰⁾:

$$Q = \frac{M}{A_c} \quad (54)$$

où :

Q est le volume de l'écoulement mesuré;

M est la masse de traceur injecté;

A_c est l'aire située sous la courbe de réponse obtenue après un mélange adéquat du traceur avec l'écoulement ⁽³⁰⁾.

Cette méthode de mesure exige que la quantité totale de traceur injecté ainsi que la concentration du traceur dans l'écoulement à mesurer, durant toute la période où il est mesurable, soient connues de façon précise.

L'équation de débit prend donc la forme suivante ⁽³⁵⁾ :

$$(C_1 - C_0)V = Q_s \int_0^t (C_2 - C_0) dt \quad (55)$$

où :

Q_s est le débit de l'écoulement;

C₀ est la concentration naturelle du traceur dans l'écoulement, avant injection;

C₁ est la concentration du traceur injecté;

C₂ est la concentration du traceur après mélange;

V est le volume d'injection du traceur;

dt est le temps de passage (t₃ - t₂);

t₃ est le temps de fin de passage du traceur au point de contrôle, en minutes;

t₂ est le temps de début de passage du traceur au point de contrôle, en minutes.

Lorsque la concentration naturelle (C₀) du traceur dans l'écoulement est négligeable, l'équation peut être simplifiée comme suit :

$$Q_s = V \frac{C_1}{\int_0^t C_2 dt} \quad (56)$$

5.1.3.2 Utilisations

La méthode de mesure à injection instantanée est utilisée lorsque :

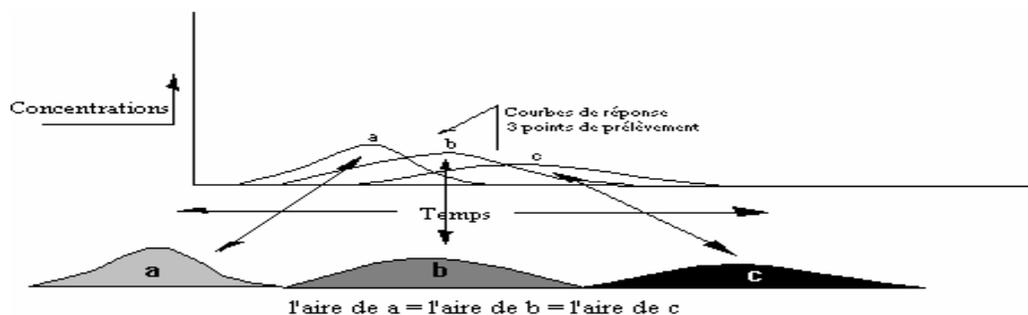
- des traceurs radioactifs sont employés. Avec ce type de traceurs, c'est presque la seule méthode applicable ⁽³⁰⁾;
- le tronçon de mesure est assez court. Des tronçons longs peuvent effectivement permettre une perte de traceur et provoquer des mesures inadéquates ⁽³⁰⁾;
- l'équipement d'injection disponible est limité ⁽³⁰⁾.

5.1.3.2.3 Réalisation

La méthode à injection instantanée, consiste à ajouter dans l'écoulement à mesurer, aussi rapidement que possible, une quantité connue de traceur et à mesurer en aval, à intervalles de temps réguliers, la concentration de ce dernier afin de tracer des courbes de réponse dilution-débit. Comme le tronçon de mesure est généralement assez court, le temps de passage du traceur dépasse rarement une heure ⁽³⁰⁾.

Le succès de l'application de cette formule repose sur le fait que la masse de traceur injectée est totalement récupérée au point de contrôle. Le calcul de la récupération consiste à multiplier l'aire de la courbe de réponse (A_c) {concentration par le temps ($C_2(dt)$ }, par le débit (Q_s). Il est donc très important que l'aire de la courbe de réponse (A_c) soit représentative de la dilution du traceur injecté ⁽³¹⁾.

La courbe de réponse doit être mesurée assez loin en aval du point d'injection pour permettre un mélange adéquat. Lorsque ce mélange est réalisé, la surface sous la courbe de concentration en fonction du temps, pour des échantillons prélevés à différents points sur la largeur de l'écoulement, est la même, peu importe la forme de la courbe ⁽³⁰⁾.



Pour tracer cette courbe, un minimum de 30 échantillons est requis ⁽³⁵⁾.

Lors de l'utilisation de cette méthode de mesure, il convient de suivre les étapes suivantes de réalisation.

Choix du tronçon de mesure

Estimer les caractéristiques du tronçon de mesure :

- largeur moyenne (B);
- la profondeur moyenne (d);
- la vitesse d'écoulement (v);
- le débit (Q);
- la pente du tronçon de mesure (s).

Établir la longueur du tronçon de mesure requise.

La longueur requise est calculée à l'aide de l'équation 53 de la section 5.1.3.1.10.

Choix du traceur

Examiner la présence dans l'écoulement de différents paramètres susceptibles d'interférer avec les traceurs, comme le pH, la couleur, la présence de matière en suspension, la présence de minéraux, etc., et déterminer l'indice de récupération du traceur selon la méthode présentée à la section 5.1.3.1.8 du présent document.

Sélectionner le traceur qui convient le mieux en fonction des informations recueillies et des critères établis à la section 5.1.1.3.

Préparation du traceur :

Le traceur est préparé selon la méthode décrite à la section 5.1.1.4.

Pour déterminer la quantité de traceur nécessaire pour effectuer le travail, il faut connaître :

- la concentration du traceur à l'injection (C1);
- la concentration attendue du traceur après mélange avec l'écoulement (C2);
- le débit estimé de l'effluent à mesurer (Q);
- le temps estimé de passage du traceur au point de contrôle (tF - t1).

La concentration attendue du traceur après mélange avec l'écoulement (C2) doit être au moins 20 fois la concentration naturelle de l'écoulement et se situer entre 0 et 20 µg/l dans le cas de la rhodamine WT, et entre 0 et 3 mg/l dans le cas du chlorure de lithium (LiCl) ^{(3) (30) (33)}.

Ces quatre paramètres connus, il est possible d'évaluer la quantité de traceur requise à l'aide de l'équation suivante :

$$V = \frac{C_2}{C_1} Q (t_F - t_1) 1000 \quad (57)$$

où :

V est la quantité de traceur requise, en millilitres;

C1 est la concentration du traceur à l'injection en mg/l;

C2 est la concentration du traceur après mélange avec l'écoulement, en mg/l;

Q est le débit estimé en litres par minute;

tF est le temps de fin de passage du traceur, en minutes;

t1 est le temps de début de passage du traceur, en minutes.

Travaux de terrain :

Injection du traceur :

- injecter de façon instantanée, dans le tronçon de mesure, au centre de l'écoulement, la quantité totale de traceur préparé. L'injection se fait généralement à l'aide d'un contenant à très grande ouverture qui permet la vidange rapide de toute la solution;
- s'assurer lors de l'injection du traceur, qu'aucune quantité n'est perdue par éclaboussement ou autrement, en déposant le traceur dans l'écoulement, à une distance minimale de la surface (2 à 3 po), surtout lorsque l'opération se fait dans des endroits assez restreints, comme des regards d'égout;
- commencer le chronométrage et aviser les personnes au point de prélèvement que le traceur est injecté;
- mesurer et enregistrer la hauteur d'eau dans le tronçon de mesure afin de s'assurer de la constance du débit.

Prise d'échantillons :

Deux types d'échantillons sont prélevés, soit des échantillons de contrôle et des échantillons de mesure.

Les échantillons de contrôle servent à :

- vérifier et quantifier la présence naturelle du traceur dans l'écoulement,
- vérifier la constance ou les variations de concentration naturelle du traceur dans l'écoulement;
- vérifier la concentration du traceur injecté.

Échantillons de contrôle :

- un échantillon (de préférence deux) d'eau dans le tronçon de mesure, afin de déterminer la concentration naturelle du traceur dans l'eau. Ces prélèvements sont faits avant même de commencer à manipuler le traceur, toutes les trois minutes au cours de la procédure de mesure et à la fin de l'injection, afin de s'assurer qu'il n'y a pas eu de variation de la concentration naturelle ⁽²⁷⁾;

- l'échantillon doit être prélevé à un endroit représentatif de la qualité de l'écoulement, sans risque de contamination par le traceur ⁽²⁷⁾;
- un échantillon (de préférence deux) d'environ 50 ml de la solution d'injection doit être prélevé, afin de vérifier sa concentration et de préparer des étalons, si nécessaire ⁽³⁰⁾.

Échantillons de mesure :

- les échantillons sont prélevés au point de contrôle après l'injection du traceur;
- ils servent à déterminer la concentration du traceur après mélange et à établir la valeur de débit dans le tronçon de mesure.

L'échantillonnage doit couvrir la durée totale du temps de passage du traceur. Il doit commencer avant que ce dernier n'arrive au point de contrôle et se poursuivre tant qu'il y a présence de traceur.

Une grande quantité d'échantillons est nécessaire pour s'assurer que le traceur est complètement passé.

Dans le cas de canaux larges, les échantillons doivent être prélevés en trois points, soit aux 1/6, 3/6 et 5/6 de la largeur du canal lorsque :

- le canal a plus de 8 pieds de largeur et possède des parois uniformes et homogènes (exemple : conduit en béton);
- le canal a plus de 6 pieds de largeur et a des parois uniformes mais non homogènes (exemple : fossé).

L'échantillonnage doit se poursuivre après l'estimation du temps de passage du traceur. Il doit se prolonger pour au moins trois à quatre fois le temps requis pour que la concentration maximale du traceur se produise au point de contrôle. Par exemple, si la concentration maximale est supposée arriver au point de contrôle 10 minutes après l'injection, l'échantillonnage doit se poursuivre après ces dix minutes pour une période minimale de 20 minutes (de préférence 40 minutes).

Les échantillons doivent être prélevés à un intervalle de temps très court, soit de une minute au maximum, et le temps exact de prélèvement doit être noté pour chacun.

Chaque échantillon doit être identifié et préparé immédiatement pour l'expédition au laboratoire. Les échantillons sont gardés hors des rayons directs du soleil, surtout lorsqu'il s'agit de traceurs photosensibles, comme les colorants⁽³⁰⁾.

Deux personnes sont requises pour l'échantillonnage; une pour échantillonner, l'autre pour noter et enregistrer le temps exact de prélèvement⁽³⁰⁾.

Pour évaluer le temps de passage de la concentration maximale du traceur au point de contrôle, il est pratique courante d'utiliser un colorant pour faire un essai préliminaire et de mesurer le temps de parcours à partir de l'effet visuel du mélange. Il est également possible, lorsque le traceur est invisible, d'ajouter un colorant à la solution mère pour le visualiser et pour éviter de faire un essai préliminaire. Le temps de passage total est estimé durer quatre fois plus long que le temps requis pour l'arrivée de la concentration maximale⁽³⁰⁾.

Analyse des résultats

De façon générale la concentration des échantillons est déterminée en laboratoire. Lorsque le traceur utilisé est un colorant, il peut être pratique de faire l'analyse sur le site, mais cette procédure n'est pas obligatoire. Dans un tel cas, les échantillons doivent tout de même être conservés pour référence ultérieure.

5.1.3.2.4 Avantages de l'injection instantanée

- L'injection du traceur ne nécessite aucun instrument sophistiqué.
- L'injection du traceur nécessite peu de personnel et peu de temps.
- La quantité de traceur requise pour réaliser la méthode à injection instantanée est moindre que celle requise pour la méthode d'injection en continu. Pour la mesure de faibles débits, la quantité de traceur requise est de 3 à 5 fois moins grande que celle nécessaire avec la méthode à injection continue. Pour la mesure de débits élevés, la différence est minime.

5.1.3.2.5 Désavantages de l'injection instantanée

- La totalité de la séquence doit être échantillonnée ⁽²⁷⁾.
- Nécessite le prélèvement de nombreux échantillons.
- Son utilisation est limitée à la mesure de tronçon où le débit est stable.

5.1.3.2.6 Interprétation des résultats

Si les échantillons ont été prélevés en trois points, une courbe de concentration en fonction du temps est tracée pour chaque point de prélèvement et l'aire de chaque courbe est mesurée.

Le mélange est uniforme lorsque les aires sous les courbes sont identiques. Une courbe moyenne est tracée à partir de ces trois courbes ⁽³⁰⁾.

Le débit est déterminé en utilisant l'équation de la section 5.1.3.2.1.

5.1.3.2.7 Causes d'erreur

Les principaux points à vérifier pour réduire au minimum les erreurs de manipulation sont :

- la concentration de la solution mère;
- l'injection rapide (d'un trait) du traceur;
- la quantité de traceur injectée;
- la perte de traceur par éclaboussement lors de l'injection;
- la dégradation de la solution traçante;
- la non-homogénéité de la solution de traçage avant l'injection;
- la contamination des récipients d'échantillonnage;
- la variation du débit de l'écoulement en cours de mesure.

5.1.3.2.8 Précision

Dans les conditions normales, la précision de la méthode est de $\pm 3 \%$ ⁽²⁷⁾.

5.1.3.3 Injection en continu

La méthode à injection continue est une suite ininterrompue d'injections instantanées de masses minimales d'un traceur. Elle est généralement préférée à la méthode à injection instantanée, principalement en raison de sa précision accrue.

5.1.3.3.1 Principe de la méthode

La méthode d'injection à débit constant consiste à mesurer la concentration de traceur présente au point de contrôle lorsque l'équilibre est atteint ⁽³⁰⁾.

L'équation suivante établit la relation entre les débits du traceur et de l'effluent ⁽³⁰⁾ :

$$Q_2 = Q_1 \frac{C_1}{C_2} \quad (58)$$

où :

Q₂ est le débit de l'écoulement mesuré;

Q₁ est le débit d'injection du traceur;

C₂ est la concentration du traceur après mélange avec l'écoulement à mesurer;

C₁ est la concentration du traceur au point d'injection, avant mélange avec l'écoulement à mesurer.

5.1.3.3.2 Utilisations

La méthode de mesure à injection continue est utilisée lorsque :

- la concentration naturelle du traceur dans l'écoulement à mesurer peut varier;
- le débit de l'écoulement à mesurer peut varier pendant les essais;
- la plus grande précision possible est désirée ⁽³⁰⁾.

5.1.3.3.3 Réalisation

Cette méthode consiste à injecter un traceur d'une concentration connue à un débit constant, et à en mesurer la concentration après un mélange homogène avec l'écoulement. Le débit d'injection et la concentration du traceur doivent être connus de façon précise.

Le débit d'injection doit être beaucoup plus petit que le débit de l'effluent, et la concentration optimale de mesure doit être beaucoup plus grande que la concentration naturelle du traceur dans l'effluent.

Pour tenir compte du niveau de concentration naturelle, l'équation devient ⁽²⁷⁾:

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{C_1}{C_2 - C_0} \right) \quad (59)$$

où :

Q₂ est le débit de l'écoulement à mesurer;

Q₁ est le débit d'injection du traceur;

C₁ est la concentration du traceur injecté;

C₀ est la concentration naturelle du traceur dans l'effluent;

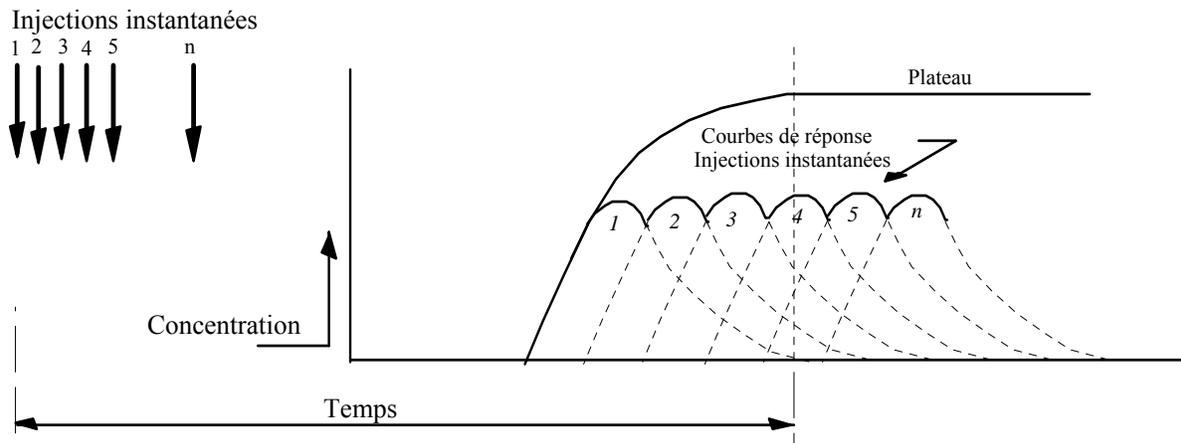
C₂ est la concentration du traceur après mélange avec l'écoulement à mesurer.

Quatre variables étant connues, il est donc possible de calculer le débit de l'écoulement à mesurer.

Contrairement à l'injection instantanée, le temps de réponse de la courbe n'a pas à être évalué, mais seulement le point où la concentration maximale est atteinte et maintenue (plateau). Lorsque cette condition d'équilibre est obtenue, le principe de la conservation de la masse s'applique et la quantité de traceur injectée (Q₁C₁) est égale à la quantité de traceur qui passe au point de contrôle (Q₂C₂) ⁽³⁰⁾.

Le temps requis pour mesurer le débit par l'une ou l'autre des méthodes est à peu près le même ⁽³⁰⁾. La méthode à injection continue a cependant l'avantage de permettre de couvrir, si nécessaire, une plus longue période de mesure, en prolongeant l'injection après que le plateau est atteint.

Le temps requis pour atteindre le point d'équilibre par l'injection continue peut être déterminé précisément par l'examen du temps de réponse de la courbe produite avec la méthode d'injection instantanée, comme il est démontré dans la figure suivante.



Le graphique précédent illustre que le début du plateau, selon la méthode continue, coïncide avec le moment où disparaîtrait le traceur, si une seule injection avait été réalisée avec la méthode instantanée. Dans la pratique, la durée d'injection continue doit être légèrement plus longue que la durée requise pour former la première courbe de réponse, selon la méthode instantanée⁽³⁰⁾.

L'exécution de cette méthode requiert les étapes suivantes :

Choix du tronçon de mesure :

Estimer les caractéristiques du tronçon de mesure :

- largeur moyenne (B);
- la profondeur moyenne (d);
- la vitesse d'écoulement (v);
- le débit (Q);
- la pente du tronçon de mesure (s).

Établir la longueur du tronçon requise à l'aide de l'équation 53 à la section 5.1.3.1.10.

Choix du traceur

Examiner la présence dans l'écoulement de différents paramètres susceptibles d'interférer avec divers traceurs, comme le pH, la couleur, la présence de matières en suspension, de minéraux, etc., et déterminer l'indice de récupération du traceur selon la méthode présentée à la section 5.1.3.1.8 du présent document.

Sélectionner le traceur qui convient le mieux en fonction des informations recueillies et des critères établis à la section 5.1.1.3.

Préparation du traceur

Le traceur est préparé selon la méthode décrite à la section 5.1.1.4.

Pour déterminer la quantité de traceur nécessaire pour effectuer le travail, il faut connaître :

- la concentration du traceur à l'injection (C_1);
- la concentration attendue du traceur après mélange avec l'écoulement (C_2);
- le débit estimé de l'effluent à mesurer (Q_2);
- le temps estimé de passage du traceur au point de contrôle ($t_3 - t_2$) en minutes;
- la durée de l'injection après l'atteinte du plateau, en minutes.

Ces cinq paramètres connus, il est possible d'évaluer la quantité de traceur requise à l'aide de l'équation suivante :

$$V = (t_f - t_i + t_p) \frac{Q_2 C_2}{C_1} \quad (60)$$

où :

V est la quantité de traceur requise en litres;

C_1 est la concentration du traceur à l'injection en mg/l;

C_2 est la concentration du traceur après mélange avec l'écoulement, en mg/l;

Q_2 est le débit estimé en litres par minute;

t_f est le temps de fin de passage du traceur, en minutes;

t_i est le temps de début de passage du traceur, en minutes;

t_p est le temps d'injection après que le plateau est atteint, en minutes.

Il est recommandé de toujours préparer une quantité de traceur légèrement supérieure (5 %) à la quantité calculée pour faire le travail, afin de parer à toutes éventualités.

Travaux de terrain

Injection du traceur :

L'injection du traceur se fait de façon continue, à un débit et à une concentration connue, à l'aide d'un appareil dont le débit peut être ajusté et contrôlé. Les principaux appareils utilisés à cette fin sont : le vase de Mariotte, le vase à niveau constant et les pompes doseuses.

L'injection du traceur doit se faire sans perte; s'assurer qu'aucune quantité de traceur n'est perdue par éclaboussement, en déposant le traceur dans l'écoulement à une distance minimale (2 à 3 pouces) de la surface de l'eau, surtout lorsque l'opération se fait dans des endroits assez restreints, comme des regards d'égout.

La tubulure d'injection ne doit pas toucher à la surface de l'eau, afin d'éviter que le traceur ne soit entraîné par le courant d'eau et que le débit d'injection soit ainsi faussé.

L'appareil d'injection doit être étalonné avant et après l'utilisation pour vérifier si le débit est demeuré constant.

Aucune bulle d'air ne doit être présente dans le système d'injection, afin de maintenir une présence continue de solution traçante dans la tubulure.

La solution traçante doit être placée dans un contenant gradué; le niveau de la solution est noté aux temps 0,2, 0,4, 0,6 et 0,8 de la durée totale d'injection. Cette observation permet de contre-vérifier la constance du débit d'injection.

Prise d'échantillons :

Les échantillons à prélever sont de deux natures : les échantillons de contrôle et les échantillons de mesure.

Les échantillons de contrôle servent à :

- vérifier et quantifier la présence naturelle du traceur dans l'écoulement;
- vérifier les variations de concentration du traceur présent naturellement dans l'écoulement;
- vérifier la concentration de la solution d'injection;
- établir le taux de récupération du traceur.

Échantillons de contrôle :

- Un échantillon (de préférence deux) de l'eau du tronçon de mesure est prélevé afin de déterminer la concentration naturelle du traceur dans l'eau et les variations, s'il y a lieu. Ces prélèvements se font avant même de commencer à manipuler le traceur, toutes les trois minutes au cours de la procédure et à la fin de l'injection ⁽²⁷⁾.

L'échantillon doit être prélevé à un endroit représentatif de la qualité de l'écoulement, sans risque de contamination avec le traceur ⁽³⁰⁾.

- Un échantillon (de préférence deux) de la solution d'injection doit être prélevé au début et à la fin de la procédure, afin de vérifier sa concentration.

Échantillons de mesure :

Les échantillons de mesure sont ceux prélevés dans l'écoulement à mesurer, en aval du point d'injection du traceur. Ils permettent de déterminer la concentration du traceur au point de contrôle.

Le nombre d'échantillons doit être suffisant pour tracer un minimum de points sur la courbe de réponse, soit trois points sur la courbe ascendante et neuf points sur le plateau.

L'échantillonnage doit commencer avant que le traceur arrive au point de contrôle, et se poursuivre après que le plateau est atteint.

Dans le cas de canaux larges, les échantillons doivent être prélevés en trois points, soit aux 1/6, 3/6 et 5/6 de la largeur du canal lorsque :

- le canal a plus de 8 pieds de largeur et possède des parois uniformes et homogènes (exemple : conduit en béton);
- le canal a plus de 6 pieds de largeur et a des parois uniformes mais non homogènes (exemple : fossé).

Les échantillons doivent être prélevés à un intervalle de temps court, cinq minutes au maximum, et à toutes les minutes lorsque le plateau est atteint.

Le temps exact de prélèvement doit être noté pour chacun des échantillons.

Chaque échantillon doit être identifié et préparé immédiatement pour l'expédition au laboratoire. Les échantillons sont gardés hors des rayons directs du soleil, surtout s'il s'agit de traceurs photosensibles ⁽³⁰⁾.

Deux personnes sont nécessaires pour l'échantillonnage; une pour échantillonner, et l'autre pour noter et enregistrer le temps exact de prélèvement⁽³⁰⁾.

Il est pratique courante d'utiliser un colorant pour faire un essai préliminaire et de mesurer le temps de parcours basé sur l'effet visuel de mélange. Lorsqu'un traceur chimique est utilisé, l'ajout d'un colorant (si un tel ajout ne cause pas d'interférence) permet d'éviter de faire l'essai préliminaire.

Analyse des résultats :

En général, la concentration du traceur est déterminée en laboratoire. Lorsqu'il s'agit d'un colorant, il est pratique de faire l'analyse sur le site; cependant, les échantillons doivent tout de même être conservés pour référence ultérieure.

5.1.3.3.4 Avantages de l'injection continue

La quantité d'échantillons à prélever et à analyser est moindre que pour la méthode à injection instantanée.

Cette méthode permet d'effectuer des mesures dans des tronçons où le débit n'est pas constant, à condition que le temps d'injection soit prolongé et que l'intervalle de temps entre la prise des échantillons soit réduit à une minute.

La méthode permet d'obtenir une précision supérieure à celle obtenue par la méthode à injection instantanée.

5.1.3.3.5 Désavantages de l'injection continue

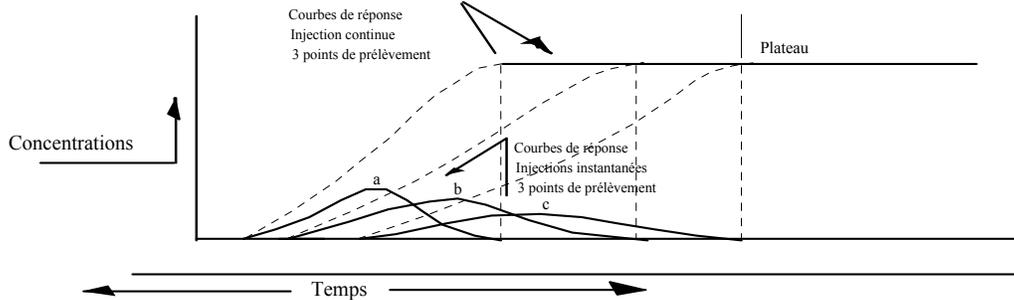
L'injection du traceur nécessite une attention continue.

L'injection du traceur requiert un instrument d'injection dont le débit peut être réglé et contrôlé de façon précise.

Pour la mesure de faibles débits, la quantité de traceur requise est de 3 à 5 fois plus grande que celle nécessaire avec la méthode à injection instantanée. Pour la mesure de débits élevés, la différence est minime.

5.1.3.3.6 Interprétation des résultats

Lorsque les échantillons ont été prélevés en trois points, une courbe de concentration en fonction du temps est tracée pour chaque point de prélèvement.



Une aire identique pour les trois courbes indique que le mélange est uniforme et que la durée d'injection est suffisante.

La période d'injection du traceur doit être suffisante pour permettre la superposition des trois courbes, et seulement les concentrations situées sur le plateau doivent servir au calcul du débit.

L'équilibre (plateau) entre les trois points est rarement atteint au même moment, puisque les vitesses transversales d'écoulement sont différentes entre chaque point.

Le débit est déterminé en utilisant l'équation suivante :

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{C_1}{C_2 - C_0} \right) \quad (61)$$

où :

Q_1 est le débit d'injection du traceur en ml/min;

C_0 est la concentration naturelle du traceur dans l'effluent en $\mu\text{g/l}$;

C_1 est la concentration d'injection du traceur en mg/l;

C_2 est la concentration du traceur au point de contrôle en $\mu\text{g/l}$;

Q_2 est le débit de l'écoulement à mesurer en l/min.

Lorsque les essais de récupération (I_r) démontrent qu'il y a un écart entre la valeur analytique mesurée et la valeur théorique, en raison d'interférences entre le traceur et l'effluent, il est nécessaire, pour obtenir le débit réel, d'inclure dans la formule précédente l'indice de récupération (I_r), qui tient compte de ce phénomène. La formule prend alors la forme suivante :

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{C_1}{C_2 - C_0} \right) I_r \quad (62)$$

5.1.3.3.7 Causes d'erreur

Les principales causes d'erreur et les points à vérifier pour réduire les erreurs au minimum sont :

Causes d'erreur	Corrections
Solution traçante non homogène	Mélange constant au cours de l'injection
Erreur sur la concentration de la solution mère	Comparer la valeur théorique avec la valeur analytique
Mélange inadéquat de la solution traçante avec l'effluent	Changer le ou les points de prélèvement, créer de la turbulence au point d'injection du traceur
Dégradation de la solution traçante en cours d'injection	Garder la solution hors des rayons directs du soleil tout au long de l'opération
Dégradation de la solution traçante au contact avec l'écoulement	Faire des essais de récupération avant et pendant les mesures
Instabilité du débit d'injection	Étalonner l'appareil d'injection au début et à la fin de l'opération; vérifier la présence de bulles d'air dans le système d'injection; placer la solution traçante dans un contenant gradué et prendre note du volume injecté à différents moments en cours d'injection; éviter que la tubulure de l'injection soit en contact avec la surface de l'eau
Perte de solution traçante au point d'injection	Placer la tubulure d'injection près de la surface de l'eau pour éviter les éclabousses
Problèmes analytiques	En cas de contamination des contenants d'échantillonnage, vérifier la méthode analytique et le taux de récupération
Écart important dans les concentrations situées sur le plateau de la courbe	Vérifier la permanence du régime d'écoulement en enregistrant en continu la hauteur d'eau dans le tronçon de mesure

5.1.3.3.8 Précision

Dans les conditions normales, la variation de mesure de la méthode par injection continue est de l'ordre de 1 % pour une précision de l'ordre de 99 % ⁽²⁷⁾.

5.2. Méthode volumétrique

Dans le cas de faibles débits, la méthode volumétrique apparaît souvent comme la méthode la plus simple pour faire une mesure ponctuelle.

5.2.1. Principe de la méthode

Cette méthode, de type « capacité jaugée », consiste à remplir un contenant dont le volume est connu précisément et à chronométrer le temps requis pour le remplissage. L'équation suivante traduit la relation entre le débit, le volume et le temps :

$$Q = V/t \quad (63)$$

où :

- Q est le débit par unité de temps;
- V est le volume;
- t est l'unité de temps.

5.2.2. Applications

La méthode volumétrique est généralement utilisée pour :

- des mesures ponctuelles de débit;
- la mesure d'écoulement dont le débit est stable;
- l'étalonnage de divers éléments primaires de mesure.

L'utilisation d'un auget basculeur permet d'adapter cette méthode pour obtenir des mesures de débit en continu. Cette possibilité est cependant limitée à des débits inférieurs à 150m³/h.

5.2.3. Avantages

Les principaux avantages de la méthode volumétrique sont :

- la rapidité d'exécution;
- la grande précision des résultats;
- les coûts minimes de réalisation.

5.2.4. Désavantages

Les principaux désavantages de cette méthode sont :

- généralement limitée à la mesure de faibles débits (< 100 litres/minute);
- ne permet généralement que des valeurs ponctuelles;
- pour la mesure de larges débits, nécessite la présence d'un réservoir de forme régulière, dont la capacité à différents niveaux peut être mesurée avec une précision de 99 %.

5.2.5. Équipement requis

Pour la mesure des faibles débits (< 100 litres/minute) :

- un contenant gradué (± 20 litres);
- un chronomètre.

Pour la mesure de grands débits (> 100 litres/minute) :

- un réservoir de dimensions appropriées;
- un ruban à mesurer;
- un indicateur de niveau;
- un chronomètre.

5.2.6. Personnel

Deux personnes suffisent généralement pour réaliser la mesure.

5.2.7. Réalisation

Pour la mesure des faibles débits, il existe deux techniques :

- la première technique consiste à remplir un contenant dont la capacité est connue précisément, tout en calculant à l'aide d'un chronomètre, le temps requis pour le remplissage;
- la seconde consiste à calculer le temps requis pour remplir un contenant quelconque et à évaluer, par la suite, la quantité de liquide récupérée par la pesée du liquide ou par la mesure de son volume.

Pour ce genre de mesure, il est préférable que l'écoulement provienne d'une conduite en chute libre.

Pour la mesure des grands débits, la méthode consiste à :

- étalonner précisément un réservoir de forme régulière, afin d'être en mesure de déterminer son volume, à tous les niveaux, avec une précision de 99 %;
- chronométrer le temps requis pour faire varier le niveau d'eau entre le niveau initial et le niveau final.

5.2.7.1 Nombre d'essais

La méthode nécessite de réaliser trois essais. L'écart entre chaque essai ne doit pas excéder 2 %. Lorsque cet écart est dépassé, il convient de déterminer les causes et de reprendre toute l'opération.

5.2.7.2 Durée des essais

Dans tous les cas, le calcul du temps se fait en secondes.

Pour la mesure de grands débits, la durée minimale de chaque essai doit être de cinq minutes.

Pour la mesure de faibles débits, la durée minimale de chaque essai doit correspondre aux valeurs suivantes :

Débit (litres par minute)	Durée en secondes
10	120
20	60
30	40
40	30
50	25
60	20
70	17
80	15
90	12
100	12

5.2.8. Précision

La mesure du débit par la méthode volumétrique peut donner des résultats dont la variation est de l'ordre de $\pm 1 \%$, lorsqu'elle est réalisée avec minutie.

- Le volume du contenant doit être mesuré avec précision, puisque c'est la variable qui donne généralement la plus grande erreur.
- Lorsque les dimensions ne peuvent être mesurées précisément, le volume peut être déduit par pesée. Cependant, cette méthode s'avère parfois onéreuse et même irréalisable, lorsqu'il s'agit de larges débits.

5.3. Mesure du débit à l'aide des stations de pompage

La mesure du débit à l'aide de station de pompage permet de connaître, en tout temps, la quantité d'eau transitant dans un réseau de drainage.

5.3.1. Principe de mesure

La mesure du débit à l'aide des stations de pompage relève de la connaissance du temps de fonctionnement et de la capacité de chacune des pompes de la station.

L'équation suivante s'applique :

$$V = Q_p t \quad (64)$$

où :

- V est le volume total débité par la pompe en m^3 ;
- Q_p est le débit réel de la pompe en m^3 par unité de temps;
- t est le temps mesuré.

Pour connaître le débit d'une ou plusieurs pompes d'un puits de pompage, il est possible de se référer aux courbes caractéristiques des pompes, lesquelles sont fournies par le fabricant. Cette méthode peut cependant comporter plusieurs erreurs pouvant influencer considérablement la précision de la mesure (usure du moteur de la pompe, usure de la pompe elle-même, variation de la hauteur statique, de la viscosité du liquide, etc.). Pour toutes ces raisons, il est nécessaire de procéder à l'étalonnage des pompes.

5.3.2. Applications

La mesure du débit à l'aide de stations de pompage permet :

- de connaître la quantité d'eau transitant dans les diverses sections du réseau de drainage, lorsque plusieurs stations de pompage sont installées sur le réseau;
- de connaître, en tout temps, la quantité d'eau transitant dans le réseau de drainage et de constater les variations de débit;
- d'évaluer la quantité d'eau d'infiltration dans le réseau de drainage;
- de quantifier, sur de longues périodes, le volume d'eau transitant dans le réseau.

Pour connaître le volume d'eau acheminé par une station de pompage sur de longues périodes, il suffit simplement de comptabiliser le temps de fonctionnement des pompes, en installant une minuterie dans le panneau de contrôle des pompes. La durée de fonctionnement d'une ou plusieurs pompes (à vitesse constante) étant directement proportionnelle au volume débité par celles-ci, permet de déterminer le volume total débité par une pompe.

5.3.3. Étalonnage des pompes

L'étalonnage des stations de pompage consiste à déterminer précisément, pour chacune des pompes à vitesse constante, le volume d'eau pompé pour un temps donné. Pour trouver le débit volumique réel transféré par chacune des pompes, il faut établir la variable volume (V) et mesurer la variable temps (t).

Le débit d'une pompe est donné par la relation suivante :

$$Q_p = \frac{V}{t_p} \quad (65)$$

où :

- Q_p est le débit de la pompe;
- V est le volume pompé en m^3 ;
- t_p est le temps nécessaire pour pomper le volume (V).

5.3.4. Personnel et équipements

L'étalonnage d'une station de pompage requiert au minimum deux personnes, et l'équipement nécessaire est :

- un chronomètre;
- un ruban à mesurer.

5.3.5. Renseignements à noter

Les renseignements essentiels à vérifier et à noter lors de l'étalonnage d'une station de pompage sont :

- le numéro de série des pompes et de leurs contrôles;
- les spécifications originales des pompes;
- le type de puits de pompage (humide, sec);
- la position normale des alarmes de haut niveau et de bas niveau, s'il y a lieu;
- la présence d'un trop-plein, et l'endroit où il se trouve dans le puits;
- l'existence de conduites submergées alimentant le puits;
- la présence et l'état des clapets de retenue.

5.3.6. Avantages

La mesure du débit à l'aide des stations de pompage présente les avantages suivants :

- requiert peu de personnel;
- requiert peu d'équipement;
- permet de mesurer le débit sur de très longues périodes de temps.

5.3.7. Désavantages

La mesure du débit à l'aide des stations de pompage présente les désavantages suivants :

- requiert un suivi serré des stations de pompage;
- ne comptabilise pas les débordements par les trop-pleins;
- ne peut pas être réalisée avec des pompes à débit variable;
- la précision des mesures est variable et dépend de la fréquence des étalonnages.

5.3.8. Méthode d'étalonnage

Peu importe la forme que peut avoir le puits de pompage, il est nécessaire, en tout premier lieu, de déterminer le volume précis qui sera pompé et le temps nécessaire à la pompe pour transférer le volume d'eau mesuré.

5.3.8.1 Calcul du volume de pompage

Le calcul du volume des puits les plus fréquemment rencontrés dans le domaine du traitement des eaux est réalisé à partir des considérations géométriques.

5.3.8.1.1 Puits rectangulaire

Calcul de la surface du puits (A)

Pour établir la surface du puits, il faut mesurer la section horizontale du puits en utilisant l'équation suivante :

$$A = L * l \quad (66)$$

où :

A est la surface du puits en mètres carrés (m²);

L est la longueur du puits en mètres (m);

l est la largeur du puits en mètres (m).

5.3.8.1.2 Puits circulaire

Calcul de la surface du puits (A)

Pour connaître la surface du puits, il faut mesurer la section horizontale en utilisant l'équation suivante :

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (67)$$

où :

A est la surface du puits en mètres carrés (m²);

D est le diamètre du puits en mètres (m);

π est égal à 3,1416.

Calcul de la hauteur d'eau pompée (h)

La hauteur (h) d'eau pompée résulte de la différence entre le niveau d'eau dans le puits, au moment du démarrage des pompes (h_0), et le niveau d'eau dans le puits (h_f), juste à l'arrêt des pompes. Le tout se traduit par l'équation suivante :

$$h = h_0 - h_f \quad (68)$$

Calcul du volume de pompage (V)

Pour calculer le volume de pompage, il faut combiner l'aire du puits à la hauteur d'eau pompée. Cette opération se traduit par l'équation suivante :

$$V = Ah \quad (69)$$

où :

V est le volume d'eau pompé en mètres cubes (m³) par unité de temps;
A est la surface du puits en mètres carrés (m²);
h est la hauteur d'eau pompée en mètres (m).

Note : Dans le cas des puits de petites dimensions équipés de pompes submergées, il importe de soustraire le volume occupé par les pompes et tout autre accessoire du volume total du puits de pompage.

5.3.8.2 Calcul du temps de pompage

Le temps de pompage (t_p) représente le temps de fonctionnement des pompes, soit l'intervalle entre le démarrage (t₀) et l'arrêt (t_f) des pompes, et se résume à l'équation suivante :

$$t_p = t_f - t_0 \quad (70)$$

5.3.8.2.1 Puits isolé

Lorsque le puits de pompage peut être isolé, c'est-à-dire, que le débit d'eau entrant dans le puits de pompage est éliminé, le débit de la pompe est établi de la façon suivante :

- le volume de pompage (V), comme il est décrit précédemment;
- le temps de pompage, c'est-à-dire le temps requis par la pompe (t_p), pour transférer un volume (V) déterminé, est mesuré.

Le débit réel de la pompe est déterminé en appliquant l'équation suivante :

$$Q_p = \frac{V}{t_p} \quad (71)$$

où :

Q_p est le débit réel de la pompe en m^3/sec ;

V est le volume d'eau transféré par la pompe;

t_p est le temps nécessaire pour transférer le volume V .

Note : Il est préférable d'isoler le puits de pompage lors de l'étalonnage, afin de réduire l'erreur.

5.3.8.2.2 Puits non isolé

Lorsque le puits de pompage ne peut être isolé, c'est-à-dire que le débit d'eau entrant dans le puits de pompage ne peut être éliminé, il faut :

- établir le débit d'entrée;
- déterminer le débit de la pompe.

Pour établir le débit d'entrée, il faut :

- mesurer le temps de remontée (t_r), c'est-à-dire le temps requis pour que le niveau de l'eau dans le puits remonte d'une hauteur déterminée (hr);
- déterminer le débit de remontée (Q_{in}) selon l'équation suivante :

$$Q_{in} = \frac{V}{t_r} \quad (72)$$

où :

Q_{in} est le débit entrant dans la station de pompage;

V est le volume de remontée, ($V = A*hr$);

t_r est le temps de remontée;

A est l'aire du puits;

hr est la hauteur de remontée.

Pour déterminer le débit de la pompe, il faut :

- établir le volume de pompage (V), comme il est décrit précédemment;
- déterminer le temps de pompage, c'est-à-dire le temps requis par la pompe (t_p) pour transférer un volume (V) établi.

Le débit réel de la pompe est déterminé en utilisant l'équation suivante :

$$Q_p = Q_{in} + \frac{V}{t_p} \quad (73)$$

où :

Q_p est le débit réel de la pompe en m^3 par unité de temps;

Q_{in} est le débit entrant dans la station de pompage, en m^3 par unité de temps;

V est le volume d'eau transféré par la pompe, en m^3 ;

t_p est le temps nécessaire pour transférer le volume (V).

Note : Il est préférable d'isoler le puits de pompage lors de l'étalonnage, afin de réduire l'erreur.

5.3.8.3 Conditions d'étalonnage

L'étalonnage des pompes doit s'effectuer sous les conditions suivantes :

- les conditions normales de fonctionnement des pompes sont utilisées;
- le calcul du temps et du volume de pompage se fait lorsque la pompe a atteint son régime permanent de fonctionnement, car le démarrage et l'arrêt de la pompe correspondent à un régime transitoire de débit, allant d'un débit nul à un débit maximal;
- les clapets de retenue sur la conduite de refoulement de la pompe sont étanches afin d'éviter un retour d'eau dans le puits de pompage;
- dans le cas de puits non isolés, le débit d'entrée (Q_{in}) est constant.

5.3.8.4 Nombre d'essais

Lors de l'étalonnage d'une station de pompage, chaque pompe doit faire l'objet d'un **minimum** de trois essais en fonctionnement individuel et de trois essais en fonctionnement combiné, pour chacune des combinaisons possibles, selon l'organisation des pompes.

Pour être acceptable, l'écart entre chacun des essais doit être inférieur à 5 % de la valeur moyenne des essais. Lorsque l'écart est supérieur, l'ensemble des essais doit être repris.

La moyenne des trois essais représente le débit de la pompe.

5.3.8.5 Fréquence de l'étalonnage

L'étalonnage des pompes doit se faire annuellement lorsque :

- les pompes sont mises en service;
- les pompes sont reconstruites;
- des réparations majeures, susceptibles d'affecter la capacité des pompes, sont faites.

5.3.8.6 Précision de l'étalonnage

La précision de la méthode d'étalonnage des pompes est fonction de la précision de mesure du volume de pompage et du temps de pompage.

Le paramètre dimensionnel variable est généralement la hauteur d'eau. Si on suppose une erreur systématique constante, plus la hauteur d'eau sera grande, plus l'erreur sera petite.

Exemple : En supposant que l'erreur systématique de mesure de la hauteur est de 2 cm, il ressort que pour une hauteur de 0,5 m, l'erreur sera de $\pm 4 \%$; et pour une hauteur de 4 m, l'erreur ne sera que de $\pm 0,5 \%$.

L'erreur systématique maximale, pour la variable temps, peut être difficilement réduite à moins de deux secondes pour un cycle complet (départ – arrêt) des pompes. Si on suppose une erreur systématique constante, plus le temps de pompage sera long, plus l'erreur sera faible.

Exemple : Pour un temps de pompage de 20 secondes, l'erreur sera de $\pm 10 \%$ alors que pour un temps de pompage de 3 minutes 20 secondes, l'erreur ne sera que de $\pm 1 \%$. Pour obtenir une précision d'étalonnage de l'ordre de 95 %, le temps de pompage doit être supérieur à 1 minute et la hauteur d'eau pompée, supérieure à un mètre.

5.4. Méthode de détermination aire/vitesse

La méthode de la détermination de l'aire et de la vitesse d'écoulement est peut-être la méthode la plus répandue pour la mesure du débit en rivière.

5.4.1. Généralités

Cette méthode d'évaluation des débits des cours d'eau est utilisée depuis le milieu du XIX^e siècle.

5.4.2. Principe de la méthode

Le principe de la méthode consiste à mesurer précisément l'aire transversale et la vitesse de l'écoulement. Selon ce principe, le débit peut être établi selon l'équation suivante :

$$Q = AU \quad (74)$$

où :

- Q est le débit en pieds ou mètres cubes par unité de temps;
- A est l'aire de la section transversale en pieds ou mètres carrés;
- U est la vitesse moyenne de l'écoulement en pieds ou en mètres par unité de temps.

5.4.3. Applications

- La mesure du débit des rivières et de grands canaux artificiels;
- la mesure du débit en conduit ouvert dont la coupe transversale d'écoulement est uniforme;
- la mesure du débit de grands conduits fermés ⁽⁶⁾.

5.4.4. Avantages

Les principaux avantages de la méthode de détermination de l'aire et de la vitesse sont :

- les coûts d'utilisation sont peu élevés;
- ne requiert aucun instrument sophistiqué;
- les résultats sont rapidement disponibles.

5.4.5. Désavantages

Les principaux désavantages de cette méthode sont :

- ne donne qu'une valeur ponctuelle du débit;
- exige que le courant d'eau soit à un débit uniforme tout au long de la mesure;
- requiert que la section transversale d'écoulement soit uniforme, que la section de conduit soit droite et que la pente soit uniforme;
- nécessite de faire plusieurs essais lorsque l'aire de la section est grande;
- demande que la profondeur d'eau soit suffisante pour assurer l'immersion complète des appareils;
- ne s'applique pas aux conduits de moins de 203 mm (8 pouces);
- la présence de matières en suspension collantes et de débris grossiers entrave le fonctionnement de l'appareil de mesure;
- requiert beaucoup d'attention lors des mesures afin de maintenir le pourcentage d'erreur à un niveau acceptable.

5.4.6. Équipement de mesure de la vitesse

Les équipements de mesure de la vitesse les plus couramment utilisés en eau claire, comme dans les eaux susceptibles de contenir des matières en suspension, sont :

- les moulinets hydrométriques;
- les sondes hydrostatiques.

5.4.6.1 Moulinets hydrométriques

Le principe de fonctionnement du moulinet est basé sur la proportionnalité entre la vitesse d'écoulement du liquide et la vitesse de rotation de la partie mobile du moulinet (hélice ou coupelle). Le nombre de révolutions effectuées par l'hélice est enregistré par un compte-tours durant un temps déterminé. Comme différentes hélices peuvent être adaptées sur un moulinet et que chacune d'elles possède une proportionnalité différente, il est possible de convertir le nombre de tours en vitesse. La vitesse minimale permettant d'obtenir des résultats représentatifs est de 0,15 m/s, et la vitesse maximale, de 6 m/s.

L'axe horizontal du moulinet doit être situé, sous la surface de l'eau, à une distance minimale égale à 1,5 fois la hauteur du rotor et, du fond, à une distance minimale égale à 3 fois la hauteur du rotor. La position de l'axe du rotor doit être parallèle avec le sens de l'écoulement et de niveau avec la surface.

Le bon fonctionnement du moulinet doit être vérifié avant et après l'utilisation de ce dernier. L'hélice ou la coupelle doivent être en mesure d'effectuer, à l'air libre et à l'abri du vent, des révolutions pendant quatre minutes au minimum. Si l'essai n'est pas concluant, les roulements à bille devront être vérifiés. Les appareils qui ne rencontrent pas ces exigences doivent être réparés et étalonnés par le fabricant⁽⁶⁾.

L'hélice doit être choisie en fonction des conditions de mesure. Une hélice doit toujours être utilisée avec le moulinet qui a servi à établir l'équation de conversion du nombre de tours par minute en vitesse.

5.4.6.2 Sondes hydrostatiques

Le principe de fonctionnement des sondes hydrostatiques est basé sur la proportionnalité entre la vitesse de l'écoulement du liquide et la variation du signal électrique aux électrodes de détection. La loi de Faraday sur l'induction magnétique démontre qu'un voltage s'établit dans un conducteur lorsque ce dernier traverse un champ électrique.

La sonde de détection est composée d'un électro-aimant qui produit un champ magnétique et de deux électrodes de détection situées à 180° l'une de l'autre. La variation du voltage, au niveau du détecteur au passage du liquide, est amplifiée et convertie en tension pour fournir une lecture directe de la vitesse de l'écoulement. La vitesse minimale permettant d'obtenir des résultats représentatifs est de 0,5 pi/s (0,15 m/s).

L'axe horizontal de la sonde de détection doit être situé, sous la surface de l'eau, à une distance inférieure à 1,5 fois la hauteur de la sonde et, du fond, à une distance minimale égale à 3 fois la hauteur de la sonde. L'axe de la sonde de détection doit être parallèle au sens de l'écoulement et de niveau avec la surface.

Le bon fonctionnement de la sonde de détection doit être vérifié avant l'utilisation de cette dernière. Lorsqu'elle est placée dans un contenant non métallique, la sonde de détection doit indiquer une vitesse inférieure à 30 mm/s (0,1 pi/s), si elle est immobile. Lorsque la sonde est déplacée dans le contenant, la vitesse de déplacement doit être positive. Les appareils qui ne rencontrent pas à ces exigences doivent être réparés et étalonnés par le fabricant⁽⁶⁾.

5.4.7. Mesure de la hauteur d'eau

La hauteur d'eau doit être mesurée en continu, pendant toute la durée des mesures de vitesse, à l'aide d'un appareil à enregistrement graphique. L'enregistrement graphique sera conservé pour consultation.

5.4.8. Position du point de mesure

Lors du choix du point de mesure, il est essentiel de vérifier les conditions suivantes :

- l'accessibilité pour le personnel et les équipements;
- un tronçon de mesure droit sur une distance égale à au moins 25 fois la largeur de l'écoulement;
- une conduite (ou un canal) de forme régulière et exempt de dépôts sur ses parois;
- l'emplacement de mesure est éloigné de tout coude, raccordement ou obstacle susceptible de perturber l'écoulement, sur une distance égale à au moins 25 fois la largeur de l'écoulement;
- la profondeur de l'eau suffisante pour assurer l'immersion des appareils de mesure;
- il n'y a pas de matières en suspension pouvant entraver le fonctionnement des appareils de mesure;
- les sections de tronçon, où les écoulements sont divergents, convergents ou qui présentent des courants de retour, des courants nuls et des vortex, ont été évités.

L'emplacement exact du point de mesure et une description complète de son aménagement doivent être précisées au rapport.

5.4.9. Aire d'écoulement

La mesure de l'aire d'écoulement nécessite une grande précision afin de réduire le plus possible le pourcentage d'erreur. L'aire d'écoulement est établie de la façon suivante :

- pour un conduit circulaire,
 - la dimension interne du conduit est mesurée à l'aide d'un diamètre interne à lecture au 3 dix millièmes de mètre (millième de pied). Cette dimension est mesurée sur au moins trois angles proportionnels, afin de s'assurer que le conduit est parfaitement circulaire. Le nombre de lectures exécutées varie selon l'importance de l'écart entre les lectures obtenues et la dimension nominale du conduit;
 - la hauteur d'écoulement dans le conduit est mesurée à partir du centre du conduit. Pour déterminer la position centrale du conduit, la largeur de la surface de l'écoulement est mesurée. Le point central de la surface de l'écoulement correspond au centre du conduit, à moins que le conduit ne soit pas circulaire;

- pour un autre type de conduit ou canal,
la largeur de la surface de l'écoulement est déterminée à l'aide d'un ruban à mesurer ou, dans le cas des canaux très larges, à l'aide d'un mesureur optique. La mesure de la hauteur de l'écoulement se fait en plusieurs points espacés sur l'axe horizontal de la façon suivante :
 - pour les canaux de 4 572 mm (15 pieds) et plus, à des intervalles égaux à 5 % de la largeur totale du canal;
 - pour les canaux de 2 438 à 4 572 mm (8 à 15 pieds), à des intervalles égaux à 10 % de la largeur totale du canal;
 - pour les canaux de 610 à 2 438 mm (2 à 8 pieds), à des intervalles égaux à 20 % de la largeur totale du canal;
 - pour les canaux de 610 mm (2 pieds) et moins, à des intervalles égaux à 30 % de la largeur totale du canal.

Le profil de la section mesurée est reproduit sur papier graphique et la superficie de la section est mesurée à l'aide d'un planimètre.

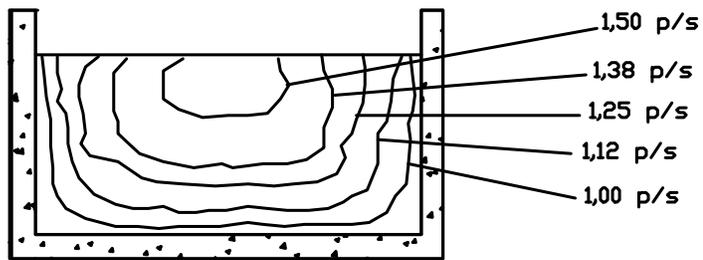
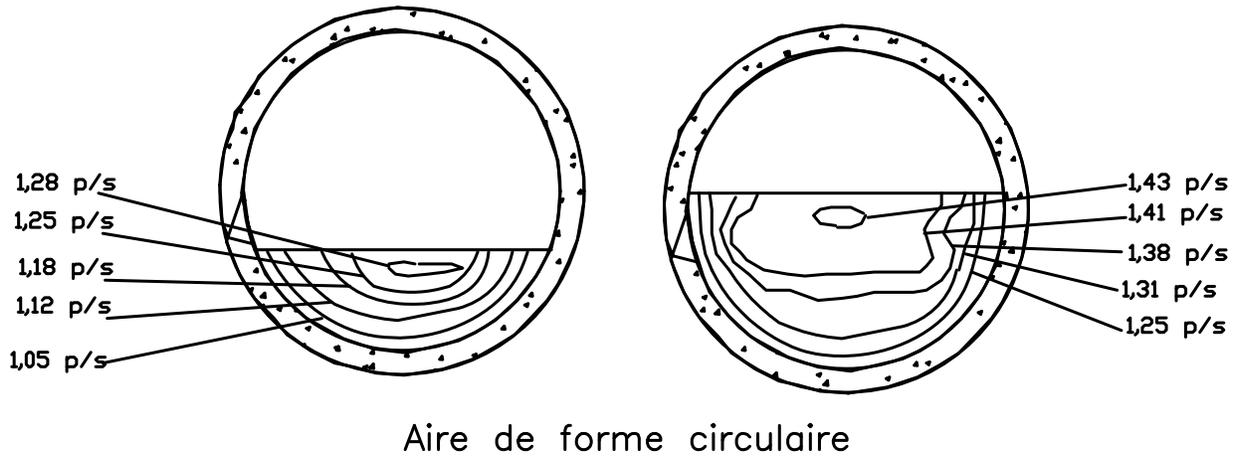
5.4.10. Mesure de la hauteur d'eau

Cette méthode exige que le courant d'eau coule à un débit constant tout au long de la période de mesure. Pour vérifier si cette condition est remplie, il est nécessaire d'installer un équipement de mesure de la hauteur d'eau à enregistrement graphique. L'écart entre la hauteur la plus faible et la plus forte doit être inférieur à 5 % par rapport à la hauteur la plus forte. Une variation supérieure commande une reprise complète des mesures ⁽⁵⁾.

5.4.11. Mesure de la vitesse

L'aire d'écoulement étant constituée d'un ensemble de courants de vitesses variables, il est nécessaire d'effectuer des mesures de vitesse à différents endroits afin d'obtenir un profil précis des vitesses (voir Figure 26 - Exemple de distributions des vitesses de courant dans une aire d'écoulement).

Figure 26 - Exemple de distributions des vitesses de courant dans une aire d'écoulement



Les mesures de vitesse doivent être effectuées en même temps que la mesure de hauteur, afin de s'assurer de la représentativité des résultats.

Chaque mesure de vitesse doit avoir une durée minimale de 60 secondes et être répétée au moins cinq fois ⁽³⁶⁾. L'écart des valeurs, entre la plus basse et la plus haute vitesse, mesurées lors des cinq essais en un même point, doit être inférieur à 5 %. Un écart supérieur nécessite une reprise complète des mesures pour le même point ⁽³⁶⁾.

Les mesures de vitesse se font le long de verticales espacées entre elles de la façon suivante :

- pour les canaux de 4 572 mm (15 pieds) et plus, 5 % de la largeur totale du canal;
- pour les canaux de 2 438 à 4 572 mm (8 à 15 pieds), 10 % de la largeur totale du canal;
- pour les canaux de 610 à 2 438 mm (2 à 8 pieds), 20 % de la largeur totale du canal;
- pour les canaux de 610 mm (2 pieds) et moins, 30 % de la largeur totale du canal.

Sur la profondeur, les points de mesure sont établis ainsi :

- pour les profondeurs inférieures à 610 mm (2 pieds), à 0,6 fois la profondeur totale mesurée à partir de la surface;
- pour les profondeurs de 610 mm (2 pieds) et plus, à 0,2 et 0,8 fois la profondeur totale mesurée à partir de la surface. C'est la moyenne des vitesses mesurées le long d'une verticale qui détermine la vitesse de cette section de l'aire d'écoulement;
- lorsque l'écart du nombre de tours entre deux verticales excède 10 %, il faut reprendre les mesures en réduisant la distance entre les verticales.

La vitesse de l'aire d'écoulement est établie en effectuant la sommation des vitesses moyennes mesurées le long des verticales, divisée par le nombre de verticales.

5.4.12. Calcul du débit

Le débit correspond à la vitesse moyenne obtenue multipliée par l'aire d'écoulement mesurée. L'unité de mesure est le mètre cube par seconde ou le pied cube par seconde.

5.4.13. Précision

La variation caractéristique évaluée en pourcentage de la vitesse moyenne pour un moulinet ne doit pas excéder 5 %. Lorsque toutes les précautions signalées précédemment sont prises, et que les mesures sont effectuées dans des conditions optimales, l'erreur de la méthode devrait être inférieure à 10 %.

5.4.14. Causes d'erreur

Les principales causes d'erreur sont :

- les manipulations de l'appareil, soit la position de la sonde par rapport au sens de l'écoulement;
- la précision de l'appareil;
- le manque de précision de la mesure de l'aire d'écoulement. Un soin particulier doit être pris pour situer la surface d'écoulement;
- le manque de stabilité des conditions d'écoulement.

6. Comparaison de la précision et de l'exactitude des méthodes volumétriques, par dilution et au moulinet

L'inspection des différents éléments du canal est recommandée dans ce cahier pour juger de la fiabilité d'une installation de mesure du débit. Afin de confirmer le bon fonctionnement du canal, plusieurs intervenants du domaine optent pour une vérification extrinsèque en utilisant une méthode alternative dont la plus populaire est sans doute le moulinet.

Même si une ou quelques mesures de vérification ne sont pas très significatives sur le plan mathématique, il faut reconnaître que deux résultats semblables constituent une indication qui renforce la présomption d'un fonctionnement adéquat de l'élément de mesure. D'ailleurs, ce type d'observation est fréquemment relevé, ce qui contribue au maintien de cette pratique pour laquelle nous exprimons certaines réserves. Un examen statistique détaillé de la question est en dehors de l'objectif de ce cahier, mais disons essentiellement que le diagnostic de la décision du bon fonctionnement repose plutôt sur la différence tolérée entre les deux appareils. Cette différence dépend des biais systématiques des deux instruments et de leur précision respective.

Les paragraphes suivants reprennent des éléments déjà traités dans ce cahier, avec pour objectif de comparer les principales sources d'erreur associées aux trois méthodes utilisées pour faire des vérifications. Les notions de précision et d'exactitude sont présentées de façon à souligner comment les principales causes d'erreur peuvent amener l'expérimentateur de conclure faussement au bon ou au mauvais fonctionnement d'un élément de mesure à partir de quelques essais.

6.1. Précision et exactitude

Il existe deux notions fondamentales liées à la prise de mesure dans le domaine scientifique : la précision et l'exactitude.

La **précision** fait référence à la proximité d'un ensemble de mesures les unes par rapport aux autres, sans tenir compte du degré de rapprochement entre la moyenne de ces mesures et la vraie valeur, qui est d'ailleurs la plupart du temps inconnue. La dispersion ou la variation est donc définie à partir des écarts aléatoires qui existent entre les mesures. Elle est obtenue en comparant chacune des mesures individuelles à la moyenne observée. Dans ce cahier, le terme « précision » indique le niveau de rapprochement des valeurs entre elles. La variation est une donnée complémentaire. Ainsi, une précision de 99 % implique une variation de 1 %.

Pour réduire l'importance des erreurs aléatoires, il suffit de répéter la mesure un certain nombre de fois. Plus les sources de variation dans un processus sont nombreuses ou plus les variations individuelles sont importantes, plus le risque d'obtenir une valeur différente par rapport à la vraie valeur est grand. La précision est le plus souvent exprimée sous forme de variance, d'écart type ou de coefficient de variation. La statistique permet d'apprécier quantitativement la réduction de la variabilité en fonction du nombre de mesures. Cette réduction est fonction de la racine carrée du nombre de mesures.

L'**exactitude** ou la justesse fait référence à l'affinité d'une méthode ou d'un processus à donner un résultat qui est égal au vrai résultat, en considérant seulement les sources d'erreur qui peuvent provoquer un biais. Par exemple, une règle de un mètre qui n'aurait que 95 cm donnerait nécessairement des résultats biaisés négativement de 5 % ou avec un erreur systématique de - 5 %.

Dans un sens, l'exactitude d'une méthode de mesure est plus importante que sa précision, car un manque de justesse est l'origine de biais qui faussent systématiquement tous les résultats. Le biais est plus sérieux qu'une variation aléatoire, surtout lorsqu'on est incapable de l'estimer ou, pire encore, de le percevoir. Il laisse l'expérimentateur avec une donnée qui est toujours faussée positivement ou négativement par rapport à la vraie valeur. Le fait de répéter la mesure ne fait que confirmer ce résultat.

Pour qu'un appareil soit apte à être utilisé pour en vérifier un autre, il faut que la précision des mesures de cet appareil soit au moins aussi bonne que celle de l'appareil à vérifier. Dans le cas contraire, on devra prendre un grand nombre de mesures pour combler statistiquement le manque de précision. Évidemment, il est inacceptable d'utiliser une méthode susceptible de causer un biais important.

Si on applique ces notions aux différentes techniques de mesure du débit, les commentaires suivants peuvent être faits.

6.2. Méthode volumétrique

La méthode volumétrique est la méthode la plus directe de vérification. Les causes de variation sont limitées à la précision de la mesure du volume du contenant et du temps de remplissage. Les seules ressources de biais sont la mesure du volume du réservoir et le chronométrage, mais elles peuvent être réduites au point de devenir négligeables. Si l'exactitude du volume du réservoir est remise en cause, on peut simplement déduire le volume du liquide par pesée. Les erreurs aléatoires de mesure du temps et du volume peuvent être évaluées assez facilement. Les variations naturelles de débit sont prises en compte par le canal et par l'instrument. Leur effet sur la précision ou sur l'exactitude dépend du temps, et de la précision de réponse de l'élément secondaire et de la simultanéité des opérations. Pour tenir compte des variations naturelles de débit, les mesures doivent être faites à proximité l'une de l'autre. Il est aussi possible d'utiliser une correction qui tient compte d'un décalage dans le temps lorsque cette condition ne peut pas être remplie.

Cet instrument donne, après des vérifications élémentaires et en suivant les recommandations prévues dans ce cahier, la possibilité d'obtenir un résultat non biaisé avec une précision élevée. Pour une majorité de cas, il s'agit d'une méthode sûre et peu coûteuse.

6.3. Méthode par dilution

Les nombreuses manipulations liées à la méthode par dilution constituent des sources de variations aléatoires qui, lorsque mal évaluées ou contrôlées, peuvent devenir aussi des sources de biais. Par exemple, la méthode de l'injection continue entraîne souvent les erreurs suivantes :

- instabilité du débit de la pompe d'injection;
- absorption ou réaction du traceur avec l'effluent (indice de récupération du traceur);
- mélange inadéquat du traceur au point de prélèvement;
- présence naturelle du traceur dans l'écoulement;
- erreurs liées à l'analyse.

On pourrait également ajouter la variation du débit au cours de la mesure. Théoriquement, le traceur tient compte de cette variation. Une augmentation du débit sera accompagnée d'une diminution de la concentration du traceur.

Toutefois, le caractère quasi instantané de ces changements rend incertaine la réalisation de cette éventualité, car la vitesse de diffusion risque fort d'être insuffisante pour refléter un ajustement correspondant et instantané de la concentration. Néanmoins, lorsque les variations relatives du débit (variation divisée par le débit moyen) sont faibles et qu'elles sont aléatoires, c'est-à-dire autant positives que négatives, on peut considérer qu'il s'agit d'une erreur dont l'espérance mathématique est nulle. Dans ces conditions, il s'agit d'une cause d'erreur qui devient difficilement une source de biais, tant que les variations demeurent minimales, comme il est indiqué dans ce cahier.

La stabilité du débit de la pompe d'injection du traceur peut devenir une cause de biais si, par exemple, il y a diminution du débit pendant l'injection en cours de mesure, parfois simplement à cause d'un changement de la pression entre la pompe et la solution traçante.

Des remarques semblables s'appliquent aux autres causes d'erreur. Elles sont toutes contrôlables et mesurables; mais si elles ne sont pas vérifiées, elles peuvent introduire des biais.

L'homogénéité du mélange au point de prélèvement est probablement la cause d'erreur la plus difficile à contrôler. Cette erreur provoque aussi bien une sous-estimation qu'une surestimation systématique du débit, selon que le prélèvement est effectué dans une zone où la concentration du traceur est respectivement trop forte ou trop faible.

Par conséquent, la méthode par dilution implique un certain éventail de causes d'erreurs qui doivent être contrôlées pour éviter l'apparition de biais. Toutefois, le nombre important de sources de variation peut provoquer la nécessité de prendre plusieurs mesures afin d'obtenir une bonne précision finale.

6.4. Méthode du moulinet

Les manipulations liées à la méthode du moulinet sont moins nombreuses que celles entourant la méthode par dilution, ce qui est probablement l'origine de sa grande popularité^(37, 38, 39). Par contre, il existe plusieurs causes d'erreur qui entraînent des biais.

En premier lieu vient l'impossibilité de mesurer à proximité des parois du canal où la vitesse est plus faible, ce qui provoque nécessairement une surestimation du débit.

Cette source d'erreur devient de plus en plus importante lorsque la dimension du canal diminue ou que la hauteur du liquide devient faible. Il s'agit d'une cause de biais non contrôlable, mais dont l'effet diminue avec l'augmentation du volume d'eau relativement à la surface des parois exposées à l'écoulement. Des hauteurs d'eau très faibles ou des parois rapprochées permettant de prendre peu de mesures sont susceptibles d'entraîner des biais significatifs.

Il existe aussi d'autres causes de biais qui sont plus facilement vérifiables, dont :

- la présence de matières collantes ou de débris grossiers, qui entraîne une réduction de la vitesse de rotation;
- la fragilité de l'appareil, dont l'étalonnage peut être affecté par divers facteurs, tels que chocs, déformation, rouille, etc. L'utilisateur doit en tout temps maintenir un étalonnage exact, ce qui impose certaines contraintes car il existe très peu d'endroits qui offrent ce service;
- la présence d'un profil d'écoulement difforme, des courants de retour, etc. peut introduire des biais importants. Cette erreur est contrôlable si l'expérimentateur peut changer de point de mesure. L'angle d'insertion est, pour certains types d'instruments, une autre variable qui nécessite une attention spéciale. Par contre, l'utilisation d'un autre moulinet situé à un point représentatif peut compenser les variations de débit.

Les erreurs aléatoires propres à cet instrument sont peu nombreuses. Elles se résument à l'erreur de lecture de la vitesse de rotation et l'erreur de positionnement de l'instrument dans le courant. En présence d'un écoulement uniforme, cette erreur est peu significative, mais elle prend plus d'importance en présence de turbulence. La méthode du moulinet permet d'obtenir une précision acceptable dans des conditions favorables.

Cette méthode est surtout affectée par des erreurs qui sont susceptibles de provoquer des biais. Dans le cas d'un débit de liquide insuffisant, le biais peut être important sans qu'il soit possible de remédier à la situation. Même si l'origine des autres biais est connue, il peut s'avérer difficile d'en estimer l'importance. Enfin, l'usage de cet instrument peut entraîner de la confusion lorsque les causes de biais ne sont pas connues.

La vérification d'un instrument de mesure doit donc être réalisée après l'examen des caractéristiques de l'écoulement et en faisant preuve de jugement professionnel dans l'application des différentes méthodes disponibles.

RÉFÉRENCES

1. MANNING ENVIRONMENTAL CORP., *Flumes*, Publication # FL-778, Manning Environmental Corp., Santa Cruz.
2. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, *Water Measurement Manual*, 2nd edition revised, reprinted 1974 – reprinted 1981, Denver, 327 p.
3. BONNIN, J., *Débits des liquides à l'air libre*, Association française de normalisation, R-2310, R-2311, 33 p.
4. GRANT, D. M., *Open Channel Flow Measurement Handbook*, 1st edition, Lincoln, Instrumentation Specialties Company (1979).
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *Annual Book of ASTM Standard: Water and Environmental Technology Water (1)*, volume 11.01, Philadelphia (1987).
6. COMPTON, P. R., KULIN, G., *A Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow*, Washington, National Bureau of Standards Special Publication 421, Institute for Basic Standards (1975), 97 p.
7. GRANT, D. M., *ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook*, 2nd edition, ISCO Inc., Environmental Division (1988).
8. SKOGERBOE, G. V., HYATT, L., ENGLAND, J. D. and JOHNSON, J. R., *Design and Calibration of Submerged Open Channel Flow Measurement Structures : Part 2, Parshall Flumes*, PRWG 31-3, Logan, Utah Water Research Laboratory, Utah State University, 1967.
9. PLASTI-FAB INC., *Product Bulletin No. PB 1, LP-5M-2-80*, Plasti-Fab inc., Tualatin, Oregon (1980).
10. LUDWIG, J. H., LUDWIG, R. G., *Design of Palmer-Bowlus Flumes*, Journal Sewage and Industrial Wastes, vol. 23, no. 9, p. 1097-1107 (September 1951).

11. WELLS, E. A., Gotaas, H. B., *Design of Venturi Flumes in Circular Conduits*, Paper No. 2937, Transactions of ASCE, vol. 121, p. 749-775 (1956).
12. GRANT, D. M., *ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook*, ISCO Inc., Lincoln, NE 68501, Third Edition (1989).
13. F.B. LEOPOLD COMPANY INC., “*Catalog No. 661*”, F.B. Leopold-lagco, Inc., Zelienople, Pennsylvania, 16063 (1969).
14. F.B. LEOPOLD COMPANY INC., *Catalog No. 652-B*, F.B. Leopold-lagco, Inc., Zelienople, Pennsylvania, 16063 (1974).
15. MARSALEK, J., *Instrumentation for field studies of urban runoff*, Research report No. 42, Environmental Management Service, Canada Centre for Inland Waters, Burlington, Ontario (1973).
16. SKOGERBOE, Gaylord V., Bennett, Ray, S. and WALKER, Wynn R., *Generalized Discharge Relations for Cutthroat Flumes*, Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 98, No. IR4, p. 569-583 (Dec. 1974).
17. WALKER, W. R., Skogerboe, G. V. and Bennet, R. S., *Flow-measuring flume for wastewater treatment plants*, Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol. 45, No. 3, p. 542-550 (mars 1973).
18. SKOGERBOE, Gaylord V., Walker, Wynn R., Wu, Tsu-Yang and Bennet, Ray S., *Slope-Discharge Ratings for Cutthroat Flumes*, Transactions of American Society of Agricultural Engineers, Vol. 16, No. 1 (1973).
19. SKOGERBOE, Gaylord V., Hyatt, Leon M., *Rectangular Cutthroat Flow Measuring Flumes*, Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, IR4, p. 1-13 (Dec. 1967).
20. ACKERS, P., White, W. R., Perkins, J. A., Harrison, A. M., *Weirs and Flumes for Flow Measurement*, John Wiley & Sons Ltd. (1978).

21. GWINN, W. R. and Parson, D. A., *Discharge Equations for Hs, H, and HL Flumes*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 102 (jan. 1976), No. HY1, Proc. Paper 11874, p. 73-88.
22. INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION, *Water Flow Measurement in Open Channels Using Weirs and Venturi Flumes - Part 1 : Thin-Plate Weirs* ,ISO Standard No. : 1438/1, First Edition (April, 1980).
23. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *Annual Book of ASTM, Standards Water and Environmental Technology*, Part 31, Water, Philadelphia, PA. (1980).
24. KINDSVATER, C. E., Carter, R. W., *Discharge Characteristics of Rectangular Thin-plate Weirs*, Journal of the Hydraulic Division of the ASCE, Vol. 83, No. HY6/1453 (Dec. 1957).
25. SHEN, J., *Discharge Characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs*, U.S. Department of Interior, Geological Survey, Draft for I.S.O. (July 1960).
26. THEL-MAR COMPANY, *A Volumetric Weir for Measuring Flows Thru Manholes*, Publication # 1-1-78, Thel-Mar Company, Lansdale, PA. 19446 (1978).
27. COLLINGE, V. K. and Simpson, James R., *Dilution Techniques for Flow Measurement*, University of Newcastle Upon Tyne, Department of Civil Engineering (1963).
28. WERRELL, W. L., *Stream Gaging by Injection of Tracer Elements*, M. Sc. Thesis, Arizona University, Tuscon (1967).
29. WILSON, Jr., J. F., Cobb, Ernest D. and Kilpatrick, Frederick A., *Fluorometric Procedures for Dye Tracing*, Chap. A12, Book 3, Revised 1986, Applications of Hydraulics, Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (1986).
30. KILPATRICK, Frederick A. and Cobb, Ernest D., *Measurement of Discharge Using Tracers*, Chap. A16, Book 3, Applications of Hydraulics, Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (1985).
31. THOMAS, Charles W. and Dexter, Robert B., *Modern Equipment for Application of Salt Velocity Method of Discharge Measurement for Performance Tests*, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

32. WILSON Jr., James F., *Fluorometric Procedures for Dye Tracing*, Chap. A12, Book 3, Applications of Hydraulics, Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (1968).
33. COLE, J.A., *Dilution Gauging by Inorganic Tracers; Notably the Plateau Method, Using Dichromates*, Symposium on river flow measurements, Loughborough, 1969, London Institution of Water Engineers, p. 111-146 (1969).
34. TURNER DESIGNS, *Flow Measurements in Sanitary Sewers by Dye Dilution, Fluorometric Facts*, Bulletin SS 7-80, Turner Designs, Mountain View, California.
35. BELLAMY, R. J., *An Evaluation of Chemical Gauging Techniques*, New Zealand Ministry of Works, Water and Soil Division, Hydrological Research, Progress Report No. 6 (1971).
36. INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION, *Liquid Flow Measurement in Open Channels - Velocity-area Methods - Collection and Processing of Data for Determination of Errors in Measurement*, ISO 1088, Second Edition (1985).
37. FRENCH, Richard H., *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, New York (1985).
38. MARSH-MCBIRNEY, INC., *Instruction Manual, Model 201, Portable Water Current Meter*, Publication 201-676, Marsh-McBirney, Inc., Gaithersburg, Maryland, (1981).

BIBLIOGRAPHIE

- AASTAD, Johan and Szgnen, Reinhardt, *Discharge Measurements by Means of a Salt Solution "The Relative Dilution Method"*, p. 289 - 292.
- AGG, A. R., Mitchell, N. T. and Eden, G. E., *The Use of Lithium as a Tracer for Measuring Rates of Flow of Water or Sewage*, Water Pollution Research Laboratory, Stevenage, Paper no. 2, p. 240-245 (1960).
- ASSOCIATION GÉNÉRALE DES HYGIÉNISTES ET TECHNICIENS MUNICIPAUX. *Les stations de pompage d'eau*, 3^e édition, 445 p. (1986).
- BARSBY, A., *Determination of Mixing Lengths in Dilution Gauging*, Symposium on Geochem, Precipitation, Evaporation, Soil-Moisture, Hydrom, Bern 1967, Int. Ass. SCI Hydrol, Pub no. 78, p. 395-407 (1968).
- BOLCHO, C. and Fisher, T. J., *Control of Industrial Wastewater Discharges in the North West of England*, Water Science Technology, vol. 25, no. 1, p. 53-59, IAWPCR (1992).
- BENNETT, R.S., *Cutthroat Flume Discharge Relations*, M.Sc. Thesis, Agricultural Engineering Dept., Colorado State University., Fort Collins, Colorado (1972).
- BERMEL, K. J., *Hydraulic Influence of Modifications to the San Dimas Critical Depth Measuring Flume*, Transaction of Geophysic Union, vol. 31, no. 5, p. 763-770 (Oct. 1950).
- BLUMBERG, A. F., Galperin, B. and O'Connor, D. J., *Modeling Vertical Structure of Open- Channel Flows*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118, no. 8, p. 1119-1134, ASCE (August 1992).
- BSATA, Abdalla, *Instrumentation et automation des procédés industriels*, Applications à l'industrie de l'eau, Cégep de Saint-Laurent, Édition Le Griffon d'argile, Québec.
- CARTER, Rolland W., et Anderson, Irving E., *Accuracy of Current Meter Measurements*, Journal of the Hydraulics Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, vol. HY 4, p. 105 - 115 (Jul 1963).
- CHANDRA, U., Aoki, P. E., Ramos e Silva, J. A. and Castagnet, A. C., *Measurement of Flow and Direction of Ground Water by Radioactive Tracers : Hydrological Evaluation of a Waste Disposal Site at "Instituto de Pesquisas Energéticas E Nucleares (IPEN)"*, IPEN Pub. 28, Institut de recherches énergétiques et nucléaires, Sao Paulo, Brésil (1981).
- CHASE BECKER, Edith, Payne, Faith N., *Selected Techniques in Water Resources Investigations, 1966-67*, Geological Survey Water-Supply, Paper 1892, Department of the Interior, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402 (1968).

- CHEN, C. L., Clyde, C. G., Chu, M. S. and Wei, C. Y., *Calibration of Parshall Flumes with Non-Standards Entrance Transitions*, Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, Utah (March 1972).
- CHIU, C. L., *Variation of Velocity Distribution Along Nonuniform Open-Channel Flow*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118, no. 7, p. 989-1001, ASCE (July 1992).
- CHOW, Ven Te, *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, New York (1959).
- COBB, E. D. and Bailey, J. F., *Measurement of Discharge by Dye-Dilution Methods*, Book 1, Chapter 14 - Hydraulic Measurement and Computation, Surface Water Techniques, U. S. Department of the Interior Geological Survey (Aug. 1965).
- COLE, John A., *Prediction of Mixing Lengths for River Flow Gaging*, Proceedings American Society of Civil Engineers, Journal Hydraulic Division, vol. 100, no. 8, p. 1167-1172 (1974).
- COMMISSION INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE, *Dictionnaire technique multilingue des irrigations et du drainage*, Central Office, Chanakyapuri, New Delhi.
- CROMPTON & KNOWLES CANADA LIMITED, *Intracid Rhodamine WT liquid*, Fiche signalitique, Anjou, Québec (1991)
- CSÉPAI, L. and Kastanek, F., *Flow Regulation by Automatically Controlled Overflow Weirs*, Water Resources, vol. 26, no. 5, p.625-628 (1992).
- DEANER, David G., *Effect of Chlorine on Fluorescent Dyes*, Journal of Water Pollution Control Federation (WPCF), vol. 45, no. 3, p. 507-514 (Mar. 1973).
- DIPLAS, P., *Hydraulic Geometry of Threshold Channels*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118, no. 4, ASCE, p. 597-614 (Apr. 1992).
- DISKIN, M. H., *Temporary Flow Measurement in Sewers and Drains*, Journal of the Hydraulic Division, ASCE Proceedings, vol. 89, no. HY4, p. 141-159 (Jul. 1963).
- DISKIN, M. H., *Sharp Crested Weirs for Circular Channels*, Water and Water Engineering, vol. 75, p. 309-313 (Aug. 1971).
- DUMAS, Henry, *La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau*, *La Houille Blanche*, no. 5, p. 690-701 (oct.-nov. 1952), no. 1, p. 51-57 (janv.- fév. 1953), no. 3, p. 360-373 (juin-juil. 1953).

- ENGEL, P., *A Universal Calibration Equation for Price Meters and Similar Instruments*, Scientific Series no. 65, Environment Canada, Inland Waters Directorate, Burlington, Ontario (1976).
- ENVIRONMENT CANADA, *Sampling for Water Quality*, Water Quality Branch, Inland Waters Directorate, Ottawa (1983).
- FEUERSTEIN, Donald L. and Selleck, Robert E., *Fluorescent Tracers for Dispersion Measurements*, Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 89, no. SA 4 (Aug. 1963).
- FISHER, Hugo B., *Flow Measurements with Fluorescent Tracers*, ASCE, Paper no. 1, p. 139-140 (Jan. 1967).
- FOGLER, Scott H. and Brown, L. F., *Elements of Chemical Reaction Engineering*, Second Edition, Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, p. 708-727.
- FOSTER, William S., *How to Determine Waste Water Flow*, The American City and County, vol. 92, no. 3, p. 61-62 (Mar. 1977).
- GILMAN, K., *Application of a Residence Time Model to Dilution Gauging, with Particular Reference to the Problem of Changing Discharge*, Hydrological Sciences Bulletin, vol. 20, no. 4, p. 523-537 (Dec. 1975).
- GOODELL, B. C., Watt, J. P. C. and Zorich, T. M., *Streamflow Volumes and Hydrographs by Fluorescent Dyes*, Int. Un. of Forestry Res. Organizations (1967)
- GOTOH, Shigeru., Witlin, William G., *New Signal Processing Approach in Electromagnetic Flowmeters*, Yokogawa Hokushin Electric Corp., Tokyo, Japan (1982).
- HAGER, W.H., *Design Procedure for Flow Over Side Weirs*, ASCE, vol. 117, no. 1 (1991).
- HAGER, W.H., *Dividing Flow in Open Channels*, ASCE, vol. 116, no. 3, p. 634-637 (1990).
- HAMMER, Mark J., *Water and Waste-Water Technology, SI Version*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- HARRIS, James P., Kacman, Stephen A., Forest, Grant and Tomcik, John, *Flow Monitoring Techniques in Sanitary Sewers*, Deeds and Data, Water Pollution Control Federation, Washington, D.C. (July 1974).

- HELMES, Tucker C., Lipsett, Michael J., Owen, Patricia A. and Sigman, Caroline C., *Health and Environments Aspects of Rhodamine-Based Dyes*, Final Report, SRI Project LSC-3614, SRI International, Menlo Park, CA 94025 (1983).
- HENDERSON, F.M., *Open-channel Flow*, The Macmillan Co., New York (1966).
- HOLLEY, E. R., *Dilution Method of Discharge Measurement in Pipes*, National Bureau of Standards Special Publication 484, Proceedings of the Symposium on Flow in Open Channels and Closed Conduits, Gaithersburg, MD (Feb. 1977).
- HORN, D.R. and DEE, N., *Technical Report no. 5 of the Storm Drainage Research Project*, Dept. of Environmental Engineering Science, Johns Hopkins University (Jan. 1967).
- HORTON, R.E., *Weir Experiments*, Government Printing Office, Washington, D.C. (1907).
- HUBER, W.C., *Two-point Stage Measurements for Calculation of Urban Runoff Hydrograph*, A paper presented at the 22nd Annual Specialty Conference, Hydraulics Division, ASCE, Knoxville, Tenn. (July 31-Aug.3, 1974).
- HYATT, M.L., *Design, Calibration, and Evaluation of a Trapezoidal Measuring Flume by Model Study*, M.S. thesis, Civil Engineering Department, Utah State University, Logan, Utah (Mar. 1965).
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION, *Liquid Flow Measurement in Open Channels by Weirs and Flumes - Rectangular Broad-Crested Weirs*, ISO 3846, Second Edition (1989).
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U*, ISO 4359, première édition (1983).
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de déversoirs et de canaux jaugeurs - déversoirs à profil triangulaire*, ISO 4360, deuxième édition (1984).
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - déversoirs en V ouvert*, ISO 4377, deuxième édition (1990).
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION, *Mesure de débit des fluides - calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit*, ISO 5168, première édition (1978).
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION, *Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage et l'utilisation des appareils de mesure du débit - partie 1 : relation d'étalonnage linéaires*, ISO 7066-1, première édition (1989).

- JACOBI, J. P., *Pumping Stations as Flowmeters*, WPCF, Deeds and Data, p. 1-4 (July 1975).
- KARNEY Bryan W. and McInnis, Duncan, *Efficient Calculation of Transient Flow in Simple Pipe Networks*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118, no. 7, p. 1014 - 1030, ASCE (Jul. 1992).
- KATZ, Brian G. and Fisher, Gary T., *A Comparison of Selected Methods for Measuring Flow Rate in a Circular Storm Sewer*, International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, University of Kentucky, Lexington, Kentucky (Jul. 1983).
- KERN, Robert, *Measuring Flow in Pipes With Orifices and Nozzles*, Journal of Chemical Engineering, p. 72 - 78 (Feb. 1975).
- KILPATRICK, F. A., *Flow Calibration by Dye-Dilution Measurement*, Journal of Civil Engineer, ASCE, vol. 38, no. 2, p. 74-76 (Feb. 1968).
- KILPATRICK, F.A., *Flow Measurements with Fluorescent Tracers*, Journal of Hydraulics Division, ASCE, vol. 93, no. 4, p. 298 - 308 (Jul. 1967).
- KILPATRICK, F.A., *Dosage Requirements for Slug Injections of Rhodamine BA and WT Dyes*, Geological Survey Professional Paper 700-B, Geological Survey Research, U.S. Government Printing Office, Washington, DC (1970).
- KIRKPATRICK, George A., *A Review of Flow Measuring Devices*, Proceedings of a Research Conference Urban Runoff Quantity and Quality, Published by ASCE, p. 191-198, New York (1975).
- KNAPP, John A., Schaake, Jr., John C., Viessman, Jr., Warren and Associate Members ASCE, *Measuring Rainfall and Runoff at Storm-water Inlets*, Journal of the Hydraulics Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers (Sep. 1963).
- KRIZEK, Raymond J., Mosonyi and, Emil F., *Water Resources Instrumentation, Volume 1, Measuring and Sensing Methods*, Proceedings of the International Seminar and Exposition on Water Resources Instrumentation, June 4-6 1974, Chicago, Ill., Distributed by Ann Arbor Science Publishers Inc., Ann Arbor, Michigan (1975).
- LESBROS, J., et Damez, F., *La mesure des grands débits en conduits fermés, Inventaire, comparaison et évolution des diverses techniques pour la mesure des grands débits d'eau (Instruments de mesure mécaniques et non mécaniques) – 2^e partie*, La technique de l'eau et de l'assainissement, Nos 433/434 (1983).
- LEWIS PUBLISHERS INC., *Submersible Sewage Pumping Systems Handbook*, 120 p. (1988).
- LI, S.G., Venkataraman, L. and Mclaughlin D., *Stochastic Theory for Irregular Stream Modeling. Part I: Flow Resistance*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118, no. 8, p. 1079 - 1090, ASCE (Aug. 1992).

- LYN, D. A., *Turbulence Characteristics of Sediment-Laden Flows in Open Channels*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 118, no. 7, p. 971-988 (Jul. 1992).
- MAHESHWARI, B. L. and McMahon, T. A., *Modeling Shallow Overland Flow in Surface Irrigation*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 118, no. 2, p. 201-217, ASCE (Mar./Apr. 1992).
- MASON, Martin A., Scott, Cloyd H., Culbertson, James R. and Worstell, R. V., *Flow Measurements with Fluorescent Tracers*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 93, no. 3 (May 1967).
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, *Mesure des faibles débits d'eaux usées par auget basculeur*, Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts (CEMAGREF), Division qualité des eaux, pêche et pisciculture, Paris (1982).
- MORGAN, W. H., Kempf, D. and Phillips, R. E., *Validation of Use of Dye-Dilution Method for Flow Measurement in Large Open and Closed Channel Flows*, NBS Special Publication, Proceedings of the Symposium on Flow Measurement in Open Channels and Closed Conduits, Gaithersburg (Oct. 1977).
- MOUGENOT, G., *Measuring Sewage Flow Using Weirs and Flumes*, Water & Sewage Works, July 1974, p. 78-81.
- NAFFRECHOUX, N., Mazas, N. and Thomas, O., *Identification rapide de la composante industrielle d'une eau résiduaire*, Laboratoire de Chimie et Ingénierie de l'Environnement, ESIGEC, Université de Savoie, France, Environmental Technology, vol. 12, p. 325-332 (Mai 1990).
- NEDVED, T. K., Fochtman, E. G., Langdon, W. M. and Sullivan, F. O., *Instrumentation for Measurement of Wastewater Flow*, Journal of the Water Pollution Control Federation, vol. 44, no. 5, p. 820-828 (May 1955).
- OFFICE DES NORMES GÉNÉRALES DU CANADA, *Liquid Flow Measurement in Open Channels - Establishment and Operation of a Gauging Station*, CAN/CGSB-157.3-M91, Canadian General Standards Board, Ottawa, Ontario (Jul. 1991).
- OFFICE DES NORMES GÉNÉRALES DU CANADA, *Liquid Flow Measurement in Open Channels - Vocabulary and Symbols*, CAN/CGSB-157.1-M91, Canadian General Standards Board, Ottawa, Ontario (Aug. 1991).
- OFFICE DES NORMES GÉNÉRALES DU CANADA, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - partie 2 : détermination de la relation hauteur-débit*, CAN/CGSB-157.4-M91/ISO 1100-2 :1982, Canadian General Standards Board, Ottawa (juin 1991).
- PAINE, John N., *Open-Channel Flow Algorithm in Newton-Raphson Form*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 118, no. 2, p. 306-319, ASCE (Mar./Apr. 1992).

- PFANNKUCH, Hans-Olaf, *Elsevier's Dictionary of Hydrology*, Elsevier Publishing Company, New York (1969).
- PLASTI-FAB INC., *Product Bulletin Trapezoidal Flumes no. T-1*, Tualatin, Oregon 97062 (1977).
- PLASTI-FAB INC., *Technical Bulletin no. HF-2*, Tualatin, Oregon 97062 (1977).
- POIRIER, Guy, Desjardins, Raymond, Brière, François et Dagenais, Danielle, *Mesure en continu de débits d'eaux usées à l'aide d'un traceur fluorescent, la rhodamine WT*, Sciences et techniques de l'eau, vol. 20, no. 2, Québec (Mai 1987).
- POISSANT, L. and Béron, P., *Design and Operation of an Automatic Sequential Rainfall Sampler*, Water Resources, vol. 26, no. 4, p. 547-551 (1992).
- PRATT, E. A., *Another Proportional-flow Weir : Sutro Weir*, Engineering News, vol. 72, no. 9, p. 462-463 (Aug. 1914).
- RABOSKY, J. G. and Koraido, D. L., *Gaging and Sampling Industrial Wastewaters*, ASCE (Jan, 1973).
- REPLOGLE, John A., Meyers, Lloyd E., Asce, F. and Brust, K. J., *Flow Measurements With Fluorescent Tracers*, Proceeding ASCE, Journal of the Hydraulics Division, vol. 92, no. HY5, p. 1-15 (Sep. 1966).
- REPLOGLE, John A., Meyers, Lloyd E., Asce, F. and Brust, K. J., *Flow Measurements with Fluorescent Tracers*, Closure, Journal of the Hydraulics Division, vol. 94, no. HY2, p. 552-555 (Mar. 1968).
- RICHARD, Renald, *Mesure de débit*, Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de l'assainissement de l'eau (Nov. 1981).
- ROBINSON, A. R. and Chamberlain, A. R., *Trapezoidal Flumes for Open-channel Flow Measurement*, Transactions of The American Society of Agricultural Engineers, vol. 3, no. 2, p. 120-128 (1960).
- ROBINSON, A.R., *Trapezoidal Flumes for Measuring Flow in Irrigation Channels*, ARS 41-140, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture (March 1968).
- SCHAEFFER, David J., Kerster, Harold W., Bauer, Darryll R., Rees, Kim and McCormick, Steve, *Composite Samples Overestimate Waste Load*, Journal WPCF, vol. 55, no. 11, p. 1387-1392 (Nov. 1983).

- SCOTT, C. H., Norman, V. W.' and Fields, F. K., *Reduction of Fluorescence of Two Tracer Dyes by Contact with a Fine Sediment*, Geological Survey Research 1969, U. S. Geological Survey Professional Paper 650-B, p. B164 - B168 (1969).
- SCOTT, R. W. W., et al., *Developments in Flow Measurement*, Applied Science Publishers Inc., Englewood, New Jersey (1982).
- SISSON, W., *Estimating Flows through Parshall Flumes*, Plant Engineering, vol. 120 (Oct. 1980).
- SKOGERBOE, Gaylord V., Hyatt, Leon M. and Eggleston, Keith O., *Design and Calibration of Submerged Open Channel Flow Measurement Structures. Part I. Submerged Flow*, Report WG31-2, Office of Water Resources Research, U. S Department of the Interior, Utah Center for Water Resources Research, Utah State University, Logan, Utah (Feb. 1967).
- SMART, P. L. and Laidlaw, I., M., S., *An Evaluation of Some Fluorescent Dyes for Water Tracing*, Water Resources Research, vol. 13, no. 1 (Feb. 1977).
- SMOOT, George F., *Are Individual Current-Meter Ratings Necessary?*, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers (Mar. 1968).
- SOENKSEN, Philip J., *Automatic Tracer-Dilution Method Used for Stage-Dilution Ratings and Stream flow Hydrographs on Small Iowa Streams*, Water-Resources Investigations Report 89-4187, U. S. Geological Survey, Denver, Colorado (1990).
- SOUCEK, E., Howe, H. E. and Mavis, F. T., *Sutro Weir Investigations Furnish Discharge Coefficients*, Engineering News-Record (Nov. 1936).
- SPENCER, E. A. and Tudhope, J. S., *A Literature Survey of the Salt-Dilution Method of Flow Measurement*, Journal I. W. E., vol. 12, no. 2, pp 127-138 (1958).
- SPENCER, E. A., Tudhope, J. S. and Morris, Miss. J. I. N., *Flow Measurement by the Salt Dilution Method*, National Engineering Laboratory, Fluids Report no. 68, East Killbride (1958).
- SPRENKLE, R. E., *Piping Arrangements for Acceptable Flow Meter Accuracy*, Transaction of the ASME, vol. 67 (Jul. 1945).
- STANBRO, W. D. and Pynch, D. A., *Stability of Rhodamine WT in Saline Waters*, Water Resources Research, vol. 15, no. 6 (Dec. 1979).
- STEINBACK, B. J., *Effluent Flowmeter Calibration Using Fluorescent Dye Tracer*, Journal of Pulp and Paper Canada 88: 12 (1987).
- STEVENS, John C., *Temporary Flow Measurements in Sewers and Drains*, ASCE Proceedings, vol. 34, no. HY6 (Nov. 1964).

- STEVENS WATER RESOURCES PRODUCTS, *Stevens Water Resources Data Book*, 3rd Edition, Leupold & Stevens Inc., Beaverton, Ore., 97075 (1974).
- STRILAEFF, P. W., *Single Velocity Method in Measuring Discharge*, Department of the Environment, Inland Waters Branch, Water Survey of Canada, Winnipeg, Canada (1971).
- TARAZI, D. S., Hiser, L. L., Childers, R. E. and Boldt, C. A., *Comparison of Wastewater Sampling Techniques*, Journal of Water Pollution Control Federation, vol. 42, no. 5, p. 708 - 732 (May 1970).
- TCHOBANOGLIOUS, George, *Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater*, Metcalf & Eddy Inc., McGraw-Hill Book Company, New York (1981).
- TELEDYNE GURLEY, *Direct Reading Current Meter*, Instruction Book Gurley No 665, Troy, New York.
- THORSEN, T. and Oen, R., *How to Measure Industrial Wastewater Flow*, Journal of Chemical Engineering (Feb. 1975).
- TRIESTE, Douglas J., *Evaluation of Supercritical/Subcritical Flows in High-Gradient Channel*, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 118, no. 8 (Aug. 1992).
- TURNER DESIGNS, *Dye Studies/Chlorophyll/Oil Measurement*, Field Fluorometry, Form 10-1084-7.5M, Turner Designs, Mountain View, California.
- TURNER DESIGNS, *Flow Measurements*, Fluorometric Facts, Turner Designs, Mountain View, California.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Flow Equalization*, EPA Technology Transfer Seminar Publication, EPA 625/4-74-006 (May 1974).
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Flow Measurement Instrumentation*, Design Information Report, Journal WPCF, vol. 58, no. 10 (Oct. 1986).
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Handbook for Monitoring Industrial Wastewater*, Associated Water & Air Resources Engineers, Environmental Protection Agency Technology Transfer Publication (August 1973).
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *NPDES Compliance Flow Measurement Manual*, MCD-77, Office of Water Enforcement and Permits Enforcement Division, Compliance Branch, Washington, D.C. (Sep. 1981).

- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *NPDES Compliance Sampling Inspection Manual*, Office of Water Enforcement, Enforcement Division, Compliance Branch, Washington, D.C. (1979).
- UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, *Water Measurement Manual*, Bureau of Reclamation, Denver Colorado, Second Edition, 1967.
- WENZEL, Jr., H. G., *A Critical Review of Methods of Measuring Discharge Within a Sewer Pipe*, ASCE, Urban Water Resources Research Program, Tech. Memo no. 4 (Sep. 1968).
- WILLIAMS, R. T. and Bridges, J. W., *Fluorescence of Solutions: A Review*, Journal of Clinical Pathology (1964).
- WILSON, A.L., *Precision and Bias of the Results of Dilution Gaugings*, Symposium on Hydrometry Sep 1970, International Association of Hydrological Sciences Publication, no. 99, vol. 1, p. 289-299 (1973).
- WILSON Jr., J. F., *Time-of-Travel Measurements and Other Applications of Dye Tracing*, Water Resources Division, U.S. Geological Survey, Cheyenne, Wyoming
- YOTSUKURA, Nobuhiro and Cobb, Ernest D., *Transverse Diffusion of Solutes in Natural Streams*, Geological Survey Professional Paper 582-C, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C. (1972).

*Ministère du
Développement durable,
de l'Environnement
et des Parcs*

Québec 